

RÉSILIANCE : ADAPTATION DES BÂTIMENTS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

RAPPORT FINAL

Juin
2023

REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié du soutien de l'ADEME.

Membres du Comité de suivi :

Marc SCHOEFFTER (ADEME)

Etienne WURTZ (CEA-INES)

Ophélie OUVRIER-BONNAZ (CEA-INES)

Karim SELOUANE (Resallience)

Didier SOTO (Resallience)

CITATION DE CE RAPPORT

PEUPORTIER Bruno, MONNIER Robin et SCHALBART Patrick, ARMINES, LEMONSU Aude et LEROY Benjamin, CNRM, FRANÇOIS Eric, WURTZ Etienne et OUVRIER-BONNAZ Ophélie, CEA-INES, ZIV Nicolas, Resallience, SERODIO Eduardo, THIERS Stéphane et PIONNIER Robin, IZUBA Energies 2023.
Résilience – Rapport final, résultats, 375 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2004C0021

Étude réalisée par PEUPORTIER Bruno, SCHALBART Patrick, MONNIER Robin et KHAN Ali, ARMINES, LEMONSU Aude et LEROY Benjamin, CNRM, FRANÇOIS Eric, WURTZ Etienne et OUVRIER-BONNAZ Ophélie, CEA-INES, ZIV Nicolas, SELOUANE Karim et SOTO Didier, Resallience, SERODIO Eduardo, THIERS Stéphane et PIONNIER Robin, IZUBA Energies 2023 pour ce projet financé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Bruno Peuportier (ARMINES-CES)

Appel à projet de recherche : « Vers des bâtiments responsables » Edition 2020

Coordination technique - ADEME : Marc Schoeffter

Direction/Service : Villes et Territoires Durables

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	11
ABSTRACT	12
1. CONTEXTE DU PROJET	13
1.1. Contexte et enjeux scientifiques et techniques	13
1.1.1. Elaboration de données climatiques appropriées	13
1.1.2. Etude de l'impact du changement climatique sur les bâtiments	14
1.1.3. Evaluation des performances des solutions proposées par des indicateurs adaptés	14
1.2. Contexte et enjeux socio-économiques	15
1.3. Contexte et enjeux environnementaux	16
2. ÉTAT DE L'ART ET PRINCIPAUX CHOIX METHODOLOGIQUES.....	17
2.1. Etat de l'art	17
2.1.1. Données climatiques	17
2.1.1.1. Interaction entre climat urbaine et tendances climatique.....	18
2.1.1.2. Limites des projections climatiques pour les études d'impacts	18
2.1.1.3. Différentes méthodes de descente d'échelle	19
2.1.2. Evaluation de l'impact du changement climatique sur les bâtiments.....	19
2.1.2.1. Impacts sur le comportement thermique des bâtiments	19
2.1.2.2. Impacts économiques	21
2.1.3. Indicateurs de performance	21
2.1.3.1. Performance thermique des solutions proposées	21
2.1.3.2. Performance environnementale.....	22
2.1.3.3. Aspects socio-économiques.....	23
2.2. Méthodologie pour l'élaboration de données climatiques prospectives	23
2.2.1. Deux méthodes pour la construction des forçages climatiques	24
2.2.1.1. Descente d'échelle statistico-dynamique sur Paris	24
2.2.1.2. Modélisation climatique à haute résolution sur la France.....	25
2.2.2. Mise en forme des forçages climatiques pour les simulations des bâtiments	26
2.2.3. Choix des années représentatives	27
2.3. Elaboration d'un échantillon de bâtiments	28
2.4. Liste de mesures d'adaptation	29
2.4.1. Ventilation naturelle	29
2.4.2. Vitrages – dimensions, transmission et émissivité	32
2.4.2.1. Propriétés optiques et thermiques des vitrages.....	32
2.4.2.2. Dimensions des vitrages	34
2.4.2.3. Vitrages adaptatifs ou dynamiques	35
2.4.2.4. Avantages/inconvénients	36
2.4.3. Protections solaires	37
2.4.3.1. Protections solaires mobiles – Volets / stores.....	37
2.4.3.2. Protections solaires fixes	40
2.4.4. Murs végétalisés	45
2.4.5. Isolation	51
2.4.6. Inertie thermique	57
2.4.7. Zonage thermique et exposition.....	62

2.4.8.	Isolation réfléchive ou « basse émissivité »	66
2.4.9.	Rafrâchissement radiatif	66
2.4.9.1.	Rafrâchissement radiatif nocturne	69
2.4.9.2.	Rafrâchissement radiatif diurne	72
2.4.10.	Brasseurs d'air	74
2.4.11.	Rafrâchissement évaporatif	76
2.4.12.	Climatisation solaire	80
2.4.13.	Climatisation par système à compression	82
2.4.14.	Effet Peltier	85
2.4.15.	Puits provençal	86
2.4.16.	Géocooling	89
2.4.17.	Conclusions	89
2.5.	Indicateurs de performance	90
2.5.1.	Confort thermique	90
2.5.1.1.	Selon la RE 2020	90
2.5.1.2.	Autres indicateurs	91
2.5.2.	Performance environnementale	96
2.5.3.	Performance économique	96
3.	EVALUATION DES INDICATEURS SUR CAS REELS	99
3.1.	Cas d'étude	99
3.2.	Descriptif des bâtiments étudiés	100
3.3.	Préparation des données	100
3.3.1.	Période d'analyse et période de confort adaptatif	101
3.3.2.	Lissage – pas de temps	101
3.3.3.	Nettoyage des données erronées	101
3.3.4.	Reconstruction des trous de données	102
3.3.5.	Mesures de la température extérieure	103
3.3.5.1.	Reconstruction de la température extérieure	104
3.3.5.2.	Choix de la température extérieure	106
3.3.5.3.	Exemples de résultats avec différentes mesures de Text	110
3.4.	Méthodologie du calcul des indicateurs d'inconfort d'été appliquée aux sites instrumentés	114
3.4.1.	Température opérative ou intérieure ?	114
3.4.2.	Définition de la période de confort adaptatif	119
3.4.3.	Vérification de la disponibilité des mesures	122
3.4.4.	Calcul de la température d'inconfort chaud	123
3.4.5.	Calcul réglementaire des indicateurs d'inconfort d'été	128
3.5.	Définition de la période d'occupation	131
3.5.1.	Occupation - scénarios conventionnels	131
3.5.2.	Occupation séparée en zone jour et zone nuit	131
3.5.3.	Occupation des bâtiments tertiaires	132
3.5.4.	Et si on construisait l'occupation ?	132
3.6.	Résultats et analyses	137
3.6.1.	Principaux résultats de degrés-heures	139
3.6.2.	Position ou précision des capteurs	141
3.6.3.	Ce que le jour doit à la nuit	142
3.6.4.	Il faut sauver la maison MAS_PROVENCE	144
3.6.5.	Exposition : pour vivre heureux, vivons cachés	146
3.6.6.	Maison à ventiler : Tradimaisons1	148

3.6.7. IGC2 : un monde par « frais » ?	149
3.6.8. Résilience sous occupation	150
3.7. Ressenti des occupants	154
3.7.1. Extrait du rapport Enquête sociologique	154
3.7.2. Extrait de la thèse d'Eric VORGER ¹	154
3.7.3. Enquête sociologique des habitants	155
3.7.4. Occupants du bâtiment HELIOS	157
3.8. Conclusions et perspectives	159
4. DONNEES CLIMATIQUES	161
4.1. Objectifs	161
4.2. Présentation des données climatiques régionales EURO-CORDEX	161
4.3. Données météorologiques horaires à haute résolution	162
4.3.1. Modèle climatique à haute résolution AROME	162
4.3.2. Correction des simulations climatiques AROME	163
4.3.3. Comparaison des températures journalières AROME corrigées à l'ensemble EURO-CORDEX	163
4.4. Reconstruction d'une année typique en climat futur	164
4.5. Prise en compte d'événements thermiques extrêmes : les vagues de chaleur	166
4.5.1. Définition d'une vague de chaleur	166
4.5.2. Caractéristiques des vagues de chaleur	167
4.5.3. Sélection d'un événement AROME par comparaison à l'ensemble EURO-CORDEX	167
4.5.4. Combinaison du signal de la vague de chaleur et de l'année typique	170
4.6. Données extraites et statistiques moyennes des années reconstruites	171
5. INDICATEURS DE CONFORT DES MESURES D'ADAPTATION	177
5.1. Introduction	177
5.2. Echantillon de bâtiments & Module de variation paramétrique	178
5.2.1. Les bâtiments résidentiels	178
5.2.1.1. Logements individuels	178
5.2.1.2. Logements collectifs	182
5.2.2. Bâtiments tertiaires	186
5.2.2.1. Bâtiment de bureaux	186
5.2.2.2. Bâtiments d'enseignement	189
5.2.3. Module de variation paramétrique : Python, Amapola	193
5.2.4. Données météorologiques	195
5.2.4.1. Origine des données	195
5.2.4.2. Éléments de présentation et d'analyse des fichiers météorologiques	195
5.2.4.3. Utilisation des fichiers météorologiques	199
5.3. Etude complète : Fichier Météo : Paris Urbain, Futur Lointain, Vague Médiane	199
5.3.1. Comportement des occupants, Fichier Canicule 2003	199
5.3.2. Etude Isolation & Vitrages	203
5.3.2.1. Logements individuels	204
5.3.2.2. Logements Collectifs	206
5.3.3. Inertie Maison Neuve & BBC	207
5.3.3.1. Maison Neuve	207
5.3.3.2. Résidence BBC	210

5.3.4.	Vieille Maison en pierre : Inertie & Vide sanitaire ou Terre-plein, Fichier Canicule 2003	211
5.3.5.	Végétalisation BBC	211
5.3.6.	Isolation biosourcée et déphasage	212
5.3.7.	Mesures actives : Brasseur d'air & Puits Climatique	213
5.4.	Les 15 autres fichiers météo du Projet Résilience	218
5.4.1.	Hausmannien à Paris	219
5.4.1.1.	Comparaison 2050-2100, Médian.....	220
5.4.1.2.	Comparaison Médian-Extrême, 2100.....	220
5.4.1.3.	Comparaison Urbain-Rural, 2100, Extrême.....	223
5.4.2.	Maison neuve : Paris et Nîmes, 2 Dates, 2 Niveaux de sévérité.....	225
5.4.2.1.	Comparaison Paris-Nîmes, 2050, Médian	227
5.4.2.2.	Comparaison Paris-Nîmes, 2100, Médian	229
5.4.2.3.	Comparaison Paris-Nîmes, 2050, Extrême.....	231
5.4.2.4.	Comparaison Paris-Nîmes, 2100, Extrême	232
5.4.2.5.	Comparaison Paris Médian-Extrême, 2100	234
5.4.3.	HLM : Nîmes Urbain, 2 Dates, 2 Niveaux de sévérité	235
5.4.3.1.	Comparaison 2050-2100, Médian.....	235
5.4.3.2.	Comparaison Médian-Extrême, 2100.....	236
5.4.4.	Comparaison du confort estival : Hausmannien et HLM, Paris Urbain Lointain, vague Médiane.....	238
5.4.5.	Maison Années 50 : Nîmes Urbain, 2100, Extrême – Climatisation en zonage thermique	240
5.5.	Simulation des bâtiments tertiaires.....	242
5.5.1.	Point méthodologique	242
5.5.2.	Bâtiment de bureaux	242
5.5.2.1.	Comparatif des 16 fichiers météorologiques sur le bâtiment de base non rafraîchi	242
5.5.2.2.	Impact du type de vitrage	244
5.5.2.3.	Impact de la protection solaire	246
5.5.2.4.	Impact de la couleur du revêtement extérieur et d'une végétalisation.....	248
5.5.2.5.	Inertie : impact du type de plancher bas	249
5.5.2.6.	Variante isolation et inertie de l'enveloppe	249
5.5.2.7.	Impact du type d'ouverture des menuiseries.....	251
5.5.2.8.	Synthèse des variantes bâti	253
5.5.2.9.	Variante optimale bâti bureau neufs.....	254
5.5.2.10.	Variante optimale bâti bureaux anciens	256
5.5.2.11.	Variante systèmes de rafraîchissement des bureaux neufs	257
5.5.2.12.	Variante brasseurs d'air des bureaux anciens.....	258
5.5.3.	Bâtiments d'enseignement.....	259
5.5.3.1.	Comparatif des 16 fichiers météorologiques sur les bâtiments de base non rafraîchi	259
5.5.3.2.	Impact du type de vitrage	260
5.5.3.3.	Impact de la protection solaire	261
5.5.3.4.	Impact de la couleur du revêtement extérieur et d'une végétalisation.....	263
5.5.3.5.	Impact du type d'ouverture des menuiseries.....	264
5.5.3.6.	Impact du débit de ventilation nocturne.....	265
5.5.3.7.	Impact du niveau d'isolation et d'inertie de l'enveloppe	266
5.5.3.8.	Synthèse des variantes bâti	268
5.5.3.9.	Variante optimale bâti	269
5.5.3.10.	Variante systèmes de rafraîchissement	271

5.6. Conclusion	273
6. ANALYSES DE CYCLE DE VIE	274
6.1. Objectifs.....	274
6.2. Méthodologie d'ACV et collecte de données	274
6.2.1. Logiciel utilisé	274
6.2.2. Périmètre étudié pour les ACV en rénovation	274
6.2.2.1. Approche comparative pour les bâtiments tertiaires.....	274
6.2.2.2. Etapes considérées en logement.....	275
6.2.3. Optimisation multicritère en logements	275
6.2.4. Choix méthodologiques pour l'étape d'utilisation.....	275
6.2.5. Indicateurs environnementaux.....	276
6.2.5.1. Indicateurs midpoint	276
6.2.5.2. Indicateurs de dommages (endpoints)	276
6.2.5.3. Définitions des indicateurs	276
6.3. Résultats des ACV.....	278
6.3.1. Logements	278
6.3.1.1. Hypothèses complémentaires	278
6.3.1.2. Bâtiment HLM (Montreuil).....	278
Impacts de déconstruction des anciens éléments.....	278
Impact de construction des nouveaux éléments	279
Impacts de l'incinération du surplus de matériaux	280
Impacts liés au transport des matériaux	281
Paramétrage de l'outil "Amapola" pour les fronts de Pareto	282
Résultats pour les variantes : polystyrène expansé, polyuréthane, double et triple vitrage, 2 et 10 vol/h.....	283
6.3.1.3. Bâtiment Haussmannien (Paris).....	285
Impacts de déconstruction des anciens éléments.....	285
Impact de construction des nouveaux éléments	285
Impacts de l'incinération du surplus de matériaux	286
Impacts liés au transport des matériaux	287
Paramétrage de l'outil "Amapola" pour les fronts de Pareto	287
Résultats pour les variantes : polystyrène expansé, polyuréthane, double et triple vitrage, 2 et 10 vol/h.....	288
Résultats pour les variantes : « ouate de cellulose (toiture et façades), double et triple vitrage, 2 et 10 vol/h »	289
6.3.1.4. Maison Phénix (années 50)	291
Impacts de déconstruction des anciens éléments.....	291
Impact de construction des nouveaux éléments	291
Impacts de l'incinération du surplus de matériaux	292
Impacts liés au transport des matériaux	293
Paramétrage de l'outil "Amapola" pour les fronts de Pareto	293
Résultats pour les variantes : polystyrène expansé, polyuréthane, double et triple vitrage, 2 et 10 vol/h.....	294
Résultats pour les variantes : « ouate de cellulose (toiture et façades), double et triple vitrage, 2 et 10 vol/h »	296
6.3.1.5. ACV des variantes optimales	297
Hypothèses concernant l'étape d'utilisation	298
Résultats des ACV : HLM (Montreuil).....	299
Résultats des ACV : Haussmannien (Paris).....	301
Résultats des ACV : Maison Phénix	303
6.3.2. Bâtiments de bureaux anciens	305

6.3.2.1. Variantes étudiées :	305
6.3.2.2. Hypothèses complémentaires :	306
6.3.2.3. Mise en place de l'ITE.....	306
6.3.2.4. Variantes optimales bâti bureaux anciens	307
Sans système de rafraîchissement	307
Avec système de rafraîchissement	308
6.3.2.5. Comparaison des différentes variantes	309
Détail de l'étape utilisation	310
6.3.3. École ancienne	312
6.3.3.1. Variantes étudiées :	312
6.3.3.2. Hypothèses complémentaires :	312
6.3.3.3. Mise en place de l'ITE.....	313
6.3.3.4. Variantes optimales bâti école ancienne	313
Sans système de rafraîchissement	313
Avec système de rafraîchissement	314
6.3.3.5. Comparaison des différentes variantes	314
Détail de l'étape utilisation	316
6.4. Conclusions et perspectives.....	317
7. EVALUATIONS ECONOMIQUES	318
7.1. Objectifs et Programme de Travail	318
7.1.1. Objectifs	318
7.1.2. Programme de travail	318
7.2. Etat de l'art	319
7.2.1. Impacts économiques (DS)	319
7.2.2. Aspects socio-économiques (DS).....	319
7.3. Liste de mesures d'adaptation évaluées	320
7.4. Chiffrage des solutions d'adaptation	320
7.5. Méthodologie d'évaluation économique utilisée dans le cadre du projet RESILIANCE	321
7.5.1. Les diagrammes de Pareto.....	322
7.5.2. Les diagrammes parallèles	323
7.5.3. Les analyses coûts-bénéfices.....	323
7.5.3.1. Hypothèses prises.....	324
7.6. Calculs	330
7.7. Résultats : Valeur Actuelle Nette (VAN) et Taux de Rendement Interne (TRI)	333
7.7.1. Résultats avec un investissement de 600 000 €	333
7.7.2. Résultats avec un investissement de 800 000 €	334
7.7.3. Résultats avec un investissement de 1 000 000 €	335
7.8. Conclusions	336
8. RECOMMANDATIONS.....	337
8.1. Objectifs du rapport.....	337
8.2. Synthèse de la méthodologie du projet	337
8.2.1. Etat de l'art et principaux choix méthodologiques	337
8.2.2. Mesures in situ	337
8.2.3. Élaboration de données climatiques prospectives.....	337
8.2.4. Simulations thermo-aérodynamiques	338

8.2.5. Analyses de cycle de vie.....	339
8.2.6. Évaluations économiques	340
8.3. Enseignements : Éléments de constat	342
8.3.1. Quelle est la sévérité des conditions estivales attendues d'ici la fin du siècle ?.....	342
8.3.2. Quelles sont les conséquences attendues sur le confort des occupants dans les bâtiments ?.....	344
8.4. Recommandations : les principaux leviers d'adaptation	346
8.4.1. Le comportement des occupants : sobriété des usages pour limiter les surchauffes	346
8.4.1.1. L'aération nocturne.....	346
8.4.1.2. La protection solaire	348
8.4.1.3. Les apports internes : sobriété d'usage et efficacité énergétique.....	350
8.4.2. Conception d'une enveloppe efficace, adaptée aux surchauffes	350
8.4.2.1. Faut-il isoler ?	350
8.4.2.2. Faut-il privilégier des isolants à fort déphasage ?	351
8.4.2.3. Quel type de vitrage ?	352
8.4.2.4. Le rôle de l'inertie	353
8.4.2.5. Les revêtements et la végétalisation des façades et toitures	356
8.4.3. Systèmes actifs de rafraîchissement et climatisation	357
8.4.3.1. Brasseurs d'air (ventilateurs plafonniers).....	357
8.4.3.2. Puits climatique.....	358
8.4.3.3. Rafraîchissement adiabatique.....	358
8.4.3.4. La climatisation, comment limiter les consommations	359
8.5. Quelle stratégie pour une adaptation à long terme ?	361
8.5.1. L'action sur le bâti est-elle suffisante ?.....	361
8.5.2. La mise en place d'un système actif est-elle suffisante ?	362
8.5.3. Une stratégie globale à intégrer aux démarches de conception	363
8.5.3.1. Leviers pour la conception de bâtiments neufs adaptés au changement climatique	363
8.5.3.2. Leviers d'adaptation mobilisables en rénovation	364
8.5.4. Quel est l'impact environnemental des mesures d'adaptation ?	365
8.5.5. Quel impact économique des mesures d'adaptation ?	366
8.6. Conclusions et perspectives.....	367
9. CONCLUSION / PERSPECTIVES.....	368
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	369
SIGLES ET ACRONYMES	373

RÉSUMÉ

Le changement climatique impose d'adapter les bâtiments pour assurer un niveau de confort suffisant durant des périodes de canicule de plus en plus sévères. L'enjeu est de parvenir à cet objectif à moindre coût et à moindre impact environnemental, en construction neuve mais aussi en ce qui concerne le parc existant.

Après une phase d'état de l'art et de retours d'expérience sur la canicule de 2019, des données de projection climatique ont été élaborées, une liste de mesures d'adaptation et des échantillons de bâtiments types ont été constitués (maisons individuelles, logements collectifs, bâtiments tertiaires) en considérant différentes époques de construction. Des critères de performance ont été définis pour évaluer l'efficacité des différentes solutions d'adaptation proposées. Ces critères concernent les risques de surchauffe, en tenant compte de la notion de confort adaptatif, mais aussi la performance environnementale évaluée par analyse de cycle de vie (en incluant les effets éventuels des mesures d'adaptation sur les besoins de chauffage et de climatisation). L'objectif est ainsi d'évaluer les mesures d'adaptation par différents indicateurs, par exemple : degrés-heures d'inconfort, bilan CO₂, indicateurs ACV concernant la santé, la biodiversité et les ressources, coûts.

Les résultats de ces évaluations, qui dépendent du type de bâtiment, du climat considéré et du comportement des occupants, sont diffusés auprès de maîtres d'ouvrages, bureaux d'études techniques, administration en charge de la réglementation, chercheurs et autres organismes concernés par ces sujets. Les données climatiques prospectives élaborées dans le cadre de ce projet sont diffusées auprès d'utilisateurs d'outils de simulation thermique dynamique. Les connaissances acquises lors de ce projet pourront contribuer à orienter les politiques publiques visant à améliorer la résilience des bâtiments face aux vagues de chaleur.

ABSTRACT

Climate change requires buildings to be adapted to ensure a sufficient level of comfort during increasingly severe heat waves. The challenge is to achieve this objective at a low cost and with a low environmental impact, in new construction but also with regard to the existing stock.

After a state-of-the-art phase and feedback from the 2019 heat wave, prospective climatic data was developed, a list of adaptation measures and samples of typical buildings were compiled (individual houses, collective housing, tertiary buildings) by considering different periods of construction. Performance criteria have been defined to assess the effectiveness of the various adaptation solutions proposed. These criteria concern the risks of overheating, taking into account the notion of adaptive comfort, but also the environmental performance assessed by life cycle assessment (including the possible effects of adaptation measures on heating and air conditioning needs). The objective is thus to evaluate the adaptation measures by different indicators, for example: degree-hours of discomfort, CO₂ balance, LCA indicators concerning health, biodiversity and resources, costs.

The results of these assessments, which depend on the type of building, the climate considered and the behavior of the occupants, are disseminated among project owners, technical design offices, administration in charge of building regulation, researchers and other organizations concerned by these subjects. The prospective climatic data developed within the framework of this project are disseminated to users of dynamic thermal simulation tools. The knowledge acquired during this project can guide public policies aimed at improving the resilience of buildings to heat waves.

1. Contexte du projet

1.1. Contexte et enjeux scientifiques et techniques

Le changement climatique impose d'adapter les bâtiments pour assurer un niveau de confort suffisant durant des périodes de canicule de plus en plus sévères. L'enjeu est de parvenir à cet objectif à moindre coût et à moindre impact environnemental, en construction neuve mais surtout en ce qui concerne le parc existant.

Si les préoccupations liées au confort constituent la base de la conception bioclimatique depuis de nombreuses années, la prise en compte spécifique du changement climatique est plus récente. Quelques études ont pris en compte les effets de canicule en se basant sur l'épisode de 2003 (Peuportier et al., 2004 et 2009). L'une visait à savoir si la réhabilitation thermique risque de nuire au confort d'été, crainte encore répandue aujourd'hui mais non fondée dans le cas étudié. La deuxième a abordé le confort en période de canicule dans le cas de maisons neuves énergétiquement très performantes, et a conduit à augmenter l'inertie thermique des maisons (qui sont équipées d'un puits climatique).

Ce n'est qu'ensuite que des projections climatiques ont été utilisées pour alimenter des outils de simulation thermique et étudier l'adaptation des bâtiments dans différents pays. Les principales activités de recherche associées sont l'élaboration de données climatiques appropriées, l'étude de l'impact du changement climatique sur les bâtiments, et l'évaluation des performances des solutions proposées par des indicateurs adaptés (de Wilde and Coley, 2012).

1.1.1. Élaboration de données climatiques appropriées

Etudier l'adaptation des bâtiments au changement climatique nécessite de disposer de données appropriées (Guan, 2009). Les outils de simulation thermique dynamique utilisent des données sur une année au pas de temps horaire : température, radiation solaire, vent, humidité... Il ne suffit donc pas de connaître l'augmentation de température en moyenne annuelle.

Deux approches sont possibles :

- Utiliser des modèles de projections climatiques complexes permettant de créer des séries longues, et reconstruire, à partir de la série longue obtenue, une année type ;
- Appliquer des techniques de « morphing » à une météorologie type actuelle pour la modéliser avec des caractéristiques de la météorologie future.

Si la première approche est la plus complète (p. ex. prise en compte de la variabilité interannuelle), il est difficile d'avoir accès à de telles séries longues, et correspondant à la station souhaitée. Pour ces raisons, l'approche par « morphing » a été développée, et la technique la plus couramment utilisée pour produire des données météorologiques pour la simulation thermique des bâtiments, est celle issue des travaux de (Belcher et al. 2005). Elle a été appliquée dans diverses régions (Crawley, 2008) (Chan, 2011) et pour la conception de bâtiments zéro énergie (Robert, 2012) : des séries d'années consécutives ont été générées par cette méthode de manière à pouvoir étudier des équipements géothermiques en prenant en compte la variation de température du sol. Une approche probabiliste a également été menée, sur la base

d'un jeu de données fourni par le service météorologique britannique (Kershaw, 2011) (Jenkins, 2015). Ce jeu de données comporte pour chaque localisation (correspondant à une grille de 5 km x 5 km), des données pour 3 scénarios d'émission de CO₂ (bas, moyen et élevé) et 30 années (Jenkins, 2011). Certaines études ont par ailleurs intégré l'effet d'îlot de chaleur urbain (Mavrogianni, 2011) (Tomlinson, 2011), qui pourrait induire une élévation de température maximale de 3 à 10°C par exemple aux Pays Bas (Albers, 2015). Des méthodes plus simples basées sur les degrés-heures ont été proposées, par exemple (Cox, 2015) mais elles sont adaptées uniquement à l'étude des effets sur les besoins de chauffage et de climatisation, et non sur les risques de surchauffe.

1.1.2. Etude de l'impact du changement climatique sur les bâtiments

De nombreux travaux ont concerné l'impact du changement climatique en termes de besoins de chauffage et de climatisation par exemple en Suisse (Frank, 2005), en Grande Bretagne (Collins, 2010) (Kolokotroni, 2012), en Australie (Wang, 2010), aux Emirats Arabes Unis (Radhi, 2009) et en Chine (Wan, 2011).

Nous nous intéressons ici à l'impact en termes de risque de surchauffe. La simulation numérique est alors utilisée pour étudier un échantillon de bâtiments en considérant des projections climatiques pour un contexte donné, par exemple en Grande Bretagne où le nombre d'heures au-delà de 28°C passe, dans les cas étudiés, de 50 ou 100 dans le climat des années 1980 à plus de 500 en 2080 (Holmes, 2007). Des archétypes sont en général définis pour représenter un parc de bâtiments (Mavrogianni, 2012).

Certains travaux se sont concentrés sur des types particuliers de bâtiments comme les écoles (Jenkins, 2009) ou les hôpitaux (Lomas, 2009) ce qui pose le problème de la définition de normes de confort adaptatif pour des populations à risque.

L'évaluation de profils de température requiert la mise en œuvre de modèles plus précis que l'évaluation de consommations énergétiques. La comparaison de modèles a alors montré que des outils trop simplifiés (par exemple le calcul de la réglementation thermique basé sur une constante de temps) s'écartent significativement des outils validés (Millet, 2011).

1.1.3. Evaluation des performances des solutions proposées par des indicateurs adaptés

L'étape de constat est logiquement suivie par l'étude de solutions. Les actions proposées (Gupta, 2009) peuvent concerner le microclimat (arbres, végétalisation des façades ou toitures...), l'enveloppe (protections solaires, isolation, revêtements), la ventilation (sur-ventilation nocturne, puits climatiques), les systèmes (brasseurs d'air, rafraîchissement, climatisation) ou les occupants (limitation des apports internes).

Les différentes solutions sont évaluées par des indicateurs selon leurs finalités techniques et/ou socio-économique. D'un point de vue technique, il est possible de quantifier par exemple le nombre d'heures de surchauffe, celle-ci étant définie par rapport à une température fixe, par exemple 28°C (Porrit, 2012) ou selon une approche de confort adaptatif (van Hooff, 2014). Des indices de performance sont également proposés pour des référentiels de certification (Pyke, 2012). D'un point de vue socio-

économique, les performances sont évaluées au regard des coûts d'investissement et de fonctionnement par rapport aux bénéfices attendus (De Perthuis et al., 2010). Ce ratio dépend toutefois de logiques quantitatives mais aussi de choix strictement subjectifs qu'il convient d'estimer. Ainsi, une étude a concerné l'acceptabilité des mesures d'adaptation au changement climatique dans les logements sociaux (Rodgers, 2015). L'implication des habitants est par ailleurs essentielle en ce qui concerne l'usage des protections solaires et la ventilation naturelle (ouverture des fenêtres) car les dispositifs automatisés sont rarement mis en œuvre. Le rôle de l'inertie thermique est étudié, montrant l'intérêt d'éléments massifs pour réduire le pic diurne mais la limite liée à une réduction plus lente de la température (Kendrick, 2011), (van Hooff, 2014). Selon (Gromke, 2015), la mise en œuvre locale de toitures végétalisées n'a que peu d'influence. La possibilité de rafraîchir les surfaces de voiries en été pour stocker la chaleur dans le sol et l'utiliser l'hiver est mentionnée (Albers, 2015)¹. L'usage de toitures et de revêtements routiers réfléchissants a été étudié par (Akbari, 2012), (Synnefa, 2012). Le rafraîchissement évaporatif est parfois proposé (Smith, 2011), (Maillard et al., 2014), (Montazeri, 2015), (Pomianowski, 2015).

Il serait utile de revisiter ces travaux dans un contexte français, en utilisant des données climatiques appropriées et en prenant en compte les spécificités technologiques, architecturales et comportementales. L'enjeu est d'autre part d'intégrer les aspects environnementaux, cf. le § 1.3 ci-dessous. Il s'agit enfin de diffuser les résultats auprès des concepteurs dans le domaine de la construction neuve mais aussi, et surtout, de la réhabilitation (cf. le § 1.2 ci-dessous).

1.2. Contexte et enjeux socio-économiques

Les risques de surchauffe dans les bâtiments induisent des coûts très élevés liés aux atteintes à la santé d'une part, et à la baisse de productivité d'autre part. Le coût de la canicule de 2003 en termes de vies humaines perdues a été estimé à 500 millions d'euros (ONERC, 2009), mais la protection des personnes dépasse bien entendu cet aspect économique. Par ailleurs le coût lié à la baisse de productivité liées aux canicules dans les bureaux non climatisés pourrait atteindre plusieurs centaines de millions d'euros aux Pays Bas (Albers, 2015). L'estimation de ce coût selon (Costa, 2016) est encore plus importante : 2 milliards d'euros pour Londres et 2.5 milliards pour Bilbao. Les collectivités sont sensibilisées, quelques solutions sont envisagées comme la végétalisation des cours d'école ou l'utilisation de la fraîcheur du sous-sol (Mairie de Paris, 2017) mais des stratégies plus exhaustives seraient nécessaires.

Les décideurs sont ainsi fortement mobilisés par ces aspects de confort et de santé, d'où l'utilité de leur proposer un service approprié basé sur la simulation numérique, sous la forme par exemple d'un diagnostic canicule. La mise à disposition de données climatiques adaptées dans un environnement logiciel convivial permet de réduire les coûts. Le chaînage à l'analyse de cycle de vie a pour objectif d'éviter le transfert d'impacts environnementaux. Le champ d'application couvre à la fois la construction neuve et la réhabilitation. Les projets neufs étant déjà modélisés pour les calculs

¹ Cf. également la technologie POWER ROAD, développée par EUROVIA, qui contribue à stocker l'énergie absorbée par les voiries pour les restituer aux bâtiments et infrastructures environnants via un système de pompes à chaleur : <https://www.power-road.com/>

réglementaires, la mise en œuvre de la simulation pour un diagnostic canicule ne nécessiterait qu'un temps d'étude très limité.

1.3. Contexte et enjeux environnementaux

L'une des limites des travaux précédents concerne l'intégration des enjeux environnementaux. Ces travaux ont évalué la pertinence des mesures d'amélioration thermique en termes de niveau de confort thermique sans généralement évaluer de possibles effets négatifs sur l'environnement. Les impacts liés à la fabrication des matériaux (isolation et inertie thermique) ont été pris en compte par (Hacker, 2008) et (Williams, 2012), mais seulement pour les gaz à effet de serre. Or les enjeux environnementaux sont beaucoup plus vastes, incluant les aspects de ressources, de biodiversité et de santé. Réduire les risques de surchauffe correspond à un objectif de santé publique, il serait alors logique d'évaluer un bilan sur le cycle de vie du bâtiment considéré.

Il a été montré qu'au-delà d'une certaine épaisseur d'isolant, les émissions de CO₂ sur le cycle de vie d'un bâtiment augmentent (Peuportier, 2002), l'étude incluant une dizaine d'autres indicateurs environnementaux. La réduction des impacts sur la santé par des mesures d'efficacité énergétique est généralement moindre, en valeur relative, que la réduction des consommations et des émissions de gaz à effet de serre comme le montre (Peuportier, 2009) sur un exemple de maisons passives.

Il convient donc d'évaluer des indicateurs environnementaux plus complets que le simple bilan carbone, cf. par exemple les indicateurs d'analyse de cycle de vie proposés par (Huijbregts, 2016) et (Jolliet, 2015).

2. État de l'art et principaux choix méthodologiques

Des archétypes sont définis pour étudier la résilience de bâtiments représentatifs du parc métropolitain, ainsi qu'une liste de mesures d'adaptation au changement climatique et des indicateurs de performance (confort hygrothermique, performance économique et environnementale). Des données climatiques prospectives sont élaborées à l'horizon moitié et fin de siècle. Des simulations thermiques sont effectuées pour évaluer les indicateurs de confort. Les autres indicateurs sont évalués par analyse de cycle de vie (performance environnementale) et par évaluation économique. Des mesures in situ sont collectées pour compléter les évaluations théoriques. Les résultats sont diffusés sous la forme de recommandations, de formation, et de communications lors de conférences.

Le projet est ainsi organisé en sept tâches principales :

- Etat de l'art et principaux choix méthodologiques,
- Mesures in situ,
- Elaboration de données climatiques prospectives,
- Simulations thermo-aérauliques dynamiques (STD),
- Analyses de cycle de vie (ACV),
- Evaluations économiques,
- Diffusion des résultats.

2.1. Etat de l'art

Le changement climatique impose d'adapter les bâtiments pour assurer un niveau de confort suffisant durant des périodes de canicule de plus en plus sévères. L'enjeu est de parvenir à cet objectif à moindre coût et à moindre impact environnemental, en construction neuve mais surtout en ce qui concerne le parc existant.

Si les préoccupations liées au confort constituent la base de la conception bioclimatique depuis de nombreuses années, la prise en compte spécifique du changement climatique est plus récente. Quelques études ont pris en compte les effets de canicule en se basant sur l'épisode de 2003 (Peuportier et al., 2004 et 2009). L'une visait à savoir si la réhabilitation thermique risque de nuire au confort d'été, crainte encore répandue aujourd'hui mais non fondée dans le cas étudié. La deuxième a abordé le confort en période de canicule dans le cas de maisons neuves énergétiquement très performantes, et a conduit à augmenter l'inertie thermique des maisons (qui sont équipées d'un puits climatique).

Ce n'est qu'ensuite que des projections climatiques ont été utilisées pour alimenter des outils de simulation thermique et étudier l'adaptation des bâtiments dans différents pays. Les principales activités de recherche associées sont l'élaboration de données climatiques appropriées, l'étude de l'impact du changement climatique sur les bâtiments, et l'évaluation des performances des solutions proposées par des indicateurs adaptés (de Wilde and Coley, 2012).

2.1.1. Données climatiques

Etudier l'adaptation des bâtiments au changement climatique nécessite de disposer de données appropriées (Guan, 2009). Les outils de simulation thermique dynamique utilisent des données sur une année au pas de temps horaire : température, radiation solaire, vent, humidité... Il ne suffit donc pas de connaître l'augmentation de température en moyenne annuelle.

Deux approches sont possibles :

- Utiliser des modèles de projections climatiques complexes permettant de créer des séries longues, et reconstruire, à partir de la série longue obtenue, une année type ;

- Appliquer des techniques de « morphing » à une météorologie type actuelle pour la modéliser avec des caractéristiques de la météorologie future.

Si la première approche est la plus complète (p. ex. prise en compte de la variabilité interannuelle), il est difficile d'avoir accès à de telles séries longues, et correspondant à la station souhaitée. Pour ces raisons, l'approche par « morphing » a été développée, et la technique la plus couramment utilisée pour produire des données météorologiques pour la simulation thermique des bâtiments, est celle issue des travaux de (Belcher et al. 2005). Elle a été appliquée dans diverses régions (Crawley, 2008) (Chan, 2011) et pour la conception de bâtiments zéro énergie (Robert, 2012) : des séries d'années consécutives ont été générées par cette méthode de manière à pouvoir étudier des équipements géothermiques en prenant en compte la variation de température du sol. Une approche probabiliste a également été menée, sur la base d'un jeu de données fourni par le service météorologique britannique (Kershaw, 2011) (Jenkins, 2015). Ce jeu de données comporte pour chaque localisation (correspondant à une grille de 5 km x 5 km), des données pour 3 scénarios d'émission de CO₂ (bas, moyen et élevé) et 30 années (Jenkins, 2011). Certaines études ont par ailleurs intégré l'effet d'îlot de chaleur urbain (Mavrogianni, 2011) (Tomlinson, 2011), qui pourrait induire une élévation de température maximale de 3 à 10°C par exemple aux Pays Bas (Albers, 2015). Des méthodes plus simples basées sur les degrés-heures ont été proposées, par exemple (Cox, 2015) mais elles sont adaptées uniquement à l'étude des effets sur les besoins de chauffage et de climatisation, et non sur les risques de surchauffe.

2.1.1.1. Interaction entre climat urbaine et tendances climatique

La ville modifie l'environnement local par une artificialisation importante des sols naturels et une morphologie complexe altérant les échanges radiatifs, énergétiques, hydriques et aérauliques (Oke et al. 2017). Le climat urbain qui en résulte, notamment l'îlot de chaleur urbain (ICU), entraîne une modification des conditions environnementales en ville. Ces processus de surface urbains sont gouvernés par les caractéristiques de la canopée urbaine mais aussi par les conditions atmosphériques et leurs variabilités sur des échelles de temps court (de quelques heures à quelques jours). Inversement, ces processus peuvent influencer la dynamique atmosphérique, avec des répercussions sur la météorologie locale (Lemonsu et al. 2002, Varentsov et al. 2018). Par conséquent, dans un contexte de changement climatique, on peut s'attendre en milieu urbain à des interactions locales entre les tendances régionales des évolutions climatiques et le climat urbain déjà inhérent aux villes actuelles (Daniel et al. 2019).

2.1.1.2. Limites des projections climatiques pour les études d'impacts

Le climat et son évolution sont simulés par des modèles de circulation générale qui couvrent la totalité du globe avec des résolutions horizontales de l'ordre de 100 à 150 km. Ces modèles alimentent des modèles de climat régionaux qui permettent de zoomer sur des zones d'intérêt jusqu'à des résolutions horizontales 10-50km (Figure 2.1). Ces modèles présentent l'intérêt de pouvoir étudier les tendances régionales du changement climatique, et certains impacts, grâce à des paramétrisations physiques plus adaptées à la résolution des processus physiques et dynamiques et à une meilleure description des caractéristiques géographiques (occupation du sol, topographie, hydrographie etc.). Néanmoins, pour les études urbaines, ces modèles de climat régionaux présentent deux limites majeures : (1) les résolutions spatiales des projections climatiques restent insuffisantes pour l'étude de la ville ; et (2) ces modèles ne traitent pas les processus de surface liés aux zones urbaines et donc leurs rétroactions potentielles sur le climat local. Ces limites nécessitent la mise en œuvre de méthodes de descente d'échelle spécifiques aux problématiques urbaines (Masson et al. 2020).

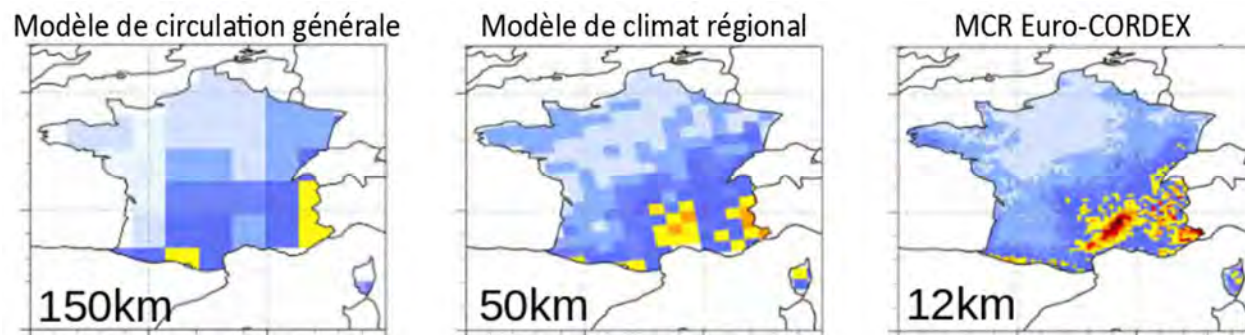


Figure 2.1 : Comparaison des résolutions spatiales atteintes aujourd'hui par les modèles de climat.

2.1.1.3. Différentes méthodes de descente d'échelle

Différentes approches permettent de décliner une information issue de projections climatiques globales à une résolution spatiale plus fine :

1. La descente d'échelle dynamique consiste en une chaîne de modélisation emboîtant des modèles de climat de résolutions spatiales de plus en plus fines. Elle présente l'intérêt d'une approche à base physique qui résout les processus régionaux et locaux par des paramétrisations physiques et dynamiques adaptées mais reste coûteuse en temps de calcul (Kusaka et al. 2012, Argüeso et al. 2015, Kim et al. 2016). Des études sont menées aujourd'hui avec ce type de modèles jusqu'à des résolutions spatiales de l'ordre de 2 à 4 km sur les villes. En particulier au CNRM, le modèle de climat AROME (2.5 km de résolution) est utilisé depuis quelques années pour étudier les villes françaises (Lemonsu et al. 2019).

2. Les techniques statistiques ou statistico-dynamiques sont des alternatives intéressantes, plus économiques pour produire des forçages climatiques à haute résolution et alimenter des modèles de micro-climat urbain (ou plus largement des modèles urbains d'impacts) sans couplage avec un modèle climatique complet. Il s'agit d'établir sur une période d'apprentissage, en climat présent et pour laquelle on dispose de données, un lien statistique entre un signal climatique de grande échelle et des conditions climatiques locales. Le modèle statistique est appliqué aux projections climatiques régionales pour reconstruire des champs locaux à plus haute résolution en climat futur (Maurer et al. 2007, Maraun et al. 2010, Hatchett et al. 2016, Ariso et al. 2018). Pour la ville, des approches ont récemment été développées pour intégrer l'effet de l'ICU dans les forçages climatiques en tenant compte de la variabilité spatiale et temporelle du phénomène selon les conditions synoptiques (Hoffmann et al. 2018, Duchêne et al. 2020, Schoetter et al. 2020, Le Roy et al. 2021).

2.1.2. Evaluation de l'impact du changement climatique sur les bâtiments

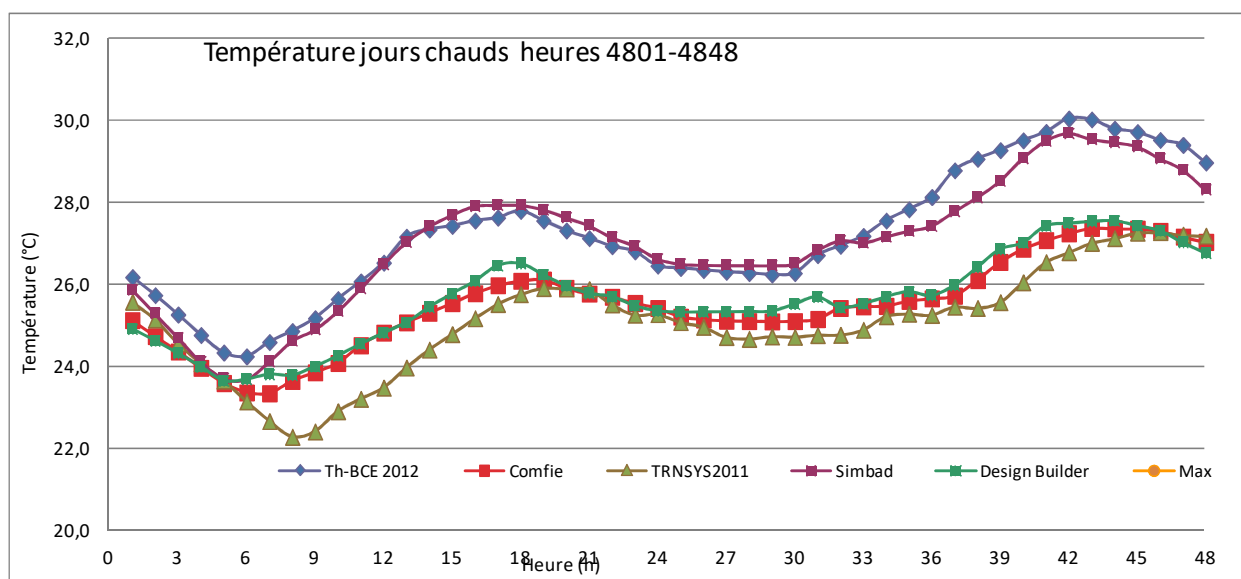
2.1.2.1. Impacts sur le comportement thermique des bâtiments

De nombreux travaux ont concerné l'impact du changement climatique en termes de besoins de chauffage et de climatisation par exemple en Suisse (Frank, 2005), en Grande Bretagne (Collins, 2010) (Kolokotroni, 2012), en Australie (Wang, 2010), aux Emirats Arabes Unis (Radhi, 2009) et en Chine (Wan, 2011).

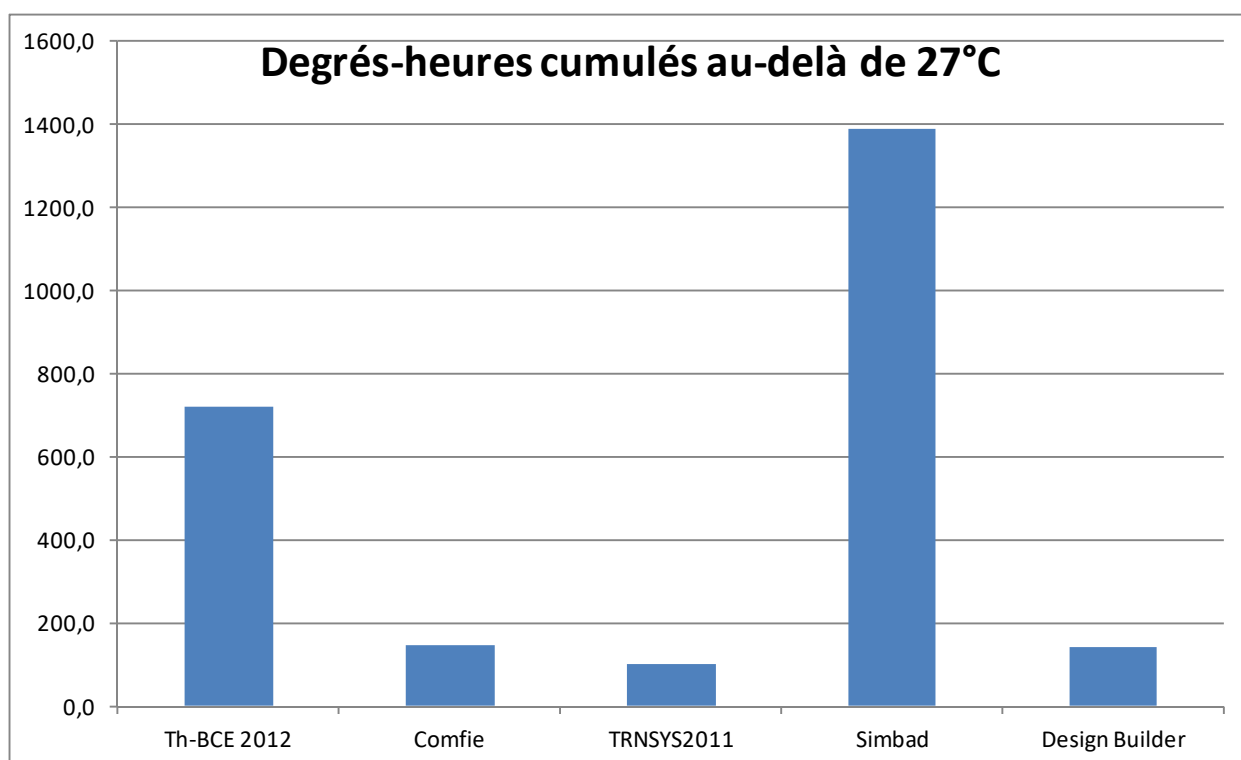
Nous nous intéressons ici à l'impact en termes de risque de surchauffe. La simulation numérique est alors utilisée pour étudier un échantillon de bâtiments en considérant des projections climatiques pour un contexte donné, par exemple en Grande Bretagne où le nombre d'heures au-delà de 28°C passe, dans les cas étudiés, de 50 ou 100 dans le climat des années 1980 à plus de 500 en 2080 (Holmes, 2007). Des archétypes sont en général définis pour représenter un parc de bâtiments (Mavrogianni, 2012).

Certains travaux se sont concentrés sur des types particuliers de bâtiments comme les écoles (Jenkins, 2009) ou les hôpitaux (Lomas, 2009) ce qui pose le problème de la définition de normes de confort adaptatif pour des populations à risque.

L'évaluation de profils de température requiert la mise en œuvre de modèles plus précis que l'évaluation de consommations énergétiques. La comparaison de modèles a alors montré que des outils trop simplifiés (par exemple le calcul de la réglementation thermique basé sur une constante de temps) s'écartent significativement des outils validés (Millet, 2011).

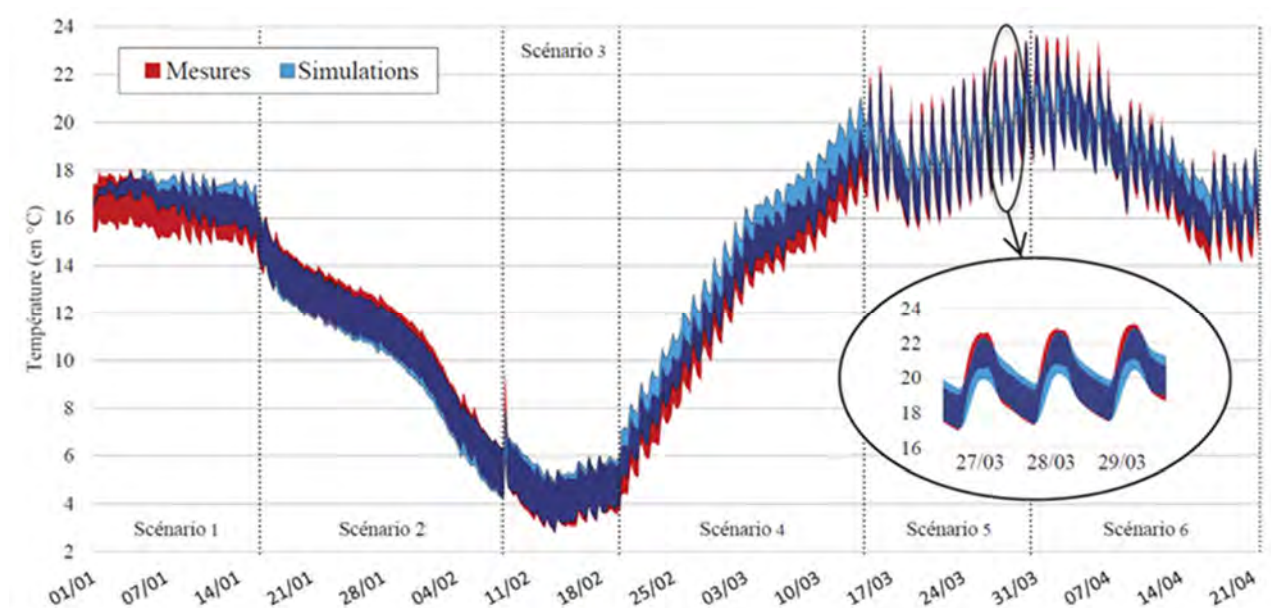


Profil de température, maison INCAS double mur (2 jours d'été)



Comparaison de l'évaluation des surchauffes cumulées obtenues par différents modèles

Au-delà de l'inter-comparaison de modèles, une validation expérimentale a été menée dans le cadre du projet ANR Fiabilité en prenant en compte les incertitudes sur les mesures et les simulations (Spitz, 2012 et Munaretto, 2017).



Comparaison entre simulation (Pleiades STD Comfie) et mesures sur une période incluant plusieurs scénarios de fonctionnement (chauffage, occultations)

Des outils de simulation détaillés seront donc utilisés dans le cadre de ce projet.

2.1.2.2.Impacts économiques

Les risques de surchauffe dans les bâtiments induisent des coûts très élevés liés aux atteintes à la santé d'une part, et à la baisse de productivité d'autre part. Le coût de la canicule de 2003 en termes de vies humaines perdues a été estimé à 500 millions d'euros (ONERC, 2009), mais la protection des personnes dépasse bien entendu cet aspect économique. Par ailleurs le coût lié à la baisse de productivité liées aux canicules dans les bureaux non climatisés pourrait atteindre plusieurs centaines de millions d'euros aux Pays Bas (Albers, 2015). L'estimation de ce coût selon (Costa, 2016) est encore plus importante : 2 milliards d'euros pour Londres et 2.5 milliards pour Bilbao. Les collectivités sont sensibilisées, quelques solutions sont envisagées comme la végétalisation des cours d'école ou l'utilisation de la fraîcheur du sous-sol (Mairie de Paris, 2017) mais des stratégies plus exhaustives seraient nécessaires.

2.1.3. Indicateurs de performance

2.1.3.1.Performance thermique des solutions proposées

L'étape de constat est logiquement suivie par l'étude de solutions. Les actions proposées (Gupta, 2009) peuvent concerner le microclimat (arbres, végétalisation des façades ou toitures...), l'enveloppe (protections solaires, isolation, revêtements), la ventilation (sur-ventilation nocturne, puits climatiques), les systèmes (brasseurs d'air, rafraîchissement, climatisation) ou les occupants (limitation des apports internes).

Les différentes solutions sont évaluées par des indicateurs selon leurs finalités techniques et/ou socio-économique. D'un point de vue technique, il est possible de quantifier par exemple le nombre d'heures de surchauffe, celle-ci étant définie par rapport à une température fixe, par exemple 28°C (Porrit, 2012) ou selon une approche de confort adaptatif (van Hooff, 2014). Des indices de performance sont également proposés pour des référentiels de certification (Pyke, 2012).

Le changement climatique induit, entre autre, une élévation statistique des températures, mais la notion de confort, ressenti par les occupants, est plus complexe. On s'appuiera sur des approches comme le confort adaptatif ou des résultats empiriques issus des travaux de Fanger (ISO, 2005) ou de (Givoni, 1992).

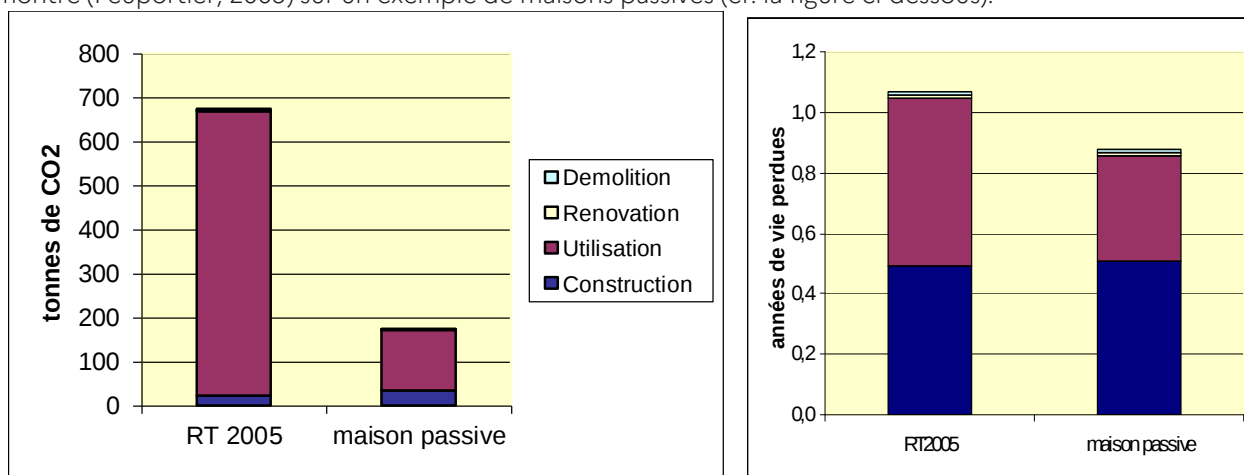
Le rôle de l'inertie thermique est étudié, montrant l'intérêt d'éléments massifs pour réduire le pic diurne mais la limite liée à une réduction plus lente de la température (Kendrick, 2011), (van Hooff, 2014). Selon (Gromke, 2015), la mise en œuvre locale de toitures végétalisées n'a que peu d'influence. La possibilité de rafraîchir les surfaces de voiries en été pour stocker la chaleur dans le sol et l'utiliser l'hiver est mentionnée (Albers, 2015). L'usage de toitures et de revêtements routiers réfléchissants a été étudié par (Akbari, 2012), (Synnefa, 2012). Le rafraîchissement évaporatif est parfois proposé (Smith, 2011), (Maillard et al., 2014), (Montazeri, 2015), (Pomianowski, 2015).

L'efficacité des mesures d'adaptation dépend largement du comportement des occupants, en particulier en ce qui concerne l'utilisation des protections solaires, l'ouverture de fenêtres, le nombre de personnes présentes dans les locaux et l'usage d'appareils électriques ou de cuisson générant des apports internes. Les travaux de (Vorger, 2014) constitueront une base de travail pour tenir compte de ces aspects comportementaux, des collaborations avec des sociologues étant menées dans un autre cadre (chaire écoconception des ensembles bâtis et des infrastructures, cf. Peuportier et al., 2019).

2.1.3.2. Performance environnementale

Dans les différentes études réalisées sur la résilience des bâtiments, les impacts liés à la fabrication des matériaux (isolation et inertie thermique) ont été pris en compte par (Hacker, 2008) et (Williams, 2012), mais seulement pour les gaz à effet de serre. Or les enjeux environnementaux sont beaucoup plus vastes, incluant les aspects de ressources, de biodiversité et de santé. Réduire les risques de surchauffe correspond à un objectif de santé publique, il serait alors logique d'intégrer un indicateur de santé dans l'analyse de cycle de vie du bâtiment considéré.

Il a été montré qu'au-delà d'une certaine épaisseur d'isolant, les émissions de CO₂ sur le cycle de vie d'un bâtiment augmentent (Peuportier, 2002), l'étude incluant une dizaine d'autres indicateurs environnementaux. La réduction des impacts sur la santé par des mesures d'efficacité énergétique est généralement moindre, en valeur relative, que la réduction des consommations et des émissions de gaz à effet de serre comme le montre (Peuportier, 2009) sur un exemple de maisons passives (cf. la figure ci-dessous).

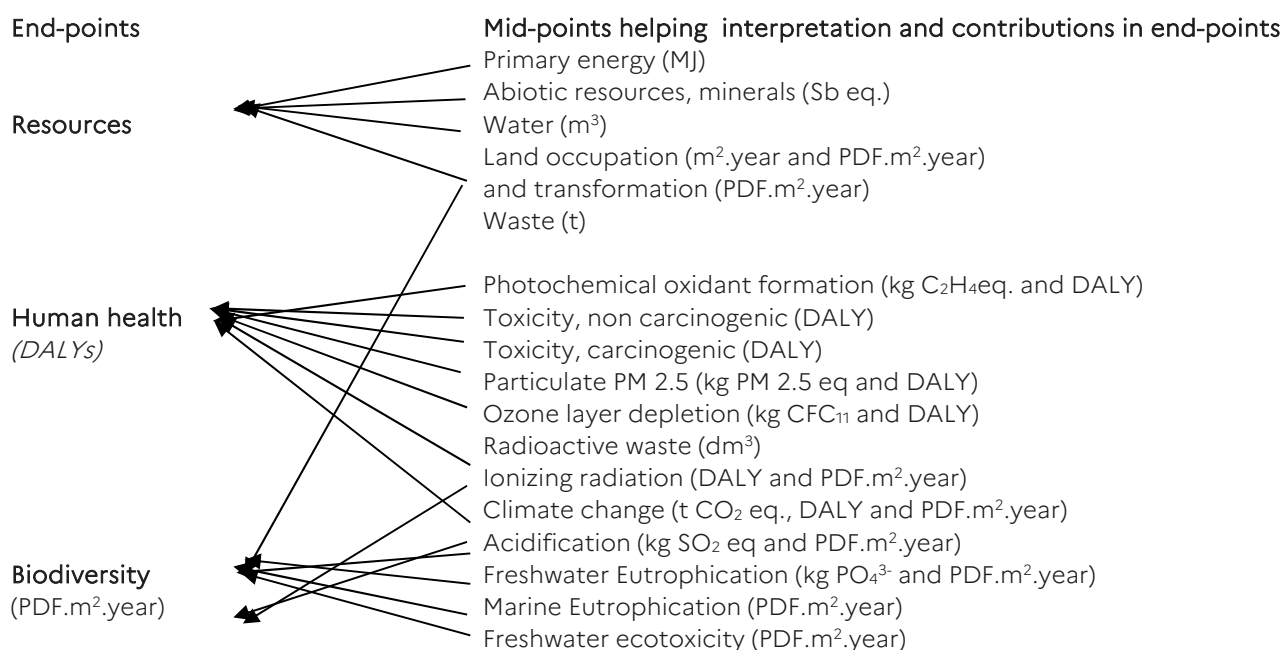


Comparaison des impacts d'une maison passive et d'une variante réglementaire

Il convient donc d'évaluer des indicateurs environnementaux plus complets que le simple bilan carbone, cf. par exemple les indicateurs d'analyse de cycle de vie proposés par (Huijbregts, 2016) et (Jolliet, 2015). Certains indicateurs d'analyse de cycle de vie, en particulier concernant la santé et la biodiversité, font l'objet de recherches au niveau international et il est utile de suivre l'évolution de ces travaux afin de tenir compte des avancées dans ce domaine. Le CES est partenaire de l'annexe 72 du programme « Energy in Buildings and

Communities » de l'Agence Internationale de l'Energie, ayant pour objet l'évaluation des impacts environnementaux liés au cycle de vie des bâtiments. D'autre part, un séminaire international est organisé dans le cadre de la chaire. Trois journées ont déjà été organisées avec des experts internationaux dans ce domaine (CML aux Pays Bas, Université du Québec, TREEZE en Suisse, KTH en Suède, IRTA en Espagne).

Les deux principales méthodes d'évaluation des impacts environnementaux au niveau international sont Recipe (Huijbregts, 2016) et Impact World+ (Bulle, 2019). A partir d'un inventaire de cycle de vie comportant plusieurs milliers de flux élémentaires (quantités de substances émises ou puisées dans l'environnement), des indicateurs d'effets (« mid point », par exemple changement climatique, acidification) puis de dommages (« end points ») sont évalués. Les dommages sont classés en trois grands domaines : la santé humaine, la biodiversité (dommages aux écosystèmes) et les ressources. Plusieurs effets intermédiaires contribuent aux dommages : par exemple le changement climatique, les émissions de substances toxiques contribuent aux dommages sur la santé. Le graphe ci-dessous montre ces relations.



Indicateurs considérés en ACV, liens entre effets et dommages

Le changement climatique influence les besoins de chauffage et de climatisation des bâtiments, mais aussi la production d'électricité, en particulier la disponibilité des ressources hydrauliques, ce qui peut modifier le mix de production et par voie de conséquence les impacts environnementaux (Roux, 2016). Une modélisation du système électrique appropriée à l'ACV est alors mise en œuvre (ADEME, 2020).

2.1.3.3.Aspects socio-économiques

D'un point de vue socio-économique, les performances sont évaluées au regard des coûts d'investissement et de fonctionnement par rapport aux bénéfices attendus (De Perthuis et al., 2010). Ce ratio dépend toutefois de logiques quantitatives mais aussi de choix strictement subjectifs qu'il convient d'estimer. Ainsi, une étude a concerné l'acceptabilité des mesures d'adaptation au changement climatique dans les logements sociaux (Rodgers, 2015). L'implication des habitants est par ailleurs essentielle en ce qui concerne l'usage des protections solaires et la ventilation naturelle (ouverture des fenêtres) car les dispositifs automatisés sont rarement mis en œuvre.

2.2.Méthodologie pour l'élaboration de données climatiques prospectives

Pour le projet RESILIANCE, l'objectif est de fournir des conditions de forçages climatiques pour alimenter les simulations de bâtiments. Les principaux critères et les contraintes :

- Etude de deux villes françaises situées dans des environnements géographiques différents et soumises à des contraintes climatiques différentes : le choix se porte sur Paris et probablement Nîmes (ville du sud-est de la France soumise à un réchauffement marqué)
- Prise en compte des tendances climatiques régionales pour les deux villes d'intérêt et cela, si possible, pour deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre RCP4.5 et RCP8.5, et deux périodes de temps 2050 et 2100
- Prise en compte des effets micro-climatiques urbains, principalement, combinée au signal climatique, i.e. l'effet de surchauffe en ville liée au phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) et le ralentissement du vent par les bâtiments près de la surface
- Elaboration des forçages au pas de temps horaire, la résolution temporelle adaptée aux simulations de bâtiment

On s'appuie sur les travaux menés au CNRM sur cette thématique, en envisageant deux stratégies différentes de descente d'échelle statistico-dynamique et dynamique.

2.2.1. Deux méthodes pour la construction des forçages climatiques

2.2.1.1. Descente d'échelle statistico-dynamique sur Paris

Dans sa thèse, Benjamin Le Roy propose une méthode de descente d'échelle statistico-dynamique, testée sur la région parisienne, pour combiner les tendances climatiques régionales avec l'effet thermique de la ville sur son environnement local (Le Roy et al. 2021). La méthode repose sur le postulat que le phénomène d'îlot de chaleur urbain varie quotidiennement, en intensité et en structure spatiale sur la ville, en fonction des conditions météorologiques locales

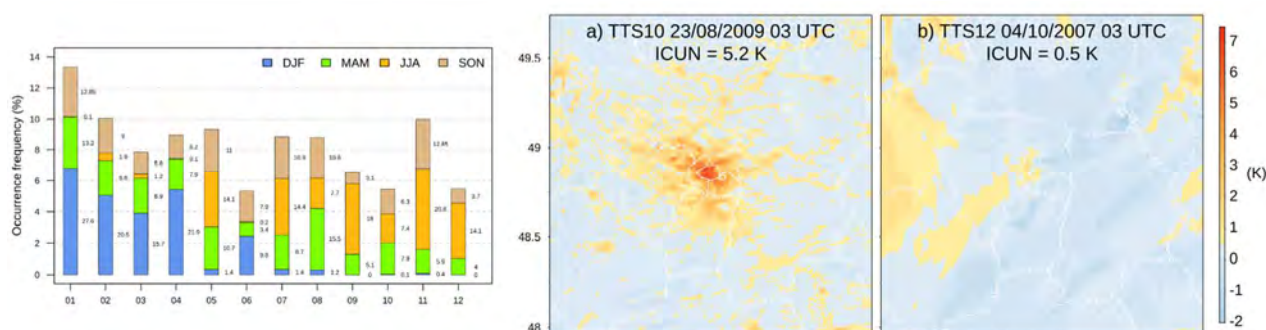


Figure 3.1 : A gauche : fréquences d'occurrence par saison des 12 type de temps spécifiques (TTS) identifiés sur la région parisienne. A droite : exemple d'ICU associés à deux journées correspondant à deux TTS différents.

Ainsi, une classification en types de temps (ou situations météorologiques) spécifiques du climat local est d'abord établie pour la ville étudiée (Figure 3.1 gauche, Hidalgo et Jouglu 2018). Pour chaque type de temps et chaque saison, plusieurs événements météorologiques passés et représentatifs sont simulés avec le modèle météorologique Meso-NH couplé au modèle urbain TEB afin de déterminer la réponse du climat urbain et de l'ICU à haute résolution (Figure 3.1 droite, Schoetter et al. 2020). Cette climatologie de référence permet ainsi de corriger jour à jour les projections climatiques à plus basse résolution, en rajoutant dans les forçages atmosphériques le signal urbain correspondant au type de temps du jour donné. Cette méthode a été appliquée aux projections climatiques, fournies par les modèles de climat régionaux du programme EURO-CORDEX (0,11° de résolution, ~12.5 km), pour la période 1976-2100 en scénarios RCP8.5, permettant ainsi d'alimenter différents modèles d'impacts en milieu urbain.

Les avantages de cette approche sont :

- Cas parisien : La méthode a été développée, évaluée et mise en œuvre pour la région parisienne, les données sont donc disponibles et de confiance.

- Résolution spatiale : La descente d'échelle permet de représenter des forçages à 1 km de résolution sur Paris. On peut donc sélectionner une typologie urbaine et une zone précises : par ex. on dissocie le centre historique des quartiers de la petite couronne, où l'effet d'ICU est différent.
- Version de TEB : dans cette configuration, on utilise une version très récente du modèle (Redon et al. 2017, 2020, Schoetter et al. 2020).

Les limitations : Seule la région parisienne est disponible actuellement. Néanmoins, la méthode est basée sur une approche générique permettant de l'appliquer à d'autres villes françaises. Elle est en cours de transfert sur Toulouse, La Rochelle, et Nîmes. Mais cela prend plusieurs mois pour réaliser toute la procédure.

2.2.1.2. Modélisation climatique à haute résolution sur la France

Des simulations AROME de climat régional à haute résolution ont été réalisées sur un domaine France étendue avec une résolution horizontale de 1 km dans le cadre du projet Européen EUCP (Figure 3.2, à gauche). Ces simulations intègrent le modèle urbain TEB dans sa version historique (Masson 2000) et sont donc capables de traiter les processus de surface urbains et les interactions potentielles avec le climat régional.

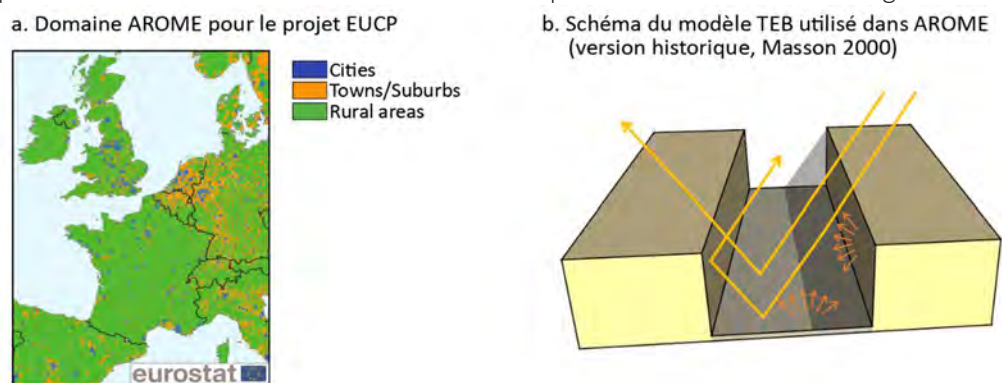


Figure 3.2 : A gauche : domaine de simulation AROME pour le projet EUCP. A droite : schéma de la version historique de TEB utilisée dans les simulations AROME pour représenter les zones urbaines.

L'avantage de cette approche est que les simulations couvrent toute la France donc permettent de sélectionner les villes d'intérêt (Figure 3.3).

Les limitations éventuelles sont :

- Résolution spatiale : Les données climatiques sont extraits d'une maille du modèle couvrant une zone de 2.5 km par 2.5 km. Par conséquent, les caractéristiques urbaines du point considéré (occupation du sol, propriétés typo-morphologies de la ville) sont assez lissées et ne permettent pas vraiment de sélectionner une zone très urbanisée versus une zone plus résidentielle par ex.
- Version de TEB : dans cette configuration, AROME utilise la version historique du modèle TEB (Figure 3.2, à droite) qui est plus rustre que les versions plus récentes utilisées par ex. dans la méthode de descente d'échelle statistico-dynamique.
- Modèle unique : dans ce contexte de descente d'échelle dynamique, on dispose d'un seul modèle de climat (AROME) selon un seul scénario d'émission RCP8.5, de sorte que l'on ne peut pas prendre en compte l'incertitude du signal climatique qui pourrait être quantifiée par la dispersion des projections climatiques d'un ensemble de modèles de climat.
- Périodes de simulation : en climat futur, les simulations AROME (très coûteuses en temps de calcul) ont été réalisées sur des périodes de 10-20 ans en continu en milieu (2040-2049) et fin de siècle (2080-2099), ce qui est un peu court pour une analyse statistique des tendances et des événements extrêmes comme les canicules.

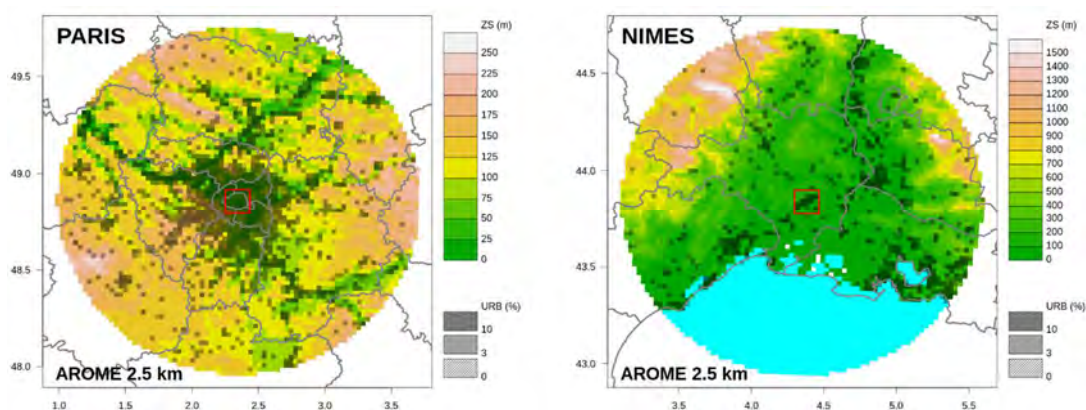


Figure 3.3 : Carte de topographie et d'occupation du sol pour la domaine de simulation AROME 2.5 km pour la région parisienne (à gauche) et la région nîmoise (à droite).

2.2.2. Mise en forme des forçages climatiques pour les simulations des bâtiments

Données disponibles par la descente d'échelle statistique : certains champs sont des données de forçage des simulations SURFEX (TEB) (tri-horaires) et d'autres sont des champs de sortie des simulations SURFEX-TEB (horaires).

Nom	Description	Unité	Fréquence
TCANYON	Température de l'air à 2 m au-dessus du sol	K	Horaire
QCANYON	Humidité spécifique à 2 m	kg / kg	Horaire
RAIN	Taux de précipitation	kg / m ² / s	Tri-horaire
TEB_CAN_U02	Vitesse du vent	m / s	Horaire
DIR_SW	Composante directe du rayonnement incident courte longueur d'onde	W / m ²	Tri-horaire
SCA_SW	Composante diffuse du rayonnement incident courte longueur d'onde	W / m ²	Tri-horaire
LW	Rayonnement incident grande longueur d'onde	W / m ²	Tri-horaire

Données disponibles dans les simulations AROME :

Nom	Description	Unité	Fréquence
tas	Température de l'air à 2 m au-dessus du sol	K	Horaire
hurs	Humidité relative à 2 m	%	Horaire
huss	Humidité spécifique à 2 m	kg / kg	Horaire
ps	Pression atmosphérique	Pa	Horaire
pr	Taux de précipitation	kg / m ² / s	Horaire
uas	Composante méridienne du vent à 10 m	m / s	Horaire
vas	Composante zonale du vent à 10 m	m / s	Horaire
rsds	Rayonnement incident courte longueur d'onde	W / m ²	Horaire
rlsds	Rayonnement incident grande longueur d'onde	W / m ²	Horaire

Dans un premier temps, on travaillera exclusivement avec les données des simulations AROME extraites sur les deux villes pour un point de grille "urbain" (central dans la ville) et pour un point de grille "rural" situé en dehors de la zone urbanisée et dans un environnement naturel supposé représentatif de la région.

Les données AROME, disponibles en sortie au pas de temps horaire (voir tableau) sont directement exploitables, pour certaines, pour les simulations de bâtiments. D'autres doivent être re-calculées :

- Pour le vent, on déterminera à partir des composantes la direction et la force du vent à 10 m. Par convention, la direction du vent est exprimée par rapport au nord (direction d'où vient le vent) et dans le sens trigonométrique.
- Pour le rayonnement global incident, on déterminera la partition en composantes du rayonnement direct et diffus à partir du modèle statistique de Erbs (1982) qui permet de calculer la fraction de rayonnement diffus à partir d'un rayonnement global théorique et de l'angle zénithal.

Trois périodes distinctes sont simulées en continu en mode "scénario" :

Historique	1986-2005
RCP8.5 milieu de siècle	2040-2049 (10 ans seulement)
RCP8.5 fin de siècle	2080-2099

2.2.3. Choix des années représentatives

Les données sont extraites dans les sorties AROME sur toute la période de simulation au pas de temps horaire. Mais l'objectif est de sélectionner une année représentative de l'évolution du climat en milieu et fin de siècle, et idéalement selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Sachant que le projet met l'accent sur le confort d'été et le stress thermique dans les bâtiments en condition de vagues de chaleur, l'analyse se basera sur l'évolution des occurrences de canicules dans le futur et de leurs caractéristiques (fréquence, durée, intensité, sévérité).

Indice de canicule STARDEX

L'indice choisi pour l'identification des canicules dans les sorties des modèles climatiques est l'indice de canicule défini dans le projet européen STARDEX (STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions, Goodess 2003), et qui est aujourd'hui très largement utilisé. Une canicule est définie par une approche climatologique. Elle est considérée comme une séquence d'au moins 6 jours consécutifs avec des températures maximales quotidiennes (TX) supérieures de 5°C minimum à la climatologie. La climatologie de TX est calculée pour chaque jour calendaire sur une période de référence (à savoir 1960-1989 sur la période historique) comme la moyenne centrée sur 5 jours.

Analyse de l'ensemble des canicules à partir des projections EURO-CORDEX

La base de données climatique EURO-CORDEX met à disposition un ensemble de projections réalisées sur l'Europe par plusieurs modèles de climat régionaux, forcés par différents modèles de circulation globale, avec une résolution horizontale de 0.11° (soit ~12.5 km). Ces projections sont disponibles sur tout le siècle et pour

différents scénarios d'émission de GES. Par conséquent, les canicules seront d'abord extraites des données EURO-CORDEX, dans le but d'étudier la plage de variabilité des fréquences et des caractéristiques pour les différentes conditions climatiques d'intérêt pour le projet.

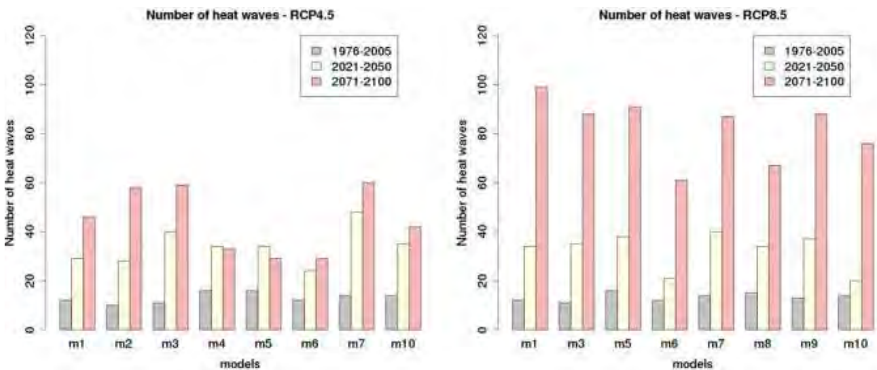


Figure 3.4 : Nombre de canicules pour les périodes 1976–2005, 2021–2050 et 2071–2100 pour 8 modèles EURO-CORDEX, selon les scénarios RCP4.5 (gauche) RCP8.5 (droite).

Analyse des canicules simulées par AROME

Les canicules seront également extraites des données AROME (pour un point non urbain situé à proximité de la ville considérée) selon le même indice STARDEX basé sur la TX. Les statistiques seront comparées à celles de l'ensemble EURO-CORDEX pour évaluer comment se place le modèle AROME par rapport à cet ensemble et pour les différentes conditions climatiques analysées. Selon les statistiques des canicules identifiées dans les simulations AROME pour chaque année, on pourra sélectionner la ou les années d'intérêt.

2.3.Elaboration d’un échantillon de bâtiments

L'objectif est d’étudier la résilience de différents types de bâtiments : maisons individuelles, immeubles de logement collectif, bureaux et bâtiments scolaires. Il est d’autre part utile de considérer différents niveaux de performance : des bâtiments anciens non isolés, et des bâtiments neufs performants.

Des bâtiments archétypes ont alors été définis pour les maisons individuelles (existant et neuf), les logements collectifs (haussmannien, années 1960 et neuf), les bureaux et les bâtiments scolaires (années 1960 et neuf), en considérant différents niveaux d’isolation thermique. Des données ont été collectées sur ces bâtiments de manière à pouvoir mettre en œuvre la simulation énergétique et l’analyse de cycle de vie.

	Maisons individuelles	Logement collectif	Bureaux	Bâtiments scolaires
Neuf, performant	Maison Comepos (2017)	Résidence Les Roches Blanches (2016)	Bureaux IZUBA (2015) + variante non isolée	
Existant	Maison Phenix (1971)	Immeuble haussmannien (1880s) HLM (1969)		Ecole à Fabrègues (1960s) Ecole à Marseille (2018)

La description de ces bâtiments est donnée en annexe.

2.4. Liste de mesures d'adaptation

Différentes mesures peuvent être envisagées pour améliorer le confort d'été dans les bâtiments existants. Celles-ci se répartissent en deux sous-groupes : les mesures passives qui ne font appel à aucune force motrice sauf de façon brève et transitoire et les systèmes actifs qui nécessitent le fonctionnement permanent d'un moteur (électrique ou mécanique).

Les solutions passives sont à privilégier car elles n'engendrent pas de consommations énergétiques en phase d'exploitation (électrique ou thermique). Mais elles ne sont pas toutes exemptes de stratégie de pilotage notamment pour les masques solaires mobiles :

- Ventilation naturelle
- Vitrages – transmission et émissivité
- Volets/stores
- Casquette
- Revêtement de faible absorptivité
- Mur végétalisé
- Isolation
- Capacité thermique du bâti
- Zonage thermique
- Orientation du logement et de ses ouvertures

Les systèmes passifs peuvent être classés en deux catégories : ceux limitant les apports de chaleur, et les solutions participant à l'évacuation du trop-plein de chaleur.

Les systèmes actifs sont les suivants :

- Refroidissement radiatif
- Ventilation mécanique
- Puits canadien
- Géo-cooling
- Rafraîchissement par évaporation
- Solaire à absorption
- Climatisation par compression
- Sondes Peltier

2.4.1. Ventilation naturelle

L'usage de la ventilation naturelle consiste à exploiter les effets du vent et du tirage thermique afin de renouveler l'air intérieur et d'évacuer la chaleur accumulée dans les éléments structurels du bâtiment au cours de la journée précédente. Elle peut être appliquée au volume habitable ou réservée dans des circulations dédiées entre le bardage extérieur et les murs. La ventilation naturelle offre un potentiel de rafraîchissement important par les masses d'air mises en circulation, particulièrement lorsqu'elle est traversante.



Figure 1 : Ventilation naturelle du bât. HELIOS en été – Savoie – de 20H00 à 13H00

Le taux de renouvellement τ est défini par la formule suivante. Il est exprimé en vol./h.

$$\tau = \frac{\dot{q}}{V}$$

Où :

- $\dot{q}$: débit de ventilation entrant dans le bâtiment, en m³/h
- V : volume du bâtiment qui reçoit le débit $\dot{q}$, en m³

Les taux de renouvellement qui peuvent être atteints à l'aide d'un système de ventilation dépendent de la dimension et de la position des ouvertures, mais aussi de l'orientation du bâtiment par rapport aux vents dominants.

- L'ouverture des fenêtres et des grilles de ventilation sur une seule façade permet généralement de renouveler l'air d'une pièce fermée avec un taux d'environ 1 vol./h pour des conditions extérieures calmes : vitesses de vent autour de 1 m/s (mesurés du CEA sur le bâtiment de bureaux HELIOS – juillet 2016)
- Les circulations d'air traversantes, d'une façade à l'autre, en incluant l'ouverture de grilles de transfert intérieur, les taux de renouvellement montent de 4 jusqu'à 15 vol./h en fonction des surfaces ouvertes, pour des conditions extérieures calmes : vitesses de vent autour de 1 m/s (mesures de la décroissance du taux de CO₂ après ouverture des ouvrants du CEA sur le bâtiment de bureaux HELIOS – juillet 2016 + [Tobias Schulze & Ursula Eicker]). Pour un taux de renouvellement de 4 vol./h, le CEA a relevé un bénéfice sur la température intérieure du bureau B3072 exposé Sud de -1°C au pic de chaleur.
- [Ardalan Aflaki & al.] ont montré que le simple ajout d'un panneau amovible en imposte au-dessus d'une porte d'entrée d'un appartement a permis de doubler la vitesse de circulation d'air due à la ventilation naturelle (augmentation de 240%). Dans leur étude, [Ardalan Aflaki & al.] ont calculé avec une ventilation traversante un taux de renouvellement de 9 vol./h pour des conditions de vent calme à 0,15 m/s et jusqu'à 107 vol./h lorsque le vent atteint 2,45 m/s (simulations avec un modèle FloEFD validé par la mesure).
- La ventilation traversante entre les façades, associée à un exutoire de type cheminée ou des ouvrants en verrière haute, permet de profiter au maximum des effets du vent et du tirage thermique. Le taux

de renouvellement peut alors atteindre 30 vol./h voire plus, toujours pour des conditions extérieures calmes : vitesses de vent autour de 1 m/s (mesures de la décroissance du taux de CO₂ après ouverture des ouvrants du CEA sur le bâtiment de bureaux HELIOS – juillet 2016).

A partir de ces résultats et des conditions environnementales, il est possible de calculer la puissance dissipée par la ventilation naturelle. Un taux de renouvellement de 9,4 vol./h pour un volume de 8 x 9 x 2,72 m, soit 196 m³ et une différence $\Delta T = T_{int} - T_{ext} = 4^{\circ}\text{C}$, équivaut à une puissance dissipée d'environ 2,4 kW (cf. [Tobias Schulze & Ursula Eicker]). A titre de comparaison, un taux de 0,85 vol./h proposé dans l'étude correspondant à un système de ventilation mécanique contrôlée, correspondant à un débit de 200 m³/h pour une maison individuelle fournit dans les mêmes conditions une puissance de rafraîchissement de 267 W.

On peut également calculer le rapport des différences de températures, *TDR*, à partir de la formule suivante (cf. [Erini Kyritsi & Aimilios Michael]).

$$TDR = \frac{T_{max,out} - T_{max,in}}{T_{max,out} - T_{min,out}}$$

Où :

- $T_{max,out}$: température extérieure maximale sur la journée, en °C
- $T_{max,in}$: température intérieure maximale sur la journée, en °C
- $T_{min,out}$: température intérieure minimale sur la journée, en °C

La ventilation naturelle est plus efficace lorsqu'elle est activée en période nocturne (manuellement ou automatiquement), contrairement à la ventilation naturelle permanente ou restreinte aux heures du jour. Les résultats donnent *TDR* = 32,2% pour la ventilation naturelle nocturne et 12,7% pour l'ouverture des ouvrants sur les seuls horaires en journée (cf. [Erini Kyritsi & Aimilios Michael]).

[Erini Kyritsi & Aimilios Michael] calculent aussi les degrés-heures « froids », *CDH*, qui permettent d'évaluer les besoins en froid en tenant compte de l'écart à une température limite de confort :

$$CDH_{90} = \sum_{i=1}^N (T_{op_average} - T_{upperlimit}) \quad \text{K.h}$$

Où :

- $T_{op_average}$ est la moyenne dans chaque heure de la température opérative, en °K
- $T_{upperlimit}$ est la limite haute d'acceptabilité (90%) en terme de confort thermique en °K

L'étude montre que les ventilations traversantes réduisent plus efficacement les besoins de rafraîchissement que les ventilations par ouverture d'une seule façade. Les degrés-heures froids *CDH*₉₀ varient de 44,6 à 55,3 K.h pour la même température de consigne et les mêmes conditions extérieures, ce qui représente un gain de 20% par rapport à une ventilation sur une seule façade.

Il est nécessaire de prévoir des ouvertures manuelles et/ou automatiques vers l'extérieur du bâtiment. Les surfaces vitrées fixes, sans possibilité d'ouverture, peuvent causer des problèmes de surchauffe [Preventing overheating – Taylor, M.] <https://goodhomes.org.uk/wp-content/uploads/2017/08/REPORT-GHA-Preventing-Overheating-FINAL-140217-2.pdf>.

Le rafraîchissement par ventilation naturelle nocturne présente les avantages suivants :

- Les taux de renouvellement mis en jeu sont plus de dix fois supérieurs au taux de renouvellement d'air hygiénique réglementaire.
- Lorsque les conditions sont favorables, il y a un fort potentiel de rafraîchissement des bâtiments, équivalent à quelques kW.
- Les débits d'air importants permettent d'améliorer efficacement la qualité de l'air.
- La mise en place peut être simple. La ventilation naturelle peut être pilotée manuellement ou automatisée.

Les inconvénients d'une ventilation naturelle nocturne :

- En période de canicule le potentiel de la ventilation naturelle nocturne est moins probant car la différence de température entre l'air intérieur et l'air extérieur est faible.
- Nécessité de sécuriser les ouvertures, en particulier sur les niveaux facilement accessibles.
- Le débit d'air est non contrôlable et est dépendant des conditions extérieures.

2.4.2. Vitrages – dimensions, transmission et émissivité

Les vitrages sont les principales surfaces de l'enveloppe d'un bâtiment par lesquelles les apports solaires réchauffent nos espaces habitables mais ils peuvent aussi conduire à les surchauffer en été. Ils fournissent un éclairage naturel reposant mais ne suppriment pas toujours le risque d'éblouissement.

2.4.2.1. Propriétés optiques et thermiques des vitrages

La norme NF EN 410 définit les caractéristiques lumineuses et solaires des vitrages :

- Le facteur de transmission total de l'énergie solaire, aussi appelé facteur solaire g . Cette caractéristique représente la part de rayonnement solaire transmise par la fenêtre vers le volume intérieur par transmission directe et par rayonnement infrarouge. Elle s'exprime par un nombre compris entre 0 et 1. Un facteur solaire de 1 signifie que la totalité du flux incident est transmis par le vitrage. Ce facteur solaire va dépendre du type de vitrage, une fenêtre triple vitrage aura généralement un facteur solaire plus faible car le fait d'avoir un vitrage supplémentaire augmente les réflexions. En revanche une fenêtre triple vitrage permet d'avoir une plus grande résistance thermique, ce qui peut s'avérer avantageux en hiver.
- Le facteur de transmission directe de l'énergie solaire (T_e)
- Le coefficient d'ombrage (SC). Celui-ci est calculé comme le facteur solaire rapporté à la valeur 0,87 qui correspond à un facteur de transmission totale de l'énergie d'une vitre claire d'épaisseur nominale comprise entre 3 et 4 mm.

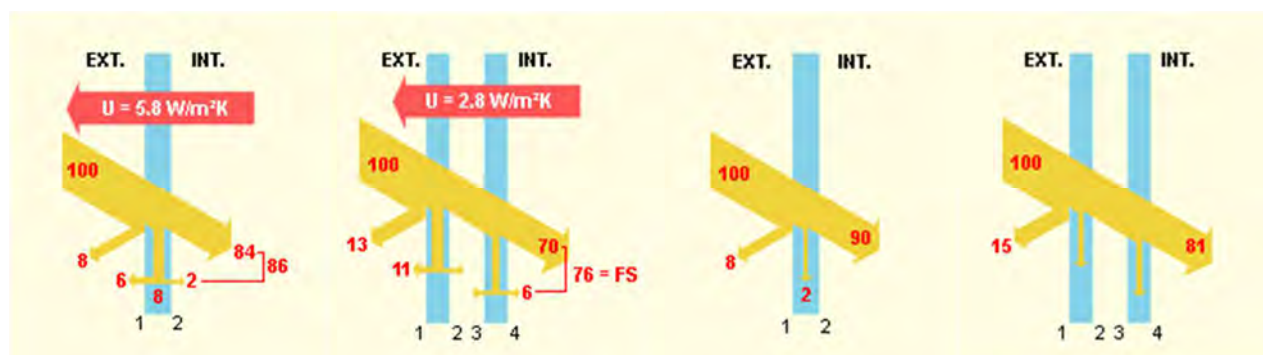


Figure 2 : Transmissions énergétique (g) et lumineuse (d) : Vitrage simple et double [energieplus-lesite.be]

D'autres propriétés optiques caractérisent les vitrages, comme le facteur de transmission lumineuse LT , le coefficient de réflexion lumineuse extérieure LR_{ext} , ou le coefficient de transmission thermique surfacique U .

Le choix du facteur solaire g doit être discuté selon l'objectif recherché : accroître les gains solaires en hiver et en mi-saison ou assurer une protection solaire efficace pour éviter le risque de surchauffe en été. Cette question peut se décliner sur toutes les surfaces vitrées du logement, en fonction de chaque exposition et du climat local (latitude). Une des solutions pour limiter les apports solaires est de réduire le facteur solaire g mais le vitrage peut alors contribuer à augmenter les besoins de chauffage en hiver.

Les vitrages dits « à basse transmission » bloqueront principalement les ondes électromagnétiques de grandes longueurs d'ondes : 800 à 3000 nm.

La transmission lumineuse (spectre visible) est généralement supérieure au facteur solaire (transmission sur tout le spectre solaire). Par destination, tous les vitrages sont plus ou moins transparents aux ondes électromagnétiques dans le domaine du visible : 400 à 800 nm. Les fabricants recherchent en effet à limiter la

transmission thermique mais le plus souvent à conserver une bonne transmission lumineuse. Mais il existe aussi certains verres très peu transparents.

Le coefficient de réflexion lumineuse extérieure LR_{ext} correspond à la part de rayonnement visible provenant de l'extérieur réfléchi par la surface vitrée. Il s'exprime entre 0 et 1. Plus sa valeur est proche de 1, plus l'effet miroir du vitrage est prononcé. Il est corrélé au coefficient de transmission lumineuse LT par la formule suivante :

$$LT + LR_{ext} + LA = 1$$

Où :

- LA : taux d'absorption lumineuse = part du rayonnement incident dans le spectre visible qui est absorbé par le vitrage

Le coefficient de transmission thermique surfacique U traduit la faculté du vitrage à laisser passer la chaleur sous toutes ses formes : transmission de l'irradiance incidente, conduction, convection, rayonnement de la chaleur absorbée, quelle que soit sa composition et le nombre de couches de matériau qui le constituent. Le coefficient de transmission thermique surfacique des vitrages se situe entre 1 et 1,9 W/(m².K). D'un point de vue thermique, il est usuellement admis qu'il convient de réduire la conduction au travers du vitrage et donc son coefficient U de façon à limiter les déperditions en hiver. Plus le coefficient U d'un vitrage est faible, plus ce vitrage est isolant.

L'émissivité d'un vitrage caractérise la capacité du vitrage à réémettre dans l'infrarouge l'énergie absorbée et donc, à absorber une partie du rayonnement incident dans la plage 800 à 3000 nm. L'émissivité est une valeur comprise entre 0 et 1. L'émissivité d'un vitrage clair se situe autour de 0,84 à 0,89, ce qui représente autant d'énergie absorbée dans les grandes longueurs d'ondes. A contrario, les vitrages basse émissivité possèdent un coefficient d'émissivité de 0,04.

Les vitrages basse émissivité ont été conçus pour réduire les pertes thermiques par rayonnement grandes longueurs d'ondes. Ils sont généralement constitués d'une très fine couche métallique positionnée entre les deux vitres du double vitrage mais qui n'altère que faiblement le facteur solaire et le facteur de transmission lumineuse du vitrage.

La position du film basse émissivité varie en fonction des propriétés essentielles recherchées. En hiver, le film sera apposé en face 3 pour que le verre intérieur rayonne la chaleur absorbée vers l'intérieur, alors qu'en été, le film basse émissivité est apposé en face 2 pour que le verre rayonne vers l'extérieur.

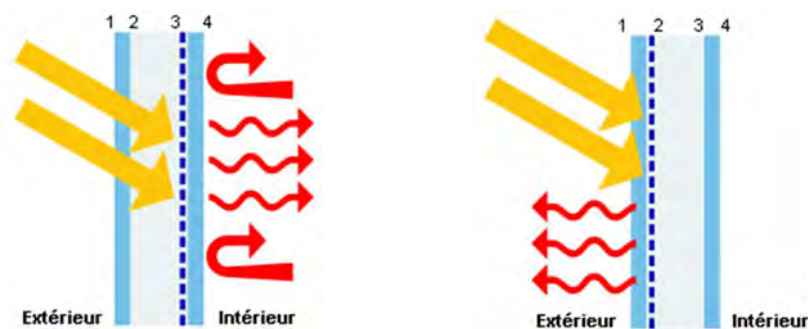


Figure 3 : Position de la couche basse émissivité sur un double vitrage hiver et été [energieplus-lesite.be]

Les vitrages sélectifs permettent de limiter la transmission solaire (facteur solaire g) tout en conservant une bonne transmission lumineuse.

L'action sélective des métaux nobles utilisés dans les couches réfléchissantes a pour effet :

- D'empêcher la chaleur solaire de pénétrer dans le bâtiment par réflexion du rayonnement solaire infrarouge et ultraviolet, non perceptible à l'œil, mais représentant respectivement 43 % et 3 % de l'énergie solaire.
- Les vitrages réfléchissants sont caractérisés par un facteur solaire g variant de 0,10 à 0,63 contre 0,78 à 0,87 pour un verre clair.
- De refléter en même temps la lumière, c'est-à-dire le rayonnement visible du spectre solaire, entraînant une transmission lumineuse plus faible que celle des vitrages clairs.

Les vitrages réfléchissants ont un facteur de transmission lumineuse LT compris entre 0,07 et 0,66 contre 0,65 et 0,76 pour un verre clair.

- De ne pas modifier coefficient de transfert thermique U, qui est le même, pour un double vitrage réfléchissant, que celui d'un double vitrage classique.

Tableau 1 : Exemples de différents vitrages commercialisés par Saint-Gobain

Réf des verres ou vitrages	Type de verre	Transmission lumineuse (TL)	Réflexion lumineuse extérieure (RLe)	Facteur solaire FS (ou g)
SGG COOL-LITE ST-108	Verre seul réfléchissant	9	44	14
SGG COOL-LITE ST-167	Double vitrage moyennement réfléchissant	61	21	49
ECLAZ 4x16Ax4	Double vitrage clair + 4,90% Argon	83	12	71
ECLAZ 4x16Ax4x16Ax4	Triple vitrage + 4,90% Argon	77	14	60

Une irradiance solaire de 1000 W/m² représente alors des apports internes de 710 W/m² pour le vitrage ECLAZ double vitrage et de 490 W/m² pour le vitrage COOL-LITE ST-167 double vitrage, ce qui réduit les apports de 31%. Pour un ratio de surface vitrée de 25% et des murs Sud et Ouest représentant une surface totale exposée de 20 x 2,5 = 50 m², soit 12 m² de surface vitrée, le rayonnement solaire dans l'habitat passe de 8,52 kW à 5,9 kW et les apports sur une journée avec 6 heures d'exposition moyenne à 500 W/m², de 6 x 4,26 kW = 25,5 kWh à 6 x 2,94 kW = 17,6 kWh.

2.4.2.2. Dimensions des vitrages

La dimension des vitrages ou le ratio de surface vitrée est un paramètre déterminant sur le contrôle des apports solaires dans le volume habitable et donc sur les besoins en chaud et en froid. La réduction de la taille des vitrages permet de réduire les charges solaires mais se fait au détriment de la luminosité.

Dans la littérature, il existe deux indicateurs qui traduisent les dimensions des vitrages :

- Le rapport de surface vitrée rapporté au mur : *WWR*
- Le ratio de surface vitrée rapporté à la surface au sol habitable, que nous appellerons ici : *GFR* et correspondant à la définition de la réglementation thermique RT2012

$$WWR = \frac{\text{surf}_{\text{vitrée}}}{\text{surf}_{\text{façade}}} \quad \text{et} \quad GFR = \frac{\text{surf}_{\text{vitrée_totale}}}{\text{surf}_{\text{habitable}}}$$

[Skarner G.C.J & al.] ont cherché à définir la surface de vitrage offrant le meilleur compromis en matière de réduction des temps de surchauffe (<100 heures/an max. au-dessus de 27°C) et d'éclairage naturel (>300 lux sur 75% de la surface) pour une pièce située dans les combles d'une maison individuelle R+C, et dont la fenêtre de toit est exposée au Sud et protégée ou non par un store extérieur. Les ratios de surface vitrée *GFR* suivants ont été calculés pour différents climats : Italie et Danemark, plusieurs types de vitrage, avec ou sans protection solaire (SC = 0,15).

- **GFR** = 10% pour Rome avec des vitrages sélectifs légèrement réfléchissant LT 56% et **g** = 0,28, sans protection solaire.
- **GFR** = 15% pour Copenhague avec des vitrages sélectifs légèrement réfléchissant LT 64% et **g** = 0,32, sans protection solaire.
- **GFR** = 16% et 17%, resp. pour Rome et Copenhague avec des vitrages clairs LT 70% et **g** = 0,50, avec protection solaire.
- **GFR** = 21% et 26%, resp. pour Rome et Copenhague avec des vitrages clairs LT 70% et **g** = 0,35, avec protection solaire.

[Amrita Ghosh & Subhasis Neogi] se sont intéressés à l'influence du ratio de surface vitrée rapporté au mur **WWR** sur la consommation énergétique globale, incluant l'éclairage artificiel, le chauffage et les besoins de climatisation. L'étude a été réalisée par simulation numérique sur un modèle de bâtiment climatisé.

- L'augmentation de 13,3% à 26,7% du **WWR** conduit à augmenter les besoins en climatisation de 6,5%, baisser les consommations pour l'éclairage de 7,5% et surtout diminuer les besoins en chauffage de 67,2%.
- Une augmentation du **WWR** de 13,3% à 53,3% conduit à augmenter de 19,8% les besoins en climatisation, et à réduire de 10,8% et de 100%, respectivement les consommations d'éclairage artificiel et de chauffage.
- Concernant la consommation énergétique globale du bâtiment comprenant les besoins en froid, en chauffage et d'éclairage artificiel, celle-ci augmente de 5,8% et 18,4% avec l'augmentation du **WWR**, respectivement de 26,7% et 53,3%.

[L. Derradji & al.] montrent que le choix des vitrages (type et surface) joue un rôle important sur le comportement thermique d'un bâtiment situé dans la région d'Alger et influence l'épaisseur optimum de l'isolation. Ainsi, on peut vérifier que l'augmentation de la surface vitrée s'accompagne d'une diminution de l'épaisseur d'isolant pour faciliter l'évacuation du trop-plein d'énergie stockée durant la journée. L'isolation intérieure pourrait être préconisée si une ventilation naturelle nocturne efficace peut fonctionner sinon l'isolation extérieure limitera le pic de chaleur en journée.

[Niccolo Aste & al.] comparent les résultats issus de simulations sur une pièce virtuelle lorsque la fenêtre est équipée de deux types différents de protection solaire : stores enrouleurs intérieurs (facteur solaire = 0,4) et stores vénitiens extérieurs en aluminium (réflectance = 0,7 et émissivité = 0,1).

En plus de la configuration des protections solaires, les différentes simulations font varier les paramètres suivants :

- Ratio de surface vitrée ramenée à la surface du mur (20% / 40% / 60% / 80%)
- Climat : Athènes (Grèce) / Milan (Italie) / Stockholm (Suède)
- Seuil du rayonnement solaire pour la fermeture des protections (300W/m² / 150 W/m² / 100 W/m²) en fonction du ratio de surface vitrée sur surface totale
- Type de vitrage (double vitrage verre clairs / double vitrage résistant / double vitrage résistant et film solaire / triple vitrage et film solaire)
- Les protections solaires sont également actionnées sur dépassement du seuil d'éblouissement (norme EN 12464-1)

[Niccolo Aste & al.] ont étudié, entre autres, l'impact du ratio de surface vitrée rapporté au mur **WWR** (20% / 40% / 60% / 80%) du type de vitrage (double vitrage verre clairs / double vitrage résistant / double vitrage résistant et film solaire / triple vitrage et film solaire) ou encore le climat : Athènes (Grèce) / Milan (Italie) / Stockholm (Suède). Le cas d'étude virtuel dispose d'une fenêtre protégée par deux types de store pilotés sur seuil d'éblouissement (norme EN 12464-1) : stores enrouleurs intérieurs (facteur solaire = 0,4) et stores vénitiens extérieurs en aluminium (réflectance = 0,7 et émissivité = 0,1). Les conclusions sont les suivantes :

- En climats chauds, il est recommandé de sélectionner le vitrage avec un rapport de transmission lumineuse **LT** sur coefficient de transmission solaire **g** respectant l'inégalité suivante :

$$\frac{LT}{g} > 1,25$$

- L'utilisation du triple vitrage avec la protection solaire extérieure n'est intéressante d'un point de vue économie d'énergie que pour le climat froid (Stockholm), quel que soit le **WWR**.
- L'utilisation de vitrages sélectifs (facteur solaire **g** bas) sans protection solaire est la solution la plus économique.

2.4.2.3. Vitrages adaptatifs ou dynamiques

[M.K. Cherier & al.] rappellent que sous le climat chaud de Ghardaïa (Algérie), les constructions locales privilégient un simple vitrage clair afin de bénéficier du coefficient d'émissivité élevé de ce type vitrage et de mieux décharger thermiquement les bâtiments en période nocturne.

Sous les climats chauds, le vitrage idéal serait un vitrage classique avec un faible coefficient de transmission solaire pour limiter les apports solaires et un coefficient d'émissivité d'environ 0,84.

Ce type de vitrage existe. Le vitrage est dit « dynamique » ou actif lorsque ses propriétés optiques de transmission de la lumière (donc sa teinte) peuvent varier de façon automatique en fonction de son environnement. Ces vitrages s'opacifient :

- Vitrage photochrome : sous l'effet de la lumière
- Vitrage thermochrome : sous l'effet de la chaleur
- Vitrage électrochrome : à la demande de l'usage, sous l'effet d'un courant électrique traversant une couche conductrice.

Plusieurs études se sont intéressées aux vitrages dynamiques :

- [Mateja Hočevár & al.] mesurent un vitrage photochromique constitué d'une couche WO₃ recouvert d'une couche lisse de sol-gel TiO₂-2 additionnée de 2-APPG4000 dont la transmission lumineuse est réduite de 57% à 7,5% sous une exposition d'irradiance 1000 W/m² dans le spectre solaire, en moins de 200 secondes.
- [Mohamed Salamati & al.] présentent les performances d'un vitrage thermochrome doté d'un film mince WVO₂ recouvert d'une couche TiO₂ : capacité de modulation solaire de 18,6% avec une transmission lumineuse dans le visible de 56%.
- [Michaela Detsi & al.] se sont intéressés aux cas des vitrages triple dotés d'une combinaison de couches minces : thermochromique sur le verre intérieur, électrochromique sur le verre extérieur, et basse émissivité (Low-E). Pour ce type de vitrage encore à l'état de recherche et non optimisé, ils ont calculé une réduction de la quantité d'énergie primaire consommée à l'année de 18,5% pour un bureau paysagé situé à Athènes (Grèce). La couche électrochromique était pilotée pour contrôler l'éblouissement.
- Une autre étude numérique portant sur un bureau 6 x 5 x 3 m climatisé et sa façade entièrement vitrée orientée au Sud fait état d'une réduction de la consommation énergétique annuelle de 29,8% à 45,3% pour différents climats avec les meilleurs résultats obtenus sur le climat du Caire (Egypte). [Mickael E.A. Warwick & al.] ajoutent que les meilleurs vitrages thermochromes sont ceux bénéficiant d'une température de transition basse et l'hystérésis le plus faible.
- [V. Costanzo & al.] ont étudié numériquement l'influence de différents vitrages thermochromes sur la consommation énergétique d'un bâtiment de bureaux réel situé à Catane (Italie). Le taux de surfaces vitrées est de 46%. Il a été calculé une réduction des besoins en énergies annuelles de 25% par rapport à des vitrages clairs isolants et de 15% si l'on compare aux vitrages isolants réfléchissants et ce, sans compromettre le confort visuel. Le vitrage thermochrome théorique donnant les meilleurs résultats est doté d'une température de transition de 25°C et d'une hystérésis de 5°C. Les simulations ont aussi été lancées avec les climats de Paris (France) et Milan (Italie).

2.4.2.4. Avantages/inconvénients

La limitation des apports solaires en réduisant le facteur solaire d'un vitrage présente les avantages suivants :

- Il n'y a pas besoin de stratégie de protection solaire, c'est une protection solaire permanente.
- Le ratio de surface vitrée est un facteur déterminant pour les économies d'énergie. Diminuer ce ratio permet de réduire la consommation énergétique du bâtiment (cf. [Niccolo Aste & al.]).
- La luminosité est maximisée contrairement à une protection solaire de type store ou volets.
- Il s'agit d'un vitrage dynamique, le verre adapte sa transparence à la luminosité, à la température ou aux besoins des usagers (intimité)

La limitation des apports solaires en réduisant le facteur solaire d'un vitrage présente les inconvénients suivants :

- En hiver, il y a moins d'apports solaires par rapport à un vitrage classique.
- En période de canicule et d'ensoleillement important cette solution n'est pas suffisante pour limiter les apports solaires.

- La réduction de l'éclairage naturel engendre des surconsommations en matière d'éclairage artificiel.
- S'il s'agit de vitrages dynamiques, thermochrome ou électrochrome, le coût d'investissement est élevé pour un marché encore confidentiel.
- Les vitrages électrochromes nécessitent une alimentation électrique.

2.4.3. Protections solaires

Toutes les protections solaires n'ont pas le même niveau d'opacité. Certaines ne protègent que des rayons solaires sous un certain angle, d'autres sont ajourées, et d'autres encore sont totalement opaques. Les protections solaires permettent généralement une réduction plus importante du rayonnement solaire incident qu'un vitrage à contrôle solaire. En contrepartie le besoin en éclairage artificiel peut être plus important.

Les protections solaires peuvent être positionnées à l'intérieur ou à l'extérieur du volume habitable. A la différence des protections solaires extérieures qui bloquent l'irradiance solaire avant même que celle-ci n'arrive sur le vitrage, les stores vénitiens ou autres rideaux intérieurs rayonnent une grande part de l'énergie reçue au travers des vitrages dans le volume habitable et sur les vitrages eux-mêmes, contribuant ainsi, à réchauffer l'ambiance.

On distingue aussi les protections solaires fixes de celles qui sont mobiles, que ce soit manuellement ou à l'aide d'un moteur pilotable.

2.4.3.1. Protections solaires mobiles – Volets / stores

La norme NF EN ISO 14500 « Fermetures et stores - Confort thermique et lumineux Méthodes d'essai et de calcul » définit les méthodes d'essai et de calcul permettant la détermination des caractéristiques de réflexion et de transmission à utiliser pour déterminer les classes de performance de confort thermique et lumineux des stores extérieurs, des stores intérieurs et des fermetures pour baies équipées de fenêtres, telles que spécifiées dans l'EN 14501.



Figure 4 : <https://www.france-volet.fr/catalogue.php>



Figure 5 : Différents mécanismes de protections solaire mobiles



Figure 6 : <https://www.franciaflex.com/store-exterieur-sur-mesure>



Figure 7 : <https://www.ici-store.com/fr/stores-bannes.html>

La norme NF EN ISO 52022-1 « Dispositifs de protection solaire combinés aux vitrages - Calcul du facteur de transmission solaire et lumineuse » donne une méthode simplifiée, fondée sur les caractéristiques thermiques, solaires et lumineuses du vitrage, et sur les caractéristiques solaires et lumineuses du dispositif de protection solaire pour estimer la transmission énergétique solaire totale, la transmission énergétique directe et la transmission lumineuse d'un dispositif de protection solaire combiné à un vitrage.

Les protections solaires sont généralement opaques ou ne laissent filtrer que quelques raies de lumière. S'ils sont bien utilisés, éventuellement monitorés en fonction du rayonnement solaire, de la température et/ou de l'éclairement, ils peuvent bloquer une grande part du rayonnement solaire direct, correspondant au niveau d'opacité de la protection.

Pour des protections solaires non occultantes ayant un niveau d'opacité inférieur à 1, le rayonnement solaire incident doit être calculé en proportion de la surface opaque sur la surface totale du vitrage, ces surfaces étant projetées sur un plan normal au rayonnement incident.

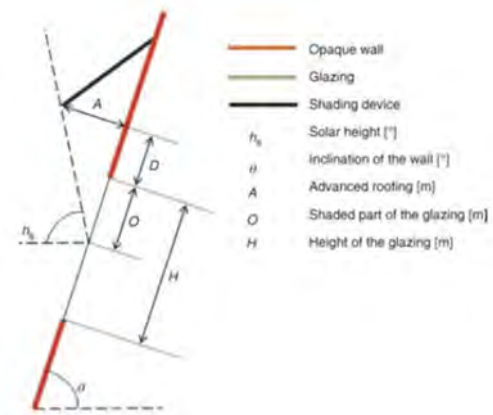


Figure 8 : Ombre reportée d'une protection solaire sur le vitrage [M.A.C. Haddam & all]

Un indicateur défini par la norme NF EN ISO 52022-1 permet d'évaluer l'efficacité du système « vitrage + protection solaire ». Il s'agit du facteur de transmission énergétique solaire totale g_{tot} qui intègre le rôle dans la transmission solaire du dispositif de protection et du vitrage lui-même.

De très nombreuses études ont été menées sur les protections solaires mobiles et leur pilotage.

- Les protections solaires extérieures mobiles sont à privilégier par rapport aux systèmes placés à l'intérieur, même si les économies potentielles sont réduites lorsque le ratio de surface vitrée est minimal et que les vitrages sont déjà à basse transmission (cf. [Niccolo Aste & al.]), surtout pour les climats chauds et les vitrages les plus exposées (cf. [Eshan Naderi & al.]). [Gianpiero Evola & al.] montrent que les besoins annuels de climatisation sont de 48% à 60% inférieurs avec les volets roulants extérieurs ou les films de protections solaire que pour les stores vénitiens intérieurs sur des façades Sud et Ouest.

- Les volets roulants extérieurs sont efficaces thermiquement sur des façades Sud alors que les films de protection solaire en surimposition extérieure sont à préférer en exposition Ouest, en particulier pour des raisons de confort visuel (cf. [Gianpiero Evola & al.]).
- Si la luminance obtenue dans les locaux traités à l'aide des stores vénitiens intérieurs peut être supérieure de 20 à 30% à celle obtenue avec les protections solaires extérieures, sa répartition spatiale est très contrastée avec des zones qui restent très exposées. Ce système n'est donc pas idéal pour le confort visuel et ne peut pas régler les problèmes d'éblouissement (cf. [Gianpiero Evola & al.]).
- Les économies d'énergie en climatisation obtenues grâce à la protection solaire sont toujours supérieures à l'augmentation des consommations pour l'éclairage artificiel et le chauffage (cf. [Niccolo Aste & al.]).
- L'utilisation de protections solaires pilotées de façon très basique ouverture / fermeture avec un seuil d'irradiance à 200 W/m² peut réduire très significativement le nombre d'heures d'inconfort (T°C > 27°C) tout en n'augmentant que légèrement les besoins de chauffage en hiver (cf. [André Badura & al.]).
- Avec des stores vénitiens dont les ailettes étaient inclinées à 45°, [Albert Al Touma & Djamel Ouahrani] ont mesuré une économie d'énergie globale incluant la charge d'éclairage, le chauffage et les besoins de climatisation, respectivement de 7,7% et de 18,6% pour des orientations Nord et Sud sur une installation expérimentale située au Qatar.
- Il est possible d'optimiser la conception et le pilotage de la protection solaire en termes de réduction des besoins en climatisation, chauffage, éclairage artificiel et suppression des risques d'éblouissement. [Albert Al Touma & Djamel Ouahrani] ont obtenu à l'aide d'un modèle numérique validé sur des mesures réalisées sur un site expérimental au Qatar, une réduction de 26,1% des consommations énergétiques par un dispositif de contrôle-commande de l'inclinaison des lames de la protection solaire installée en façade Sud et de l'éclairage artificiel en fonction du seuil d'éblouissement toléré. [Eshan Naderi & al.] ont calculé des optimums sur les mêmes objectifs énergétiques et de confort de 3% à 48% suivant les configurations simulées, avec des valeurs respectives de 15,5% à 70% et de 8,5% à 56% pour les inconforts visuel et thermique dans le cas d'un bureau paysagé disposant d'un ratio de surface vitrée de 50%, occupé et climatisé (22 – 26°C) durant les heures de travail de 08H00 à 16H00, et situé en Iran. Le plan de simulation intégrait notamment plusieurs climats iraniens et différentes orientations, le choix de la stratégie de pilotage, les dimensions, l'angle et le matériau des lamelles, la position et la distance du store par rapport au double vitrage. Les bénéfices atteints sont d'autant plus importants que le climat est chaud. [Eric Shen & al.] ont trouvé, suivant les configurations étudiées, des économies d'énergie globale incluant l'éclairage artificiel, le chauffage et les besoins en climatisation, entre 18% et 40% par rapport à un cas de référence, sans protection solaire et avec éclairage manuel, tout en réussissant à conserver un bon niveau d'éclairement naturel. Les simulations numériques faisaient varier le scénario de contrôle d'éclairage et de protections solaires, la position des protections solaires : intérieures ou extérieures, le ratio de surface vitrée (66% ou 100%), et différents climats : Abu Dhabi (EAU), Londres (RU), Baltimore (USA). Un pilotage proposé pour les protections solaires en boucle fermée intègre les informations de la présence des occupants et du fonctionnement cooling/heating, en plus de la détection d'éblouissement et gère en même temps l'éclairage artificiel.
- Le contrôle segmenté de la surface d'ouverture de la protection solaire, aussi appelée coefficient d'atténuation solaire extérieur, EAC, permet d'améliorer encore les économies d'énergies globales par rapport à un pilotage Tout-Ou-Rien : ouverture/fermeture. [Dong-Seok Lee & al.] ont démontré qu'il est possible de réduire la consommation énergétique globale incluant l'éclairage artificiel, le chauffage et les besoins de climatisation de 19% à 33% en segmentant l'EAC d'un store en dix positions également réparties. L'approche est généralisable à tous types de protections solaires mobiles (volets inclinables, volets roulants...).
- Pour un ratio de surface vitrée supérieur ou égal à 60%, la présence d'une protection solaire extérieure avec des doubles vitrages de type clairs permet d'atteindre la même efficacité économique qu'avec les vitrages hautement sélectifs, disposant d'un facteur solaire bas (cf. [Niccolo Aste & al.]).
- La position horizontale des lamelles sur les protections solaires adéquate permet de favoriser l'éclairage naturelle (cf. [Eshan Naderi & al.]). Avec les lames larges horizontales réparties devant la façade vitrée, les gains d'énergie globale, sont respectivement de 9,1% et 20,6% pour les orientations Nord et Sud (cf. [Albert Al Touma & Djamel Ouahrani]).
- [Eshan Naderi & al.] recommandent en cas de pilotage des stores à partir de l'irradiance solaire globale, que celui-ci soit activé d'autant plus tôt, sur un seuil bas d'irradiance, que les vitrages sont fortement exposés au rayonnement solaire. Au contraire, en cas de pilotage des protections solaires à partir de la température extérieure ou de la puissance au climatiseur, il doit être activé sur des seuils de

température ou de puissance plus élevés. Mais d'une manière générale, les protections solaires mobiles, en particulier les volets roulants, sont plus efficaces lorsqu'elles sont pilotées intelligemment en fonction des apports solaires et des besoins en éclairage. Cette stratégie est meilleure que celles visant à considérer uniquement l'irradiance solaire mesurée sur la façade, ou la seule luminance intérieure (cf. [Dong-Seok Lee & al.]).

- Les lamelles bénéficiant d'une grande réflectance solaire permettent de réduire la consommation d'énergie mais augmentent l'inconfort visuel (cf. [Eshan Naderi & al.]).
- L'augmentation de la conductivité thermique des lamelles peut également fournir un gain en consommation d'énergie mais augmente l'inconfort thermique (cf. [Eshan Naderi & al.]).

La limitation des apports solaires en utilisant des protections solaires présente les avantages suivants :

- Réduction du rayonnement solaire incident plus importante que pour du vitrage à contrôle solaire.
- Solution mature et généralement déjà mise en place sur les bâtiments.
- Les protections solaires améliorent le niveau de confort des occupants et la productivité au travail (cf. [Niccolo Aste & al.]).

La limitation des apports solaires en utilisant des protections solaires présente les inconvénients suivants :

- Gestion des protections solaires obligatoire.
- Nécessite en général des besoins d'éclairage plus importants.
- Peut créer une contrainte esthétique.
- Peut créer un inconfort visuel pour les occupants (problème d'acceptation).

2.4.3.2. Protections solaires fixes

Les protections solaires fixes peuvent être horizontales (casquettes, avancées de toit...), verticales ou même inclinées lorsqu'elles comprennent des aubes. Les protections sont parfois totalement opaques, ajourées, perforées ou encore sérigraphiées si leur matériau de base est transparent. Contrairement aux protections mobiles, elles ne sont pas en mesure de couvrir la totalité de la surface vitrée.

Elles sont dimensionnées pour protéger efficacement les vitrages du rayonnement solaire direct en fonction de la hauteur du soleil et/ou de son azimut. Alors, seul le rayonnement solaire diffus, celui-ci pouvant représenter jusqu'à 500 W/m^2 , doit être considéré pour estimer le rayonnement incident sur la surface vitrée non protégée. Ce type de protection solaire permanente limite donc les apports solaires en été tout en laissant passer un rayonnement solaire réchauffant en hiver et du rayonnement diffus pour satisfaire les besoins d'éclairage tout au long de l'année. Ces protections sont particulièrement conseillées pour protéger les vitrages orientés au Sud (dans l'hémisphère Nord et vice-versa).



Figure 9 : <https://www.ami-construction.fr/realisations-maisons/maison-moderne-monopentetoit-plat-chateaugiron.html>

Les indicateurs de performance des protections solaires fixes sont les mêmes que ceux des protections mobiles (cf. §2.4.3.1).

Il est aussi possible de définir une protection solaire fixe par son pourcentage d'ouverture lorsqu'il est constitué de plaques perforées ou ajourées. Exemple : Volets incurvés (dim. : $3 \times 0,45 \text{ m}$), fixes (45°), perforés ($\phi 5 \text{ mm}$ – 40%) dans l'étude [Luca Evangelisti & al.].



Figure 10 : Collège de l'Esterel (83)
(<https://pro.gauthier-menuiserie.fr>)

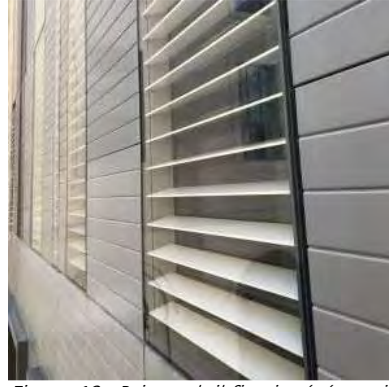


Figure 12 : Brise soleil fixe inséré au vitrage
(<https://www.paralu.fr/occultation-brise-soleil-fixe.html>)



Figure 11 : siege-social-efluid-metz-57
(<https://www.tellierbrisesoleil.com>)



Figure 13 : <https://www.tellierbrisesoleil.com/realisations/>

[Luca Evangelisti & al.] proposent un indicateur de performance : l'indice de réduction de température TRI, exprimé en %, qui représente l'abaissement de la température d'une surface protégée $T_{se,p}$, exprimée en °C, relativement à la température de la même surface sans protection $T_{se,sp}$. Cet indice n'est applicable que pour des conditions de température extérieure suffisamment positive.

$$TRI [\%] = \left(1 - \frac{T_{se,p}}{T_{se,sp}} \right) \times 100$$

Des études de simulation thermique dynamique ont été réalisées par le CEA sur un cas réel, représenté par une maison expérimentale du constructeur français IGC située sur la commune de Beychac-et-Caillau (33).

Le modèle de maison construit pour l'étude ne comprend aucun store extérieur ou intérieur et n'est pas équipée de dispositif de ventilation naturelle. Les différentes simulations faisaient varier le type de protection solaire horizontale :

- Sans casquette ni débord de toit
- Sans casquette avec débord de toit
- Casquette de 40 cm sur le séjour et auvent au-dessus du garage
- Casquette de 40 cm sur le séjour et la façade Sud de la chambre 3 et auvent au-dessus du garage
- Casquette de 40 cm tout autour de la maison / casquette de 1m70 tout autour de la maison.



Figure 14 : Maisons expérimentales IGC à Beychac-et-Caillau (33) – séjour orienté Sud/Sud-Ouest

Les simulations ont fourni les constats suivants :

- L'augmentation de la taille de la casquette augmente les besoins de chauffage et diminue les besoins de refroidissement. C'est particulièrement vrai pour les bâtiments de type logement, avec des charges internes plus faibles, la baisse de la demande de rafraîchissement s'accompagne d'une augmentation des besoins de chauffage.
- La présence d'une casquette influence de manière beaucoup plus importante la réduction des besoins en froid que l'augmentation des besoins de chauffage. Sans prendre en compte le résultat de la casquette de 1,70 m, on observe une très faible variation du besoin de chauffage avec le changement de la casquette. En effet, la casquette de 40 cm sur le salon n'augmente le besoin de chaud que de 10% par rapport à la configuration sans casquette ni débord et de 5% par rapport à la configuration avec débord et sans casquette. De plus, on constate que les 3 configurations avec la casquette de 40 cm présentent des besoins de chaud quasiment équivalents.
- Une casquette de 1,70 m tout autour de la maison, augmente les besoins de chauffage d'environ 40%. Dans ce cas extrême, la casquette est assez grande pour masquer le rayonnement solaire également en hiver.
- La configuration de la casquette est déterminante pour les besoins en froid. Un simple débord de toit entraîne une diminution de l'ordre de 25% des besoins annuels en froid par rapport à une configuration sans casquette ni débord.

D'autres études documentées ont également apporté des éléments d'analyse qualitatifs et/ou quantitatifs.

- [Luca Evangelisti & al.] publient des résultats d'expérimentation qui ont porté sur un bâtiment ancien (1928) aujourd'hui transformé en bureaux et rénové au sein de l'université TRE de Rome (Italie).

Les résultats expérimentaux de [Lucas Evangelisti & al.] ont montré que la réduction de la température de façade (*TRI*) due à la présence des protections solaires représente environ 39% sur la période estivale et que les effets de ces volets perforés en hiver sont négligeables.

Les écarts de température mesurés entre les parties de façade protégées et celles non protégées ont atteint 8,5°C.



Figure 15 : Protection solaire par volets perforés [Luca Evangelisti & al.]

- La forme des protections solaires fixes autour des surfaces vitrées impacte la température intérieure sous le climat aride de Ghardaïa (Algérie).

[M.K. Cherier & al.] ont montré que les configurations 3 et 4 sont les plus efficaces pour limiter la température intérieure en été pour un appartement de type T2 équipé de fenêtre simple vitrage clair et plus précisément dans la chambre et le séjour orienté-e-s au Sud. Les températures intérieures sont 1,5°C en dessous de la configuration sans protection solaire. Il faut noter que l'étude porte sur un type de construction particulièrement inertielle et que les simples vitrages contribuent certainement à la décharge thermique de l'appartement en période nocturne. Les murs extérieurs sont constitués de 30 cm de briques recouvertes de ciment (extérieur) et de plâtre (intérieur). Les murs intérieurs sont réalisés en briques de 10 cm recouvertes de 5 cm de plâtre.

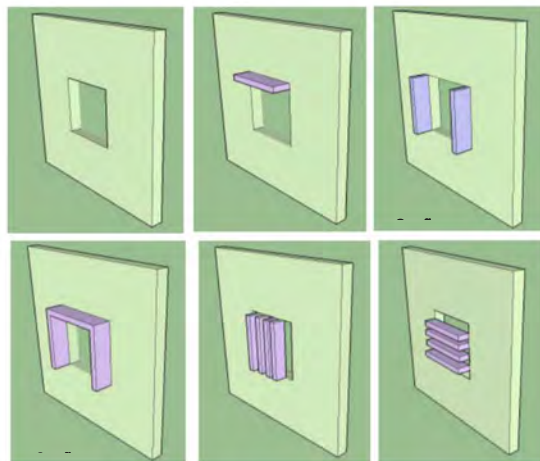


Figure 16 : Représentation schématique des protections solaires fixes [M.K. Cherier & al.]

- La mise en œuvre de protections solaires correspondant à la configuration 4 : casquette + ailes latérales (débord = 1 m par rapport au mur et de distance = 0,5 m autour de la fenêtre) peut réduire les besoins annuels en chauffage et en climatisation, respectivement entre 607 et 757 kWh/an et entre 1125 et 1522 kWh/an pour les deux pièces principales (séjour et suite parentale) d'une villa située sous différents climats : Marrakech, Casablanca, Tanger (Maroc) (cf. [Badr Chegari & al.]). Le bâtiment R+1 modélisé sous TRNSYS était de type traditionnel marocain (murs extérieurs d'épaisseur 30 cm en terre cuite et toit terrasse en poutre béton et hourdis).
- [Carmen María Calama-González & al.] ont instrumenté et monitoré deux salles de classe identiques d'un même établissement scolaire situé dans le Sud de l'Espagne.

Les fenêtres des deux salles sont toutes protégées originellement par des volets à lamelles PVC horizontales. Mais une protection supplémentaire constituée d'un assemblage de quatre treillis de dimensions unitaires : 1200 x 800 x 30 mm, a été fixée devant chacune des fenêtres et son volet pour la première salle. Le matériau des treillis n'a pas été renseigné dans l'étude.

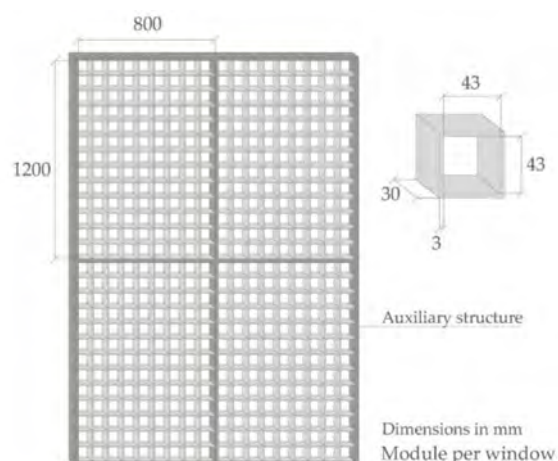


Figure 17 : Protection solaire fixe testée par [Carmen María Calama-González & al.]



L'expérience a montré les résultats suivants :

- Une telle protection solaire supplémentaire a permis de réduire la consommation électrique annuelle pour la climatisation d'au moins 20%. La consommation de chauffage est similaire pour les deux salles de classe.
- La consommation électrique pour l'éclairage artificiel a été réduite de 50% dans la salle de classe dont les fenêtres sont équipées du treillis de protection solaire. Cette différence est essentiellement due à l'intervention des occupants qui dans la salle de classe sans la protection solaire supplémentaire fermaient plus régulièrement les volets à lamelles PVC pour se protéger du rayonnement solaire ou de l'éblouissement.
- Ce type de protection solaire apporte une économie d'énergie électrique cumulée sur les usages de climatisation et d'éclairage de l'ordre de 35%.
- L'influence du comportement des occupants apparaît déterminante et introduit forcément un biais dans l'étude comparative des deux salles de classe.
- La protection solaire en forme de treillis a conduit à augmenter la luminosité dans la salle de classe
- La climatisation fonctionnait plus souvent dans la salle de classe sans protection solaire supplémentaire et particulier lorsque les volets à lamelles horizontales étaient fermés ou en position intermédiaire.
- La différence d'apports solaires (irradiance solaire) entre la salle dont les fenêtres sont protégées par les treillis et celle qui n'en bénéficie pas est de 59% pour une journée ensoleillée, sans occupation, des volets ouverts et une température extérieure de 30°C. Cet écart est particulièrement notable entre 10H et 17H.
- Dans les mêmes conditions, la température intérieure est 1°C plus basse et la luminance jusqu'à 130 lux supérieure dans la salle avec le treillis de protection devant les fenêtres que dans l'autre salle.

Il est à noter que ce type d'établissement ne souffre pas de la réduction des apports solaires en période hivernale car les apports internes sont prépondérants. Le gain de consommation du système de climatisation est d'ailleurs faible durant cette période.

- [M. Haddad Abdalkhalaq Chuayb & al.] soulignent l'importance de dimensionner les protections solaires de façon totalement couvrante pour les climats très chauds et secs du Sahara et sur le rapport volume/surface du bâtiment qui doit être le plus faible possible. Ils recommandent notamment des

avancées de toit respectivement de 4,5 m et 4,8 m pour protéger les vitrages de l'irradiance solaire matinale lors des jours les plus chauds de l'année : Juin et Juillet et du rayonnement solaire au coucher du soleil.

- [Albert Al Touma & Djamel Ouahrani] ont mesurés les résultats suivants sur le site expérimental du Qatar.

Avec les lames larges horizontales réparties devant la façade vitrée, les gains d'énergie globale, sont respectivement de 9,1% et 20,6% pour les orientations Nord et Sud.

Les deux types de protection solaire permettent de supprimer le risque d'éblouissement sur la façade orientée Nord, mais ne parviennent qu'à le réduire sur la façade Sud.



*Figure 18 : Protections fixes à lames horizontales
[A. A. Touma & D. Ouahrani]*

La limitation des apports solaires en utilisant une protection solaire fixe présente les avantages suivants :

- Il n'y a pas besoin de stratégie de protection solaire, c'est une protection solaire permanente.
- Bien que la casquette soit présente toute l'année, l'augmentation du besoin de chauffage est légère (de l'ordre de 10 % pour une casquette de 40 cm).
- Conserve un bon niveau d'éclairage naturel.

La limitation des apports solaires en utilisant une protection solaire fixe présente les inconvénients suivants :

- Peut créer des ponts thermiques.
- Peut poser une contrainte esthétique.
- Ne traite pas les problèmes d'éblouissement.

2.4.4. Murs végétalisés

Une paroi végétalisée joue un rôle similaire à une protection solaire bien qu'elle protège généralement une paroi opaque. Mais son rôle ne se limite pas qu'à un effet d'occultation puisque le phénomène d'évapotranspiration du végétal participe aussi.

De plus en plus de constructions intègrent des parois végétalisées. Les murs végétalisés peuvent être de différents types :

- Les façades vertes (green façade) sont constituées de plantes grimpantes qui sont enracinées dans le sol au pied de la façade et qui grimpent sur le mur végétalisé. Ces façades vertes peuvent prendre appui sur le mur directement (direct system = dGF) ou sur une structure devant le mur ou double peau (indirect system = idGF)



Figure 19 : direct Green Wall, dGF (à g.) – indirect Green Wall, idGF (à d.) [Kyra Koch & al.] – groenegevels.be

Les murs végétalisés indirects (idGF) s'appuient sur une structure autonome et non directement sur le mur.

- Les murs vivants (Living wall system = LWS) contiennent le substrat et le système d'irrigation qui nourrit directement les plantes de recouvrement. Ce substrat peut être inerte (support) et nécessite alors d'être enrichi via le système d'irrigation ou au contraire, il peut être constitué de matière organique.

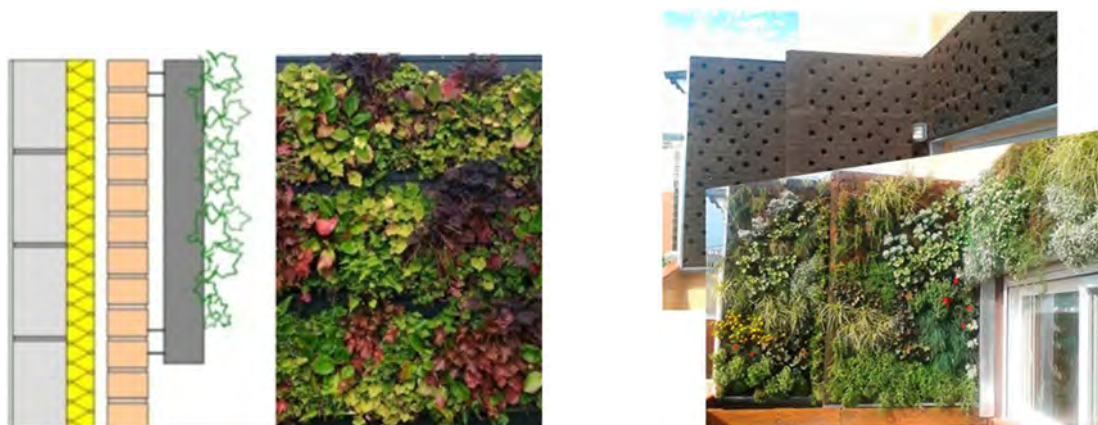


Figure 20 : Living Wall System, LWS à g. [Kyra Koch & al.] – groenegevels.be – à d. [R. Sendra-Arranz & al.]

Un système d'irrigation est toujours nécessaire pour apporter les nutriments dont ont besoin les végétaux.

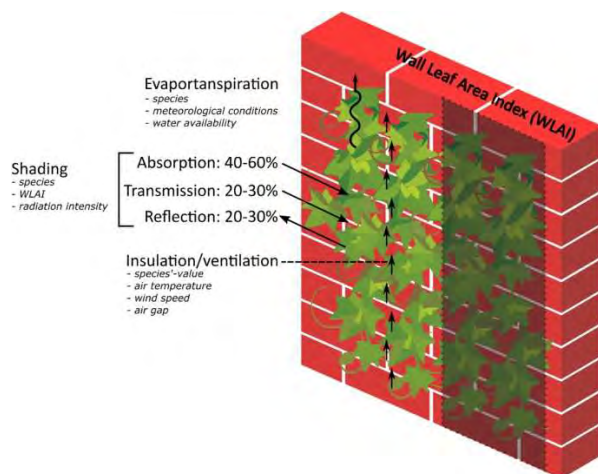
Les végétaux participent au rafraîchissement des bâtiments par au moins quatre phénomènes :

- L'effet de masque au même titre que les autres protections solaires, qui fait intervenir le taux de couverture du mur, l'absorption, la réflectance et la transmission solaire du rideau végétal.
- L'évapotranspiration, mécanisme naturelle des plantes, qui produit un rafraîchissement par évaporation du rideau végétal.
- La convection par la création d'une circulation d'air préférentielle entre le mur végétal idGF et la paroi protégée.
- La résistance thermique du rideau végétal.

La bibliographie souligne que l'évapotranspiration fournit généralement un rafraîchissement moindre que l'effet de masque du mur végétalisé, en fonction des espèces de plantes. Mais ce phénomène naturel participe aussi à réduire la quantité de CO₂ dans l'environnement du bâtiment

plus particulièrement, si les dimensions du mur végétalisé sont assez grandes.

Figure 21 : Mécanismes de rafraîchissement du mur végétalisé et paramètres physiques associés [Kyra Koch & al.]



Un des indicateurs de l'efficacité des murs végétalisés est la différence de température entre le mur protégé par les végétaux et le même mur sans protection.

On calcule aussi l'indice de surface des feuilles par m² de mur protégé (WLAI ou LAI) et le coefficient de transmission solaire du mur végétalisé. Ces deux indicateurs sont corrélés linéairement.

Selon [Kyra Koch & al.], le coefficient de transmission solaire, est directement relié à l'effet d'ombrage. Il est défini comme le rapport entre le rayonnement transmis sur le mur protégé et le flux solaire incident et décroît de 30% pour le doublement du LAI.

Le LAI et le coefficient d'ombrage dépendent des espèces végétales installées sur le mur. Par exemple, le WLAI était de 1,9 pour *P. tricuspidata*, 3,0 pour *H. helix* et 3,0 pour *F. baldschuanica* dans l'étude menée par [Marie-Therese Hoelscher & al.].

Le coefficient de transmission solaire effectif du rideau végétal *P. tricuspidata* a été mesuré à 0,25 pour des valeurs issues de la bibliographie, comprises entre 0,12 et 0,45 ([K. Ip & al.]).

De nombreuses recherches ont été menées sur l'impact énergétique de la végétation sur les parois des bâtiments. Un état des connaissances sur les murs végétalisés a été dressé par [Kyra Koch & all] en s'appuyant sur les nombreuses études jusqu'en 2018.

- Le gain en température des murs protégés par un végétal est d'autant plus important que le rayonnement solaire est intense (cf. [Kyra Koch & al.]). [R. Sendra-Arranz & al.] ont montré que la température de l'enveloppe bâtiment protégée par la double peau végétalisée était assez peu sensible à la vitesse du vent et à l'irradiance solaire incidente. [Irina Susorova & al.] ont également observé la faible influence du vent et de l'irradiance solaire sur la température de façade du bâtiment au contraire de la température et de l'hygrométrie qui impactent beaucoup plus l'équilibre thermique de la paroi. [Irina Susorova & al.] confirment que le mur végétal se comporte comme une résistance thermique effective variable, qui augmente avec le rayonnement solaire mais diminue avec la vitesse de vent et la température extérieure. [Irina Susorova & al.] ont calculé la résistance thermique effective du rideau végétal qui peut représenter jusqu'à 10 cm d'épaisseur de brique ou 0,5 cm de polystyrène. Et [R. Sendra-Arranz & al.] ont constaté que le mur végétalisé étudié avait plus d'impact sur la façade Sud que sur l'exposition Ouest.

[Irina Susorova & al.] expliquent que la résistance thermique effective de la couche végétalisée diminue avec l'augmentation de la température ambiante extérieure. Or, si la température de surface du mur protégé augmente avec la hausse de la température extérieure, le rayonnement solaire reçu par le mur varie très faiblement. Ainsi, contrairement à la réponse du végétal sous des irradiances solaires plus fortes, il n'y a pas de modification de la réduction du flux incident occasionné par le végétal avec la hausse de la température extérieure, ce qui constitue une limite au rafraîchissement du mur protégé. Lorsque la température extérieure augmente, le rideau végétal fonctionne encore comme une protection au rayonnement solaire mais sa résistance thermique est grandement diminuée.

- Le mur végétalisé se comporte comme une isolation thermique supplémentaire due aux poches d'air stagnantes créées entre les feuilles du végétal, surtout efficace pour éviter les risques de gel. Cette isolation peut être également renforcée par le substrat nourrissant le mur végétalisé lorsqu'il s'agit d'un LWS et spécifiquement pour les bâtiments exposés à des conditions climatiques extrêmes (cf. [Kyra Koch & al.]).

L'isolation apportée par le rideau végétal freine la dissipation de la chaleur en période nocturne d'un facteur 0,56 à 0,82 constatant [Marie-Therese Hoelscher & al.] : 36,5 W/m² contre 64,5 W/m² sur le bâtiment A, 34,1 W/m² contre 43,9 W/m² pour le bâtiment B durant les nuits du 2 au 3 et du 3 au 4/08/2013, et 41,3 W/m² contre 50,4 W/m² pour le bâtiment C durant la nuit du 19 au 20/07/2013. Les trois bâtiments étaient situés sur le campus de l'université technique de Berlin (Allemagne). Le mur du bâtiment A orienté Sud/Sud-Ouest était recouvert de *P. tricuspidata* (dGF). Le mur du deuxième bâtiment B exposé Est était végétalisé par des grimpantes *H. helix* (dGF). Et le mur du bâtiment C, exposé Ouest, est protégé par une structure additionnelle située à 30 cm en retrait et supportant des *F. baldschuanica* (idGF).

[Irina Susorova & al.] ont construit un modèle thermique reproduisant le comportement d'un mur recouvert de plantes grimpantes de type vigne vierge. Dans la même étude, une expérimentation réelle a permis de valider le modèle et de mesurer une différence de température à la surface du mur protégé par la vigne et le mur nu du même bâtiment : 5,7°C au pic d'irradiation solaire.

Le modèle numérique de mur végétalisé permet alors de vérifier que la résistance thermique du rideau végétal croît avec le rayonnement solaire incident alors qu'elle diminue avec l'augmentation de la température ambiante extérieure.

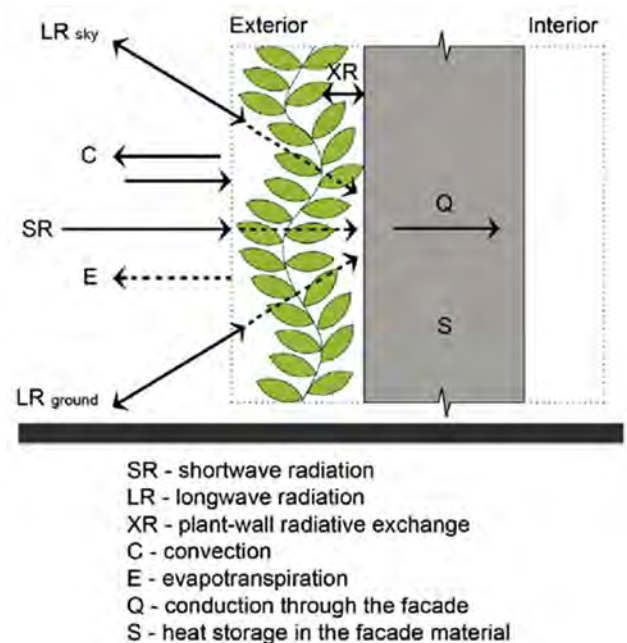


Figure 22 :
 Transferts thermiques considérés dans le modèle de mur végétal développé par [Irina Susorova & al.]

- Les murs végétalisés écartés de près de 1 m de distance du bâtiment améliorent l'effet de rafraîchissement par convection des murs (cf. [Kyra Koch & al.]).
- Il semble que le lit végétalisé constitue un obstacle à la circulation de l'air et donc à la convection nocturne, ce qui limite la décharge thermique de la chaleur accumulée en journée et rend cette solution moins intéressante pour les climats chauds. Quelques expériences ont tenté de forcer la circulation d'air au travers du feuillage des végétaux (cf. [Kyra Koch & al.]). La température de surface du mur protégé diminue en journée mais le rideau végétal lui rend de la chaleur durant la nuit (cf. [R. Sendra-Arranz & al.]). Il pourrait donc être opportun de mixer les solutions techniques comme le mur végétal et la ventilation naturelle pour additionner leurs effets de rafraîchissement.

- On relève aussi un effet de tampon thermique du rideau végétal avec un déphasage retard des pics de température sur les murs protégés par rapport aux murs nus (cf. [Marie-Therese Hoelscher & al.]) et [R. Sendra-Arranz & al.]). Le déphasage du pic de température peut atteindre de 2 à 4 heures (cf. [Julia Coma & al.] et [R. Sendra-Arranz & al.]).
- Le niveau de rafraîchissement des bâtiments protégés par les murs végétalisés et la répartition des principaux phénomènes naturels y contribuant dépendent de l'espèce végétale (cf. [Kyra Koch & al.]). De nombreuses études se sont penchées sur les questions des différentes natures de végétaux utilisés, et montrent que les paramètres tels que la taille des feuilles et le rapport de surface entre végétal et mur protégé influence la performance en matière de rafraîchissement.

En plein été, le rafraîchissement généré par le mur végétal se répartit entre l'effet d'ombrage et le phénomène d'évapotranspiration suivant les proportions suivantes : le 02/08/2013 à 14H00 la puissance de rafraîchissement totale est mesurée à -585,6 W/m² dont 87% par l'ombrage et 13% pour l'évapotranspiration. Sur des journées d'été complètes avec plus ou moins d'irradiance solaire globale, l'équilibre s'établit à 81,5% contre 18,5% respectivement, pour l'effet d'ombrage et l'évapotranspiration sur le mur végétalisé du bâtiment A (cf. [Marie-Therese Hoelscher & al.]).

Où :

- T_p : réduction totale de température apporté par le mur végétalisé
- T_{psh} : réduction de température due à l'ombrage
- T_{pet} : réduction de température due à l'évapotranspiration des plantes
- T_m : réduction de température due à l'évaporation au niveau du sol/substrat

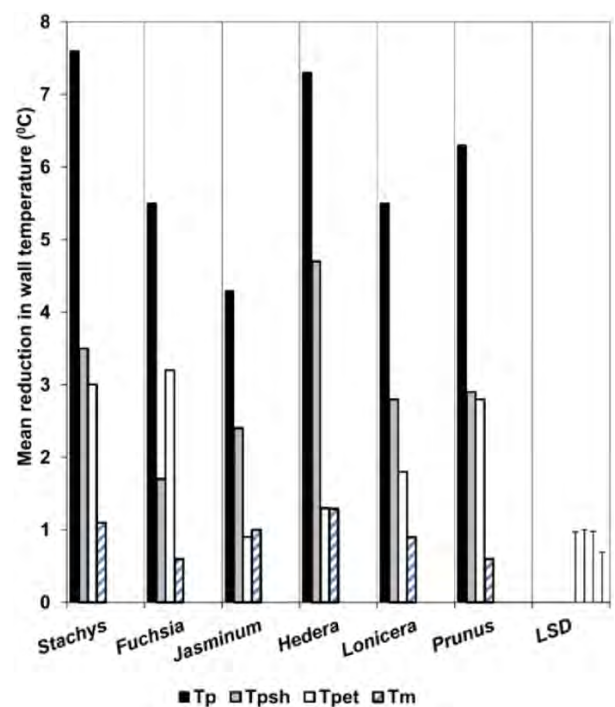


Figure 23 : Comparaison des contributions au rafraîchissement en fonction de l'espèce végétale [Kyra Koch & al.]

- En période nocturne, seul le phénomène d'évapotranspiration permet d'obtenir un effet de rafraîchissement relativement faible, dépendant de l'espèce végétal cultivée et de son irrigation : mesuré entre -1,5 W/m² et -60,6 W/m² (cf. [Marie-Therese Hoelscher & al.]).
- Les murs végétalisés engendrent des économies d'énergies pour les besoins de rafraîchissement. Les gains annuels en énergies, mesurés ou calculés, et obtenus par les murs végétalisés varient entre 20% et 33% des besoins en froid annuels des bâtiments sans cette protection (cf. [Kyra Koch & al.] à partir de 23 études différentes parmi lesquelles de nombreux modèles et des mesures réelles).

[Marie-Therese Hoelscher & al.] ont mesuré les flux sur les murs (portions protégées et nues) des trois bâtiments A, B et C de l'université technique de Berlin (voir détail plus haut). Pour le mur végétal du bâtiment C, et les

plantes *F. baldschuanica*, le pic de rafraîchissement total mesuré est de $-755,8 \text{ W/m}^2$ le 3/09/2014 à 15H30 avec une répartition 79,4% contre 21,6% respectivement pour l'effet d'ombrage et l'évapotranspiration. Pour une journée d'été complète et cette plante, l'évapotranspiration participe au rafraîchissement jusqu'à hauteur de 39,9%. Pour une période globalement ensoleillée de 13 jours du 03 au 15/09/2014, température moyenne de $19,2^\circ\text{C}$, l'évapo-transpiration peut monter à 47,5% de participation au rafraîchissement avec un pic à 73% pour $-79,5 \text{ W/m}^2$ de rafraîchissement total, le 12/09/2014 qui était une journée nuageuse.

[Julià Coma & al.] se sont intéressés aux économies d'énergies dues à la mise en œuvre de murs végétalisés (idGF et LWS) en réalisant une analyse comparative expérimentale à Puigverd de Lleida (Catalogne, Espagne) bénéficiant d'un climat chaud tempéré, été sec et très chaud). Les murs Est, Sud et Ouest de deux cubes expérimentaux identiques (dim. : $3 \times 3 \times 3 \text{ m}$), réalisés en briques creuses d'épaisseur 30 cm, plâtre, mortier de ciment et non-isolés, étaient recouverts entièrement de idGF ou LWS, tandis que les murs du troisième cube n'étaient pas protégés (référence).

Les résultats obtenus montrent une diminution des besoins en climatisation des cubes expérimentaux de 58,9% et 33,8% par rapport au cube référence, respectivement pour les cubes idGF et LWS. De plus, la consommation énergétique pour la climatisation des cubes expérimentaux est réduite de 23,4% et 19,4% par kWh/jour d'irradiance solaire supplémentaire respectivement pour les végétaux de type idGF et LWS.

Ces résultats ne peuvent pas être directement extrapolés aux bâtiments réels car l'ensembles murs Est, Sud et Ouest ne peuvent être entièrement protégés et recouverts de rideau végétal. De plus, ces cubes ne bénéficient d'aucune ouverture vitrée.

- Les réductions de température entre l'air ambiant et le mur protégé par un lit végétal vont de quelques degrés Celsius à une quinzaine de degrés voire plus.

Les écarts de températures mesurés par [Marie-Therese Hoelscher & al.] entre les rideaux de végétal et les murs nus sont substantiels, en moyenne : $-3,3^\circ\text{C}$, $-3,7^\circ\text{C}$ et $-2,4^\circ\text{C}$ sur les murs des trois bâtiments A, B et C (voir définition ci-dessus), avec respectivement des pics à $-11,3^\circ\text{C}$, $-12,3^\circ\text{C}$ et $-6,6^\circ\text{C}$ (enregistrés à l'été 2013). Les écarts de température de surface mesurés entre les murs protégés et les murs nus sont encore plus importants : $-15,5^\circ\text{C}$ (avec une température de surface du mur nu mesurée jusqu'à $51,5^\circ\text{C}$), $-13,9^\circ\text{C}$ et $-10,5^\circ\text{C}$, respectivement pour les bâtiments A, B et C (cf. [Marie-Therese Hoelscher & al.]).

[R. Sendra-Arranz & al.] ont mesuré des températures en différents points de la façade d'un bâtiment et de sa structure végétalisée additionnée. Cette deuxième peau du bâtiment est à la fois une protection solaire de l'enveloppe béton du bâtiment et supporte les végétaux et le substrat nécessaire. Elle est réalisée en plaques de métal percées. Le bâtiment universitaire objet de l'étude est situé à Madrid (Espagne) et le mur végétalisé est de type LWS avec un espace d'air libre entre les végétaux et l'enveloppe du bâtiment de 20 cm. Les différences de températures mesurées sur le mur protégé par le végétal et sur le mur nu atteignent 7°C en été et 2°C en hiver sur la façade Sud. Cette étude a également permis de constater que ces mêmes différences de températures sont insignifiantes durant les nuits en toutes saisons excepté l'été où elles se situent entre 2 et 4°C . Les différences de températures mesurées sur la deuxième peau du bâtiment, structure métallique avec ou sans végétaux sont encore plus importantes : jusqu'à 20°C en été et 8°C en hiver.

Tableau 2 : Gains en températures en fonction du climat entre la portion de mur protégée et le mur nu, en été et en automne. Valeurs issues d'une méta-analyses de plusieurs études s'intéressant aux murs végétalisés [Kyra Koch & al.]

Climats	Différences de température entre la portion de mur protégée et le mur nu, resp. en été et automne	
	$\Delta T_{\text{été}}$	$\Delta T_{\text{automne}}$
Climat continental – étés chauds et humides	$-13,5^\circ\text{C}$	-
Climat océanique tempéré	-13°C	-4°C
Climat continental – étés très chauds et humides	$-12,5^\circ\text{C}$	-
Climat subtropical humide	-8°C	-2°C

Climat méditerranée – étés très chauds : $\Delta T_{\text{été}}$	-16,5°C	-1°C
Climat méditerranée – étés chauds	-15°C	-
Moussons – influences subtropicales	-5°C	-

- Le niveau d'irrigation influence la proportion de l'évapotranspiration sur le rafraîchissement global. Un débit minimum est proposé 2,5 l/(m².j) pour améliorer l'effet de rafraîchissement du mur végétal (cf. [Marie-Therese Hoelscher & al.]).
- Les murs végétalisés n'influencent pas réellement l'inertie des bâtiments et des structures protégées (cf. [Julia Coma & al.]).

Les murs végétalisés réduisent de façon plus importante la charge de climatisation nécessaire en été qu'ils n'augmentent les besoins de chauffage en hiver.

D'autres études s'intéressent à d'autres indicateurs de performance, comme le bien-être, la qualité de l'air, l'hygrométrie, et montrent d'une manière générale, que les femmes y sont plus sensibles que les hommes, et que les murs végétalisés apportent plus d'humidité. Dans le contexte du réchauffement climatique, la question de l'évolution de l'humidité est à étudier de près car une humidité trop élevée ou trop basse aggraverait les conditions de vie.

La limitation des apports solaires en utilisant une façade végétalisée présente les avantages suivants :

- Il n'y a pas besoin de stratégie de protection solaire.
- Effets d'ombrage et évapotranspiration par les plantes participant au rafraîchissement des bâtiments.
- Résistance thermique additionnelle pour les températures extérieures les plus fraîches.

La limitation des apports solaires en utilisant une façade végétalisée présente les inconvénients suivants :

- Faible impact sur la limitation des apports de chaleur.
- Besoins accrus de chauffage en hiver.
- On n'a pas de contrôle sur la protection solaire qui n'est pas toujours souhaitable.
- La résistance thermique apportée par le mur végétalisé diminue fortement avec l'augmentation de la température extérieure
- Nécessite un entretien régulier.
- Coût des murs végétalisés de type LWS, avec structure porteuse et substrat : 300 à 500 €/m², soit plusieurs dizaines de milliers d'euros pour une façade de 20 x 5 m

2.4.5. Isolation

Si l'isolation renforcée des bâtiments permet de réduire de façon significative les besoins en chauffage, elle peut également protéger des canicules mais sous réserve d'une gestion appropriée de la ventilation et des occultants.

[Preventing overheating – Taylor, M.] recense des facteurs de risque qui conduisent à ces surchauffes :

- « appartement bien isolé et étanche » ou « appartements bien isolés mais sous ventilés »,
- « espaces équipés de vitres tout hauteur, orientées Sud ou Ouest ou sans protection solaire »,
- « manque de ventilation ou un excès de chaleur dans les couloirs, les escaliers et les parties communes »,
- « le problème de surchauffe est plus largement répandu dans les petits appartements, ou ceux qui sont surpeuplés ».

Quelques études expérimentales soulignent le risque de surchauffes dans des bâtiments isolés mais il s'agit toujours de cas qui, soit n'intègrent pas le comportement des usagers (fermeture des protections solaires et ouverture des fenêtres), soit ne concernent pas des températures extrêmes (< 28°C max).

- [M. Orme & J. Palmer] font état des résultats obtenus sur les quatre maisons expérimentales du BRE situées à Watford (R.U.) avec un niveau d'isolation supérieur au « 1995 standards », deux maçonneries en brique et blocs béton, et deux autres en structures bois plus légères. L'expérience a montré que des conditions extérieures de 29°C conduisaient à des températures intérieures de 39°C avec un taux de ventilation faible combiné à des apports internes et solaires conséquents.
- [Larsen, T.S. & Jensen, R.L.] ont instrumenté et suivi une dizaine de maisons passives situées à Vejle (Danemark), conçues pour une consommation en énergie primaire inférieure à 120 kWh/an avec un taux de ventilation de 0,3 vol/h. Ils ont pu mesurer l'évolution des températures intérieures sur 30 mois à partir de mars 2009. Pour une maison de 145 m², HSP = 2,5 m, mur sandwich constitué de briques renfermant 380 mm d'isolation, la ventilation de 0,34 vol/h était poussée à 0,425 vol/h durant le premier mois et ½ des mesures, les températures intérieures augmentent progressivement de 21°C à 27°C entre le 1er et le 30/04/2009 avec des variations jour/nuit de l'ordre de 2 à 4°C alors que la température extérieure maximale journalière augmentait progressivement de 11°C à 21°C avec des amplitudes jour/nuit de 6 à 18°C. Le plancher chauffant n'a démarré que trois fois sur le premier mois et ½ des mesures pour une consommation totale de 23 kWh.

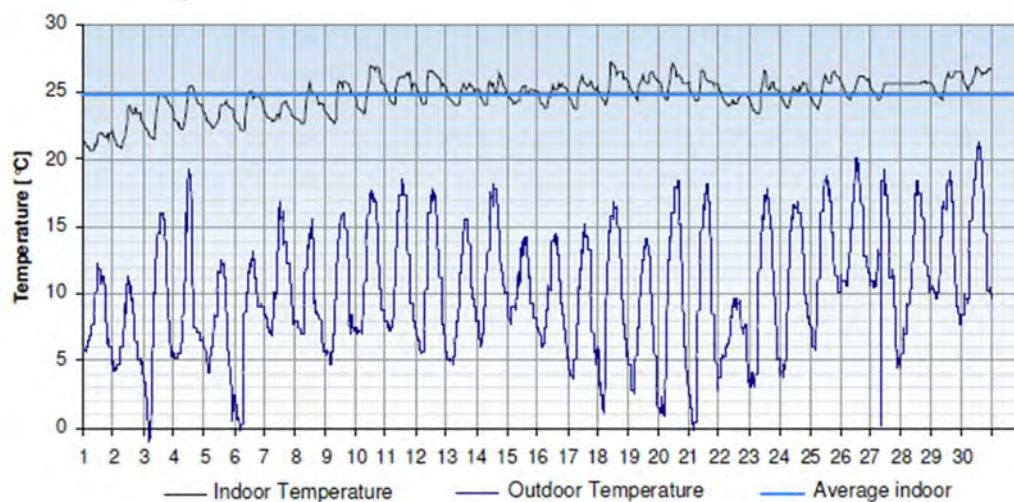
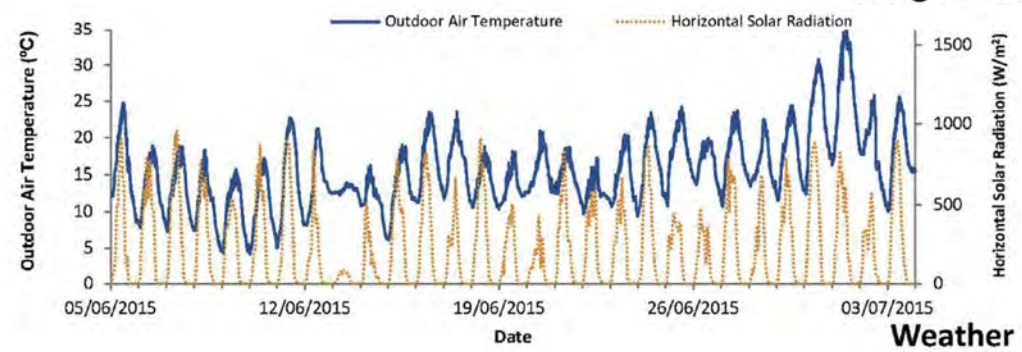
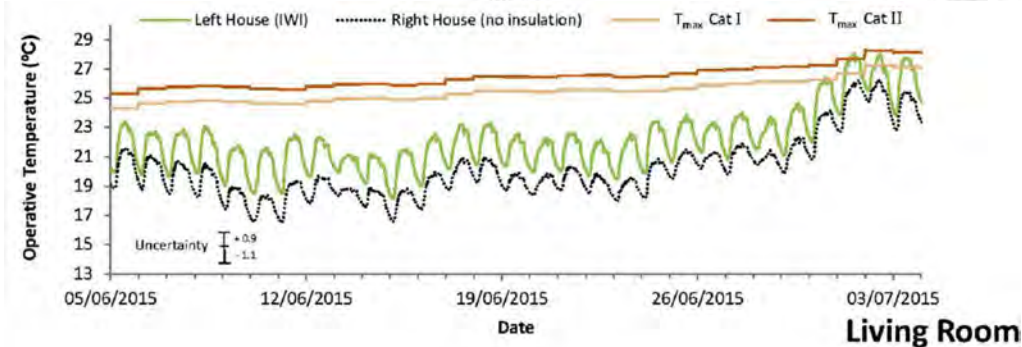
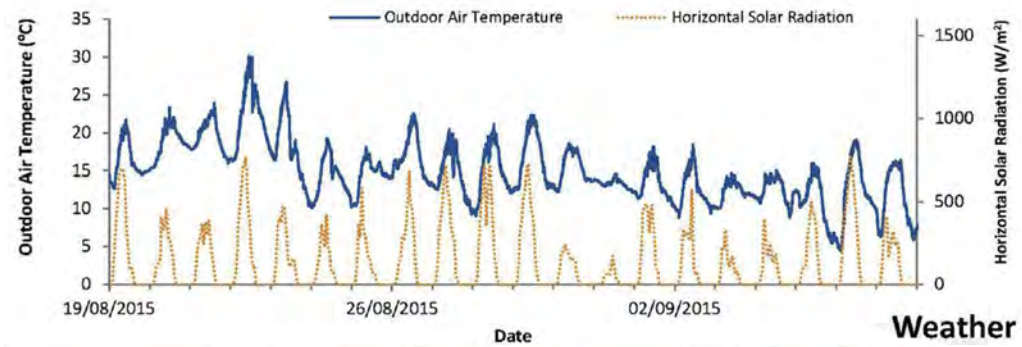
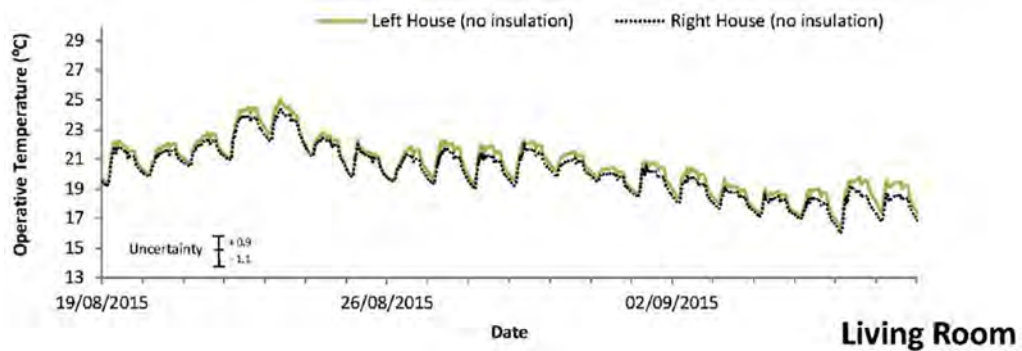


Figure 24 : Mesures des températures intérieures et extérieures durant le mois d'avril 2009 [Larsen T.S. & Jensen R.L.]

Si les maisons passives ont permis de vérifier une excellente qualité d'air intérieur obtenue avec des taux de renouvellement autour de 0,3 vol./h, le principal problème rencontré est celui des surchauffes au printemps avec un angle d'incidence solaire faible, des protections solaires et une ventilation insuffisantes (une avancée de toit d'environ 1 mètre protège les baies vitrées du rayonnement solaire estival).

- [Victoria Tink & al.] ont mesuré les températures intérieures dans une construction constituée de deux maisons d'un étage, jumelées par un côté, construites en 1910 et situées à Leicestershire (R.U.). Les murs extérieurs de construction massive sont en briques pleines d'épaisseur 23 cm pour un coefficient $U = 1,7 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, les vitrages sont de type double et à basse émissivité avec un $U_w = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, le toit est isolé par 30 cm de laine de verre en soupente et un $U = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ et les maisons sont posées soit sur un sol suspendu avec des poutres $U = 0,84 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, soit sur une dalle béton $U = 1,25 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Les apports internes simulant une occupation ont été créés de manière uniforme dans les maisons pour les besoins des tests. Les tests ont été réalisés en trois étapes : l'une des maisons est équipée d'une isolation intérieure / gestion des apports solaires (fermeture des volets de la façade SSE) et ventilation naturelle traversante de 17H30 à 08H00 pour les deux maisons, isolée et non-isolée, (ouverture de 45° des trois fenêtres à l'étage, 0,51 m² + 0,29 m² + 0,24 m² et ouverture des portes intérieures) / comparaison des deux maisons identiques, sans isolation.



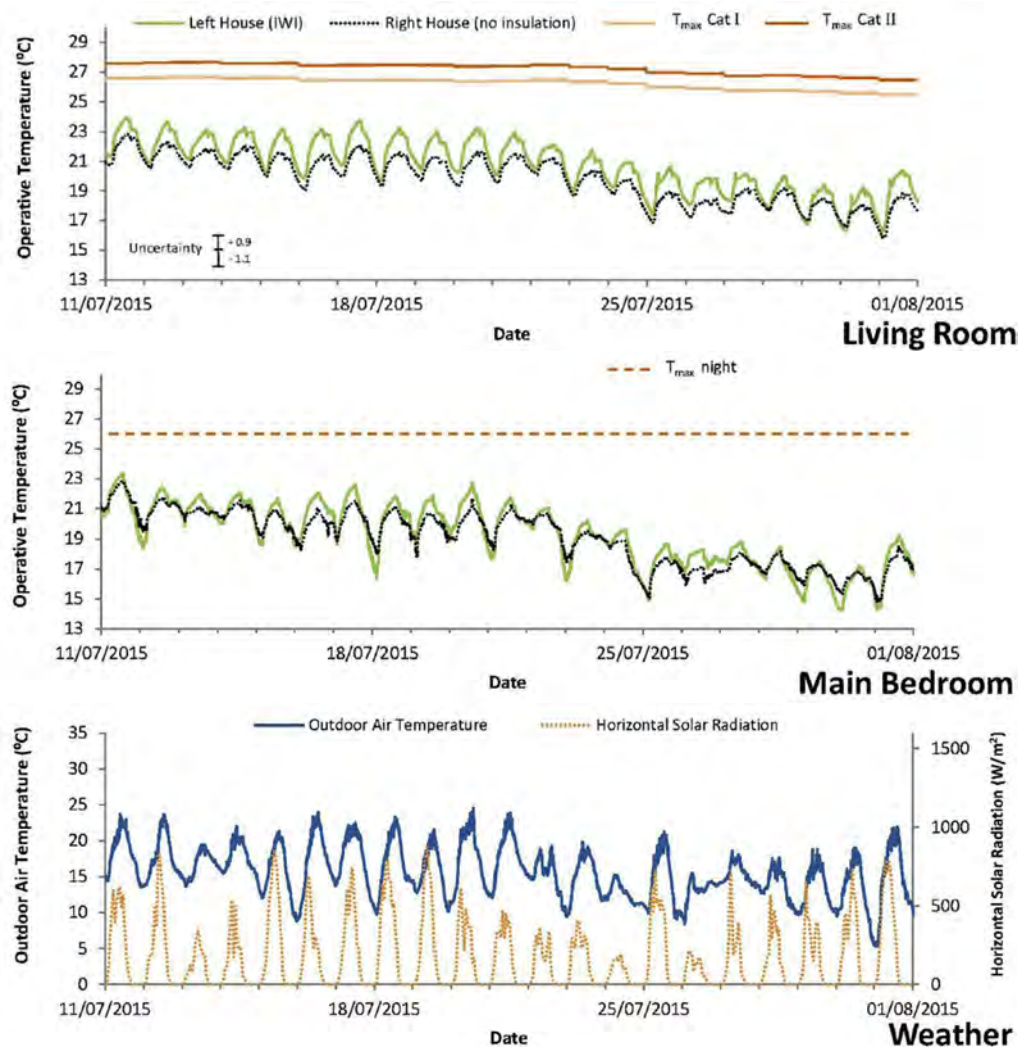


Figure 25 : $T^{\circ}\text{C}$ opérative intérieure séjour des maisons isolée (IWI) ou non (no insulation) – trois tests [V. Tink & al.]

Dans cette étude, l'isolation a été posée à l'intérieur ce qui réduit l'inertie thermique de la maison, et par conséquent l'intérêt de la surventilation nocturne. Les résultats montrent d'une part, une surchauffe de l'ordre de $1,5^{\circ}\text{C}$ à $2,2^{\circ}\text{C}$ dans la maison isolée et moins inerte par rapport à sa maison jumelle, et d'autre part, que les mesures correctives sur les apports solaires et la ventilation nocturne ont permis de rapprocher le niveau de confort thermique en température opérative des deux maisons expérimentales.

- Ce problème de surchauffe est également évoqué dans le cadre d'un retour d'expérience au Danemark [Daria Zukowska & al.], où la rénovation d'un ensemble de logements construit dans les années 1850-1900 a permis d'économiser 60% des besoins en énergie de chauffage mais en même temps a généré un problème de surchauffe estivale. La simulation thermique permet d'envisager une réduction des surchauffes de 74% à 92% par l'ajout de protections solaires extérieures appropriées.
- Une autre étude [K.M.S. Chvatal & H. Corvacho] basée sur la simulation prenant en compte différents scénarii de ventilation et de gestion des protections solaires souligne que l'augmentation de l'isolation doit s'accompagner d'une gestion adéquate des protections solaires, et même des apports internes.

Au contraire, d'autres études montrent l'intérêt de l'isolation pour réduire les besoins en froid ou en rafraîchissement des bâtiments et s'intéressent à la position de l'isolant dans les murs et surfaces enveloppe des bâtiments. La position de l'isolant dans les murs extérieurs, face interne ou externe ne semble pas

déterminante pour la consommation liée aux besoins en froid, sans doute grâce à la présence de dalles qui apportent une inertie thermique suffisante et si les ponts thermiques générés par une isolation intérieure restent limités. La consommation de climatisation dépend d'autres facteurs influents comme l'orientation des façades du bâtiment et ses usages (apports internes).

D'après [M. Bojic & al.], la mise en œuvre d'une isolation thermique intérieure, ITI, permet de réduire les besoins annuels en froid. L'ajout d'une couche d'isolation intérieure de 5 cm permet de diminuer les besoins annuels en froid d'environ 6,5% (résultats de simulation HTB2 sur deux appartements type T3 et T4 situé à Hong Kong). L'installation d'une épaisseur d'isolant sur la face extérieure de l'enveloppe du bâtiment, ITE, ou au milieu des parois structurales ne conduit pas forcément à la réduction des besoins en froids. Cela dépend des dimensions du logement et de son inertie thermique rapportée à son volume. Ainsi, pour un appartement de type T3 situé à Hong Kong, [M. Bojic & al.] montrent par la simulation qu'une isolation extérieure et au milieu des parois de 5 cm d'épaisseur conduirait à augmenter les besoins de rafraîchissement annuels de 2 à 3%.

La position et l'épaisseur de l'isolation ont été étudiées par [M. Bojic & al.] à l'aide de l'outil de simulation détaillée HTB2 sur deux appartements de Hong Kong avec différentes orientations, et divers scénarii d'occupation. L'étude montre que l'ajout d'un isolant côté intérieur ou extérieur des murs enveloppe permet de réduire la demande en rafraîchissement. Elle précise que ce sont les 5 premiers centimètres d'isolant qui sont les plus efficaces pour des structures lourdes d'au moins 10 cm d'épaisseur de béton. Les modèles représentent des appartements du T3 au T4 équipés de climatiseurs dans le séjour et les chambres.

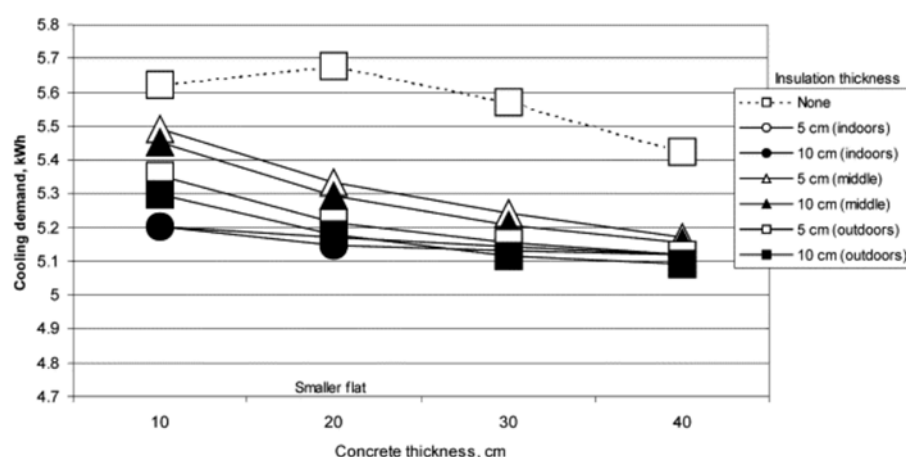


Figure 26 : Besoins de climatisation annuels VS épaisseurs murs et isolant – T3 situé à Hong-Kong [M. Bojic & al.]

Dans une autre étude [M. Bojic & al.] conseillent d'isoler les murs intérieurs et les portes séparant les pièces climatisées du volume restant afin de diminuer les besoins en froid.

[Jiandong Ran & al.] ont étudié l'évolution des températures dans des logements situés à Chongqing (Chine) avec différents niveaux d'isolation sur les toits, en prenant en compte l'usage local d'une climatisation intermittente avec régulation à 26°C en présence des occupants (de 22H à 2H00) puis de la ventilation naturelle dès lors que la température extérieure redescend sous 30°C.

L'étude met en évidence que l'épaisseur et la position intérieure ou extérieure de l'isolant en toiture peut être questionnée par l'utilisation de la ventilation naturelle. Le fait que le logement se réchauffe fortement lors du pic de température quotidien, jusqu'à 33°C ou 32°C (isolation intérieure, isolation extérieure), et en l'absence des occupants conduit à une augmentation des besoins en froid pour la période occupée suivante du fait de la charge thermique accumulée dans la structure de la dalle haute en béton armée en particulier pour les épaisseurs d'isolant supérieure à 50 mm.

En fonction de l'épaisseur d'isolant ajouté à la toiture en béton, la réduction des consommations énergétiques pour les besoins en froid peut ainsi atteindre 50% et 40% respectivement avec l'isolation intérieure ou extérieure. [Jiandong Ran & al.] notent aussi que l'utilisation de béton cellulaire en lieu et place de l'isolation extérieure avec la même stratégie de refroidissement (climatisation intermittente + ventilation naturelle) donne des résultats proches en terme d'économie d'énergie et de confort thermique.

[Naouel Daouas] étudient l'influence de l'épaisseur d'isolant sur le flux thermique traversant des parois d'un logement pour différentes orientations sous le climat Tunisien (climat doux). Le bâtiment est en construction traditionnelle avec des murs double peau (deux briques creuses entre lesquelles la couche d'isolation est positionnée). L'étude montre que les gains énergétiques en chaud ou en froid se situent autour de 85% de réduction des flux thermiques à combattre et donc sur les besoins en chaud et froid pour l'épaisseur optimum d'isolant qui se situe entre 10 et 12 cm (optimisation énergétique et économique).

[André Badura & al.] montrent par la simulation validée sur des mesures réelles que l'isolation, sa position et ses performances permettent de réduire significativement les besoins en chaud et en froid en fonction du climat, des usages et du pilotage des systèmes enveloppes. Les auteurs proposent l'utilisation de systèmes enveloppe adaptatifs qui alternent leurs positions en façade en fonction de la température extérieure, du « Predicted Mean Vote » (PMV) défini dans la norme NF EN ISO 7730 et qui dépend de la température ambiante, de la température radiative, de l'hygrométrie, de la vitesse de l'air, de la vêtue ainsi que de l'activité des occupants. Sur l'étude de cas proposée, en façade Sud, les économies d'énergie sont de l'ordre de 30%.

[H. Asan] a étudié l'influence de la nature de l'isolant (mousse de polyuréthane, liège, élastomère), son épaisseur et sa position, mais aussi celle du matériau structural constituant le mur extérieur (béton, bois) sur le comportement thermique de la paroi au travers du facteur de réduction des températures défini ci-après. Le rapport d'isolation correspondant au ratio de résistance thermique d'un mur isolé conservant une même épaisseur totale : 20 cm pour les épaisseurs d'isolant de 0 à 20 cm. Lorsque l'épaisseur d'isolant était augmentée, la structure est réduite d'autant. Ce rapport est exprimé en %.

Le facteur de réduction, f est défini comme le rapport de l'amplitude des températures de surface sur la face intérieure du mur par rapport l'amplitude des températures sur la face extérieure du même mur.

$$f = \frac{AT_i}{AT_e}$$

[H. Asan] montre notamment par un modèle numérique discrétisé 1D :

- Une légère diminution du facteur de réduction f pour la position de la couche d'isolation sur la face extérieure du mur plutôt que sur la face intérieure.
- Une tendance générale à la diminution du facteur de réduction f avec l'augmentation du rapport d'isolation. Ceci peut être interprété comme un resserrement des variations de la température intérieure par rapport aux stimulations extérieures. Mais ce comportement peut varier de façon significative en fonction notamment des matériaux du murs (béton ou bois) et de l'isolant (Polyuréthane PU, liège et élastomère). Par exemple, l'augmentation de l'épaisseur de polyuréthane conduit à une augmentation du facteur de réduction dès lors que l'épaisseur d'isolant dépasse un seuil autour de 10% à 20% du ratio d'isolation, ce qui représente de 1,7 à 3,7 cm d'isolant PU ($\lambda \approx 0,03 \text{ W/(m.K)}$) pour respectivement 18 à 16 cm de béton ($\lambda \approx 1,7 \text{ W/(m.K)}$). Cette augmentation s'inverse avec l'épaisseur d'isolant au-delà d'un seuil de 90% du ratio d'isolation. Ce comportement est moins net pour l'isolant liège et n'existe pas pour l'isolant le moins performant en élastomère.
- Pour l'isolant polyuréthane PU, le comportement décrit précédemment avec le matériau bois disparaît lorsque l'épaisseur d'isolant est répartie en deux couches uniformément réparties sur les faces intérieure et extérieure du mur.
- Les facteurs de réduction varient entre 0,02 et 0,14 pour un mur en structure béton de 20 cm et différentes épaisseurs d'isolation. Comme exemple concret, l'amplitude des températures intérieures pour une isolation PU ou liège de 10 cm intérieur sur un mur en béton de 10 cm atteindrait 0,6°C avec une amplitude des températures extérieures de 20°C, voire 0,4°C pour la même isolation située sur la face extérieure du mur en béton. Pour une structure en béton, l'amplitude des températures de surface intérieure du mur varierait dans un rapport situé entre 0,006 et 0,022, soit environ 0,16°C ou 0,12°C pour un isolant PU ou liège de 7 cm, respectivement positionné à l'intérieur et à l'extérieur du mur bois d'épaisseur 13 cm.

[F. Stazi & al.] ont instrumenté des bâtiments massifs de différentes époques (1945, 1974, 1974 rénové 1990), situés sous le climat italien (zone D - 2010). Les caractéristiques constructives des bâtiments sont : maçonnerie en brique pleine d'épaisseur 48 cm (W1) / brique creuse ép. 8 cm – cavité 9 cm – parpaing plein ép. 14 cm (W2)

/ brique creuse ép. 8 cm + cavité de 9 cm + brique creuse ép. 12,5 cm + isolant ép. 5 cm (W3). Les enregistrements montrent que si une isolation quelle que soit sa position augmente la température de surface externe du mur isolé en période estivale par rapport au même mur sans isolation, la température ambiante intérieure reste inférieure en journée à la température extérieure et elle est plus basse avec la présence d'isolant dans le mur.

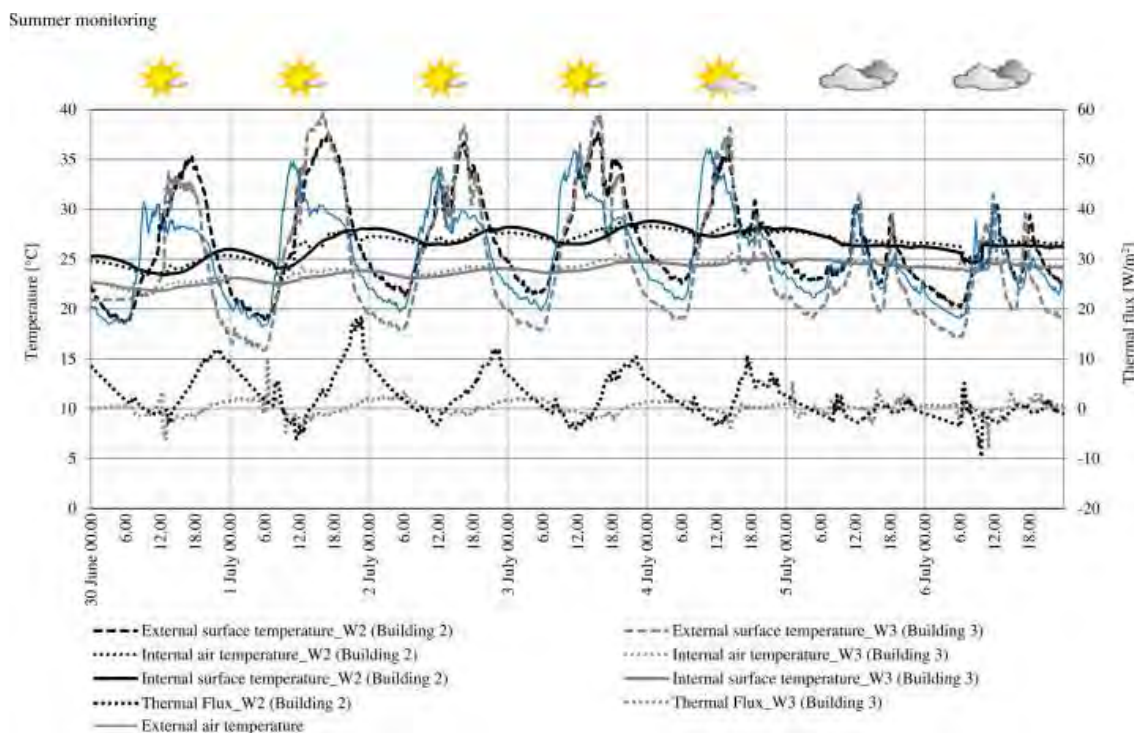


Figure 27 : Mesures de t°C du 30/06 au 06/07/2010 pour les murs W2 (non isolé) et W3 (isolé) "as built" - [F. Stazi & al.]

De plus, avec l'appui de simulations sur des modèles réalistes EnergyPlus, [F. Stazi & al.] recommandent de ventiler l'isolant par une lame d'air intérieure en condition estivale.

L'isolation contribue à limiter les échanges thermiques traversant l'enveloppe extérieure des bâtiments et donc les apports entrant par les parois opaques, mais elle peut aussi bloquer l'évacuation d'un trop plein de chaleur lorsque les apports internes ou solaires sont mal contrôlés. L'isolation thermique a une réelle utilité lorsqu'elle est associée à une bonne gestion des protections solaires et des systèmes dissipatifs comme la ventilation naturelle traversante.

Concernant la position préférentielle de l'isolant dans les murs extérieurs, pour un logement qui ne serait pas équipé de climatiseur ou d'un autre moyen de rafraîchissement actif, il apparaît intéressant d'envisager une isolation extérieure, ITE, associé à une ventilation naturelle traversante afin de profiter de l'effet d'inertie de la structure des murs dans le logement. Ce choix sera également influencé par l'orientation des façades, les apports internes et le coefficient de forme du bâtiment (cf. §2.4.7). Pour les logements équipés de systèmes de climatisation actifs, l'isolation intérieure, ITI, semble plus performante [M. Bojic & al.] mais cet article n'indique pas si les ponts thermiques générés par l'ITI ont été pris en compte lors de la comparaison avec l'ITE.

2.4.6. Inertie thermique

L'inertie thermique correspond à la capacité de stocker l'énergie. Elle permet de stocker des apports solaires et internes en hiver, ce qui réduit les besoins de chauffage. En été, la chaleur stockée le jour peut être évacuée la nuit en cas de surventilation nocturne, et une forte inertie réduit l'élévation de température dans la journée.. Ce stock pourra être préservé des déperditions / apports extérieur-e-s, notamment par l'ajout d'une isolation adaptée. Par ailleurs, la notion de stockage est fortement liée à son volume ou à sa capacité d'absorption. On peut en déduire que l'inertie thermique joue un rôle plus ou moins bénéfique pour le confort thermique des occupants.

Le CEA a étudié numériquement à partir d'un modèle calibré sur les mesures, l'évolution du comportement thermique d'une maison expérimentale INCAS située au Bourget-du-lac (73) en fonction de l'inertie du bâti, et de sa répartition. Il en résulte :

L'effet positif ou négatif de l'inertie thermique dépend de plusieurs facteurs comme le climat, l'exposition et le coefficient de forme ainsi que les usages du bâtiment.

- Les premiers centimètres de matériau inertiel peuvent être efficaces pour assurer le confort thermique d'été lorsque les apports solaires et internes journaliers ne suffisent pas à charger complètement le stock d'inertie. C'est notamment le cas pour des climats méridionaux et des bâtiments d'habitation bénéficiant d'une ventilation nocturne suffisante (>3 vol./h) leur permettant d'évacuer les calories stockées durant la journée précédente.
- La surface des matériaux inertiels (dalles, murs, structures) est plus importante que la masse totale inertielle. C'est la surface totale des parois en contact avec le volume du logement à rafraîchir qui fournit la puissance échangée dans l'air ambiant. La faible diffusivité dans les matériaux denses et peu conducteur limite la capacité à mobiliser tout le stock lorsque celui-ci est compact. L'épaisseur de béton intéressé par les échanges est de l'ordre de quelques centimètres.
- Pour des climats très chauds ou caniculaires, l'augmentation de la masse d'inertie thermique permet de diminuer l'inconfort même au-delà des premiers centimètres d'épaisseur.

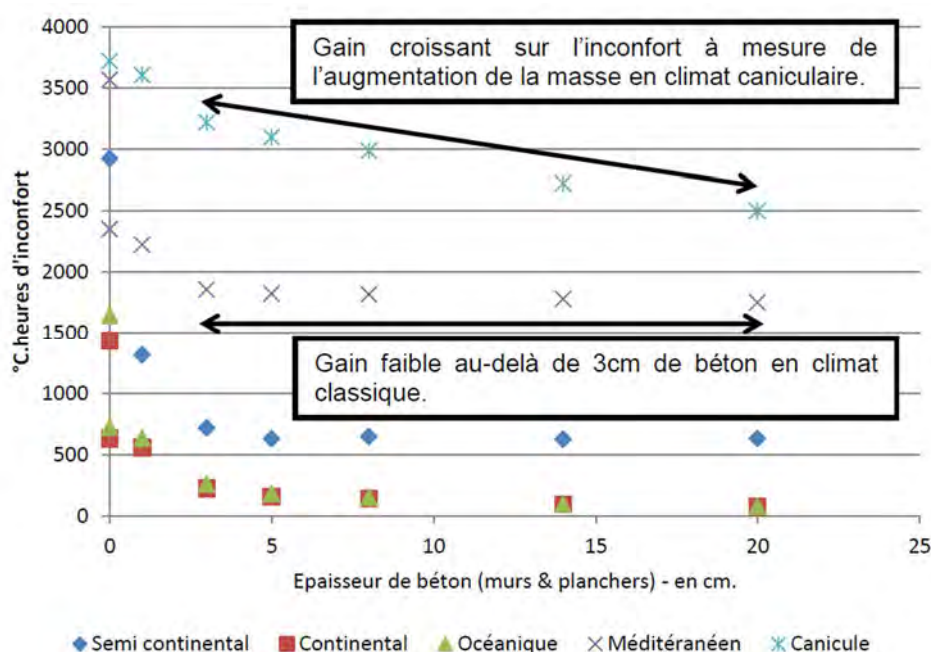


Figure 28 : Degrés.Heures d'inconfort en fonction de la quantité d'inertie [sources : CEA]

La Figure 28 présente les degrés.heures d'inconfort en fonction de l'épaisseur de béton pour une maison individuelle expérimentale et une configuration en ventilation nocturne de 3 vol./h et en protections solaires Sud : volets roulants ouverts, et pour différents climats.

[L. Derradji & al.] ont mis en évidence le potentiel de rafraîchissement considérable qu'il est permis d'espérer en travaillant sur l'inertie thermique des murs extérieurs pour une maison située près de la ville d'Alger. A l'aide des mesures enregistrées in situ et d'un modèle TRNSYS type56, la température ambiante a été simulée pour les deux configurations suivantes : d'une part, le cas réel avec une construction en matériaux pleins issus du sol local et mélangé à 5% de ciment, d'une épaisseur totale de 46 cm et d'autre part, une construction plus classique à base de parpaings creux. La différence de température ambiante intérieure obtenue peut atteindre 4°C, en plein été pour des températures extérieures proches de 36°C. Pour obtenir ce résultat, l'isolation est posée sur la face extérieure des murs de la maison.

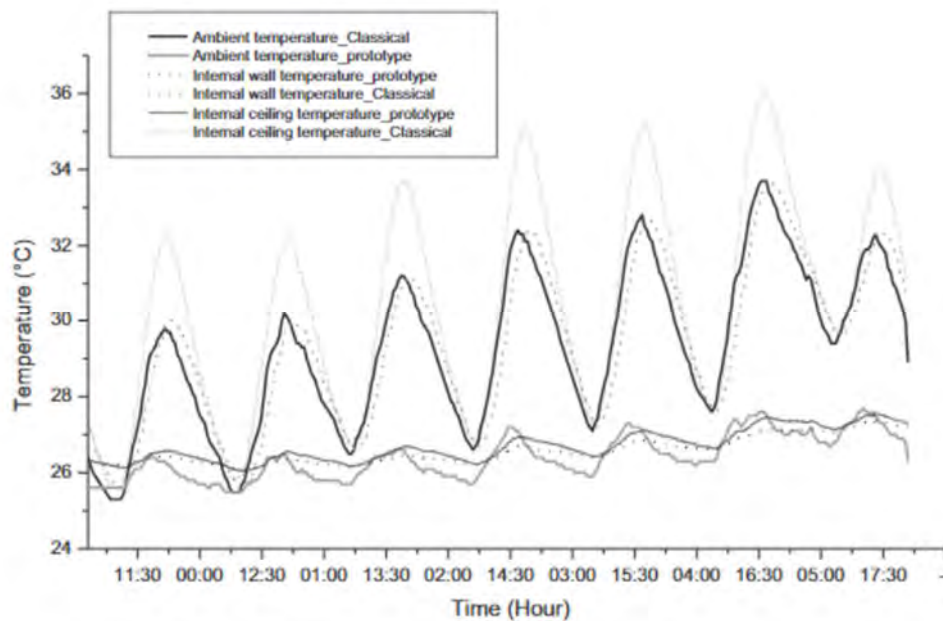


Figure 29 : Evolution de la température intérieure - construction traditionnelle vs parpaings creux - [L. Derradji & al.]

L'utilisation de murs de forte inertie avec une isolation extérieure est recommandée par [L. Derradji & al.] car induisant les plus faibles variations de la température intérieure. Ce choix constructif est conseillé en association avec une ventilation naturelle. Dans une autre étude, [Naouel Daouas & al.] observent le comportement du mur construit en pierre par rapport au mur de brique, deux techniques de construction courantes en Tunisie. La première permet de réduire d'un facteur quatre l'amplitude des variations journalières du flux surfacique traversant les murs Sud et Ouest par rapport à la seconde.

L'inertie thermique des parois extérieures joue un rôle quasi identique à l'isolation dans le sens où elle freine le transfert d'énergie de l'extérieur vers le volume intérieur du bâtiment et vice-versa pour la dissipation d'un trop-plein d'énergie. Mais ces deux solutions techniques se distinguent par le fait que l'inertie d'un matériau est limitée à sa capacité d'absorption maximale. Un matériau à fort potentiel d'accumulation énergétique, une fois chargé thermiquement pourra généralement laisser circuler un flux thermique beaucoup plus important au travers du mur que ne le ferait un bon isolant thermique. De plus, la chaleur absorbée par le matériau inertiel finit toujours pas être restituée dans l'environnement là où la quantité d'énergie absorbée par les couches d'isolation est le plus souvent anecdotique. L'augmentation de l'inertie thermique dans l'enveloppe extérieure des bâtiments se traduit donc généralement par un déphasage et un amortissement du pic de température intérieure par rapport au pic du rayonnement incident extérieur.

[H. Asan] a étudié l'influence de la constitution des murs enveloppe associant l'isolant et les matériaux structuraux sur la réponse thermique de la paroi soumise aux rayonnements solaire et thermique, notamment à l'aide de l'indicateur de déphasage temporel entre le pic de température sur la surface intérieure et la température maximale atteinte sur la face extérieure du même mur. Le déphasage, φ , entre le pic de température face intérieure du mur isolé et le pic de température face extérieure du même mur s'écrit :

$$\varphi = t_{Ti_{max}} - t_{Te_{max}}$$

[H. Asan] montre notamment par un modèle numérique discrétisé 1D :

- Une légère augmentation du déphasage des pics de température intérieure/extérieure pour la position de l'isolant sur la face extérieure.
- Pour certains isolants, liège et élastomère, le déphasage du pic de température intérieure/extérieure croît avec l'augmentation du rapport d'isolation (cf. §2.4.5), donc de l'épaisseur d'isolant dans le mur en béton, quelle que soit sa position. Ce comportement ne se répète pas pour un mur en structure bois.

- Pour l'isolant en mousse de polyuréthane, le déphasage du pic de température intérieure/extérieure croît entre 1H30 et 7 heures avec la diminution de l'épaisseur d'isolation de 20 cm à 0 cm pour le mur en béton et une isolation intérieure ITI. Ce déphasage monte à 8 heures pour un rapport d'isolation extérieure d'environ 10%, correspondant à 2 cm. Le déphasage sur le pic de température intérieure/extérieure est encore amplifié avec une structure bois au lieu du béton : 1H30 à plus ou moins 14H00 en fonction de l'épaisseur d'isolation.

Lorsque les logements sont équipés de systèmes de climatisation actifs, il semble que l'épaisseur des murs extérieurs participe moins à diminuer les besoins en rafraîchissement. Ceci est visible sur une étude s'intéressant à deux appartements situés à Hong Kong [M. Bojic & al.] (voir aussi Figure 26), sachant que dans cette étude la présence de dalles lourdes apporte une inertie thermique importante.

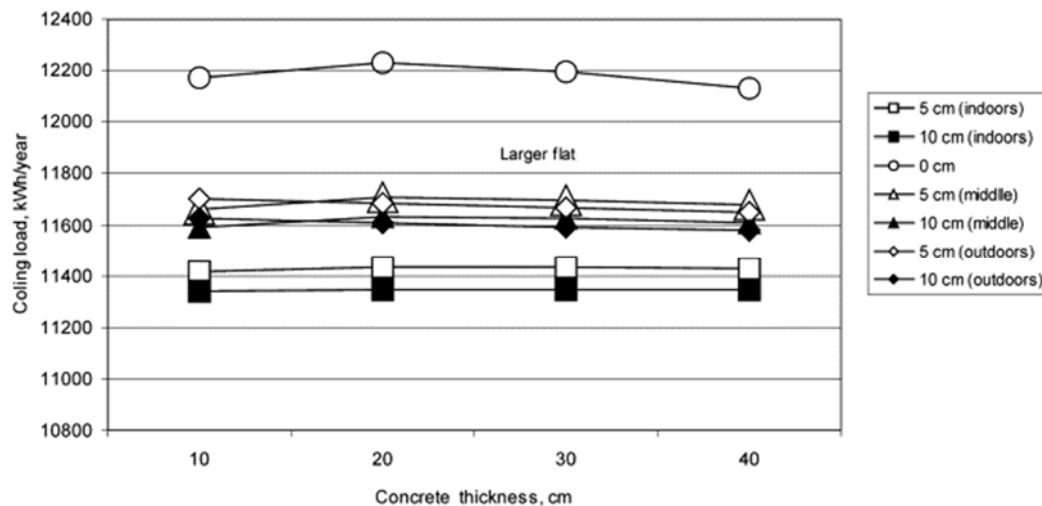


Figure 30 : Besoins en froid annuels pour un appartement de type T4 située à Hong Kong [M. Boji & al.]

Dans son étude, [Naouel Daouas & al.] calcule les variations de flux thermique traversant deux types de parois lourdes en construction traditionnelle exposées au climat doux Tunisien et ce, pour différentes orientations.

Les parois sont constituées des éléments suivants :

- Paroi 1 : plâtre / brique creuse de 15 cm / plâtre
- Paroi 2 : plâtre / mur plein en pierre de 40 cm / plâtre

Les résultats montrent, entre autres :

- Une amplitude des flux thermiques traversant réduite de 79% à 88% suivant l'orientation de la paroi pour le mur traditionnel en pierre
- Des pics de flux thermique réduit de 32% à 42% suivant l'orientation de la paroi
- Un déphasage entre le rayonnement incident normal à la paroi et le pic du flux émis dans l'ambiance du logement de 12 heures et 18 heures, respectivement pour le mur maçonné en brique et pour le mur en pierre. Ceci conduit à décaler le flux thermique à combattre de 20H (mur en briques) à minuit (mur en pierre).

De tels résultats doivent être tempérés par le fait que la charge de refroidissement (besoins en froids) est calculée sur les seuls apports par les surfaces de murs alors que les apports solaires sont principalement transmis par les vitrages. Néanmoins, pour une stratégie qui viserait à orienter le bâtiment de façon à limiter les apports solaires directs, ces résultats seraient parfaitement utiles.

[Christopher Kendrick & al.] ont comparé numériquement à l'aide de l'outil STD TAS le comportement thermique de trois techniques de construction traditionnelles des maisons jumelées typiques du Royaume Uni, comprenant trois chambres. Les différentes maisons n'ont pas montré de divergence thermique importante vis-à-vis des surchauffes estivales pour des scénarii climatiques connus 1990 et des prédictions futures à

l'horizon 2050. L'inertie thermique et donc les techniques de construction peuvent effectivement réduire les surchauffes, mais doivent être adaptées à l'amplitude des épisodes caniculaires et à l'usage des différentes pièces du logement. Quatre constructions différentes ont été étudiées : légère, médium, lourde, lourde+, très lourde.

L'étude fournit les principaux résultats suivants :

- Les charges de chauffage diminuent d'environ 25% pour le climat 2050 par rapport à 1990.
- Les pics de chauffage sont plus faibles pour les constructions lourdes et plus d'environ 7% à 15%
- Les surchauffes dans la chambre sont équivalentes lors des périodes d'occupation. Si le pic de chaleur est plus important en journée pour les constructions médium et légère, celles-ci refroidissent également plus rapidement en début de nuit avec la ventilation naturelle. Il apparaît même que les chambres des constructions légères et médium seront plus fraîches en période d'occupation que les constructions lourdes pour le climat 2050 : réduction de 16% des heures d'occupation où la température est supérieure à 24°C.
- La dynamique est toujours semblable quelle que soit la pièce considérée, elle est plus importante pour les constructions légère et médium et lente voire très lente pour les constructions plus lourdes. Les écarts de température aux pics sont de l'ordre de 2°C.
- L'ajout d'une protection solaire extérieure se montre plus efficace pour le climat futur 2050, avec potentiellement 1°C de gain sur le pic de température dans les maisons de construction légère et médium et 0,5°C pour les constructions plus lourdes.
- L'utilisation de la ventilation mécanique contrôlée permet également de refroidir plus vite les constructions légère et médium.
- L'écart aux pics de température avec le climat 2050 est porté à près de 4°C entre la construction très lourde et celle la plus légère.

[Junli Zhou & al.] introduit le paramètre de température $T_{sol-air}$ qui prend en compte le bilan thermique complet du mur extérieur recevant le rayonnement solaire et réémettant un rayonnement infrarouge.

$$T_{sol-air} = T_0 + \frac{a \cdot I - \Delta Q_{ir}}{h_0}$$

Avec :

- T_0 : température ambiante extérieure, en °C
- a : coefficient d'absorption du rayonnement solaire de la paroi extérieure
- I : irradiance solaire, en W/m²
- ΔQ_{ir} : rayonnement infrarouge échangé entre la température d'air extérieur et la température de ciel (voûte céleste)

[Junli Zhou & al.] ont construit un modèle périodique permettant d'estimer l'impact des capacités thermiques des murs extérieurs et des murs intérieurs sur la température de l'air intérieur dans les bâtiments disposant d'une ventilation naturelle. Ils ont étudié six structures différentes de murs extérieurs comprenant du béton cellulaire ou du béton armé et une couche d'isolation ou non sur la face externe ou interne. Ces différentes typologies de construction ont été exposées au climat très chaud de Changha (Chine).

Les résultats indiquent :

- Les murs de structure lourde avec une isolation extérieure sont adaptés au rafraîchissement des bâtiments dotés d'une ventilation naturelle.
- La température intérieure est plus stable avec les murs isolés sur la face externe, tandis que l'isolation positionnée sur la face interne des murs extérieurs engendre un plus grand déphasage d'apparition des pics de température intérieure.
- Par ailleurs, les structures bâties les plus lourdes augmentent le décalage des pics de températures entre extérieur et intérieur et réduisent l'amplitude journalière et donc les pics de la température d'air intérieur. Lorsque l'isolation thermique est placée sur la face interne des murs, les différences de température intérieure calculée en fonction des structures lourdes ou légères sont négligeables.

Le modèle périodique construit montre des écarts d'environ 1°C sur la température intérieure moyenne et jusqu'à 2°C sur les pics de température d'air intérieur en fonction de la configuration des murs extérieurs étudiés. Les déphasages des pics de température intérieure s'étalent de 2 à 5 heures par rapport au pic de température extérieure et suivant le type de construction retenue.

La capacité thermique structurelle des bâtiments participe à réduire les surchauffes par son effet tampon sur le flux de chaleur mais une fois que les parois extérieures ont été chauffées par la combinaison des apports solaires et internes, il faut être capable de dissiper ce trop-plein d'énergie, ce qui peut être obtenu par une ventilation naturelle traversante.

2.4.7. Zonage thermique et exposition

L'agencement des différents locaux en fonction de leurs gains internes, des temps d'occupation prévisibles et de leur exposition peut aussi être une manière d'organiser un gradient de température des pièces chaudes vers les pièces plus fraîches.

Une autre approche du zonage thermique qui est une manière efficace de réduire les consommations passe par la réduction des volumes habitables à chauffer ou rafraîchir.

Le coefficient de forme est défini comme le rapport entre le volume habitable climatisé et la somme de toutes les surfaces en contact avec l'extérieur, le sol ou des espaces non chauffés, constituant l'enveloppe du bâtiment. [Tiberiu Catalina & al.]

$$C_f = \frac{\text{Volume chauffé}}{\sum \text{Surfaces sur extérieur, sol, volumes non chauffés}}$$

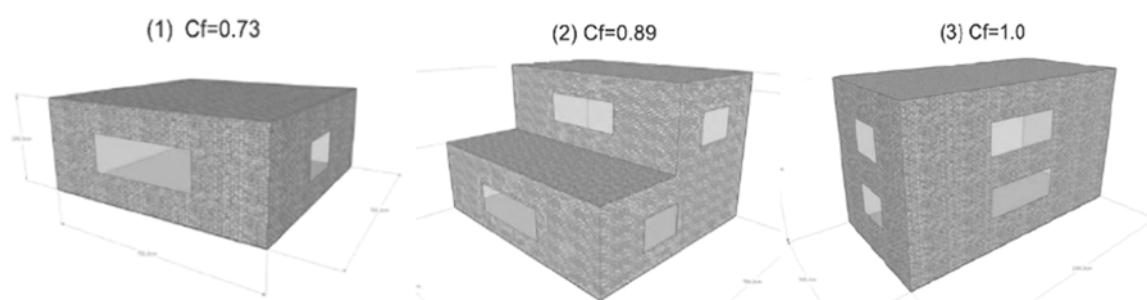


Figure 31 : Coefficient de forme C_f pour différentes morphologies de bâtiments [Tiberiu Catalina & all]

[Tiberiu Catalina & al.] ont réalisé plusieurs simulations thermiques dynamiques sous le climat de Lyon (France) avec différents coefficients de forme, ratio de surface vitrée, distribution des vitrages sur les façades et différentes inerties thermiques. Même si les auteurs se sont focalisés sur les consommations de chauffage des bâtiments, les résultats suivants peuvent être exploités pour les besoins de rafraîchissement :

- A volume égal, une réduction importante d'énergie peut être obtenue avec un coefficient de forme plus élevé. En construction, cela se traduit par un même volume chauffé pour une surface déperditive (ou absorbante) plus petite. La réduction des besoins en chauffage a été estimée à 35% pour un coefficient de forme variant de 0,67 à 1.
- Les dimensions et l'orientation des baies vitrées et leur distribution sur l'enveloppe du bâtiment sont également des paramètres essentiels. Les apports solaires augmentent avec la surface vitrée. Ceux-ci peuvent contribuer à réduire la consommation de chauffage en particulier, si au moins 60% de la surface est orientée au Sud. Par exemple, la réduction des besoins en chauffage pour un ratio de surface vitrée de 22% peut atteindre 3% à 21% si l'orientation des vitrages passe de 25%S/N/E/O à 60%S/20%N/10%E/O, respectivement pour les mois de janvier et octobre.

- Des choix constructifs pour un bâti plus lourds permettent d'envisager une réduction de 12% de la consommation énergétique de chauffage (calculé sur un bâtiment présentant un ratio de surface vitré de 22%).

Une étude [Shady Attia] portant sur douze logements zéro énergies ou très basse consommation en Belgique a permis de mesurer la dérive en matière d'augmentation du volume par habitant dans les nouveaux logements et surtout du volume chauffé ou rafraîchi. Les résultats sont tels que le bénéfice de l'amélioration des performances intrinsèques du bâti ou de l'efficacité des systèmes sont annihilés par l'augmentation de la charge thermique.

[Shady Attia] fournit quatre recommandations pour un confort adaptatif et la réduction effective des consommations d'énergie et des émissions de CO₂.

1. Définir la consommation énergétique d'un logement non pas à partir de sa surface mais de ses occupants. De la même manière, limiter la puissance énergétique au nombre d'occupants (par exemple, 2000 W/cap.). Légiférer pour mettre en place le budget d'énergie annuelle par occupant.
2. Equiper l'ensemble des pièces du logement ou de la zone de bureau de capteurs de présence et d'outils interactifs à destination des occupants, leur permettant de contrôler zone par zone ou pièce par pièce les systèmes de chauffage/ventilation/climatisation qu'ils soient actifs ou passifs. Déploiement de systèmes individuels contrôlables de chauffage/ventilation/rafraîchissement.
3. Concevoir l'agencement des nouveaux bâtiments en organisant un zonage thermique entre les pièces occupées chauffées/climatisées et les autres volumes. Organiser le gradient de température horizontal ou vertical (stratification). Le niveau de confort doit être adapté en fonction de l'occupation et de l'usage des différents espaces d'un même logement. L'utilisation de systèmes passifs sur l'enveloppe du bâtiment doit être généralisée.
4. Favoriser le développement de modèles de confort dynamique afin de généraliser l'adaptation dans l'espace mais aussi dans le temps. Définir de nouvelles normes de confort adaptatif qui repoussent les limites de confort habituelles. Générer des critères de confort adaptatif qui tiennent compte de la vitesse d'air et de la stratification des températures.

Une autre étude met l'accent sur la dimension des logements qui au regard des législations et des systèmes énergétiques efficaces dont ils sont équipés, peuvent apparaître tout-à-fait performants alors qu'ils sont réellement des puits à énergie. En effet, les auteurs [Helen Viggers & al.] qui se sont intéressés au cas de la Nouvelle Zélande soulignent que les indicateurs d'efficacité normatifs sont généralement exprimés par unité de surface habitable et ne tiennent donc pas compte ni de la surface totale du logement, ni de son coefficient de forme C_f (cf. §2.4.7). Aussi, les politiques de rénovation thermique par l'augmentation du niveau d'isolation des logements visant la réduction des consommations énergétiques peuvent être totalement annihilées par le simple fait d'une augmentation de la surface habitable. Cette étude étend ses résultats aux conditions estivales et aux risques de surchauffe associés.

L'étude du CEA sur la maison expérimentale IGC située à Beychac-et-Caillau (33) a également permis de vérifier que l'orientation des ouvertures influence fortement les consommations énergétiques et le confort thermique (cf. Figure 14). Le modèle de maison construit pour l'étude ne comprend aucun store extérieur ou intérieur et n'est pas équipée de dispositif de ventilation naturelle. Les différentes simulations font varier les paramètres suivants :

- Type de protection solaire horizontale : sans casquette ni débord de toit / sans casquette avec débord de toit / casquette de 40 cm sur le séjour et auvent au-dessus du garage / casquette de 40 cm sur le séjour et la façade Sud de la chambre 3 et auvent au-dessus du garage / casquette de 40 cm tout autour de la maison / casquette de 1m70 tout autour de la maison.
- Orientation du séjour/chambre 3 : 0°(Sud) / 10° / 20° /... / 170° / 180°(Nord) / 190°... / 350° / 360° (sens de rotation horaire).

Les résultats sont les suivants :

- Pour la localisation du cas d'étude en Gironde, le besoin de climatisation est maximum pour une rotation de la maison de 45° vers l'Ouest. Cette orientation de la maison coïnciderait à l'exposition des deux murs extérieurs du séjour et de ses grandes ouvertures vers le Sud.

- L'orientation de la maison à 250° conduit à une diminution de l'ordre de 30% des besoins annuels en froid, ce qui améliore sensiblement le confort d'été.
- Le besoin en chauffage est maximal pour une orientation autour de 200-210°. Les grandes ouvertures du salon se retrouvent au Nord.
- Les orientations qui favorisent les apports solaires se situent entre 0° et 70°. Les besoins de chauffage diminuent d'environ 40%.

Dans l'hémisphère Nord, un zonage thermique usuel est de positionner les pièces nocturnes ou de passage temporaire sur les façades Nord ou Est. En hiver, les chambres ou la salle de bains ne sont chauffées que ponctuellement et assurent le rôle de tampons thermiques entre les murs extérieurs Nord ou Est et les pièces de vie, chauffées et occupées la journée. Un raisonnement similaire pour des climats très chauds voire caniculaires dans le même hémisphère nous conduirait à organiser des volumes « tampons » qui seraient volontairement orientés au Sud et à l'Ouest, ce pourrait être des locaux aveugles, de façon à limiter les apports solaires et la température dans les pièces de vie, qui seraient ouvertes vers le Nord et l'Est.

Cette approche a été tentée par [P. Mendonça & L. Bragança] avec la réalisation d'une cellule de test constitué d'un logement pour lequel les pièces de confort, séjour, salle de bain, chambres sont centrées et construites avec des murs massifs alors que les pièces de travail et les circulations se situent tout autour et sont fabriquées avec des structures légères. Cette nouvelle organisation des pièces avec des éléments structurels légers a été comparée à un logement équivalent et de construction traditionnelle, avec une forte inertie. Ces deux cellules tests ont été réalisées et instrumentées près de Guimarães (Portugal).

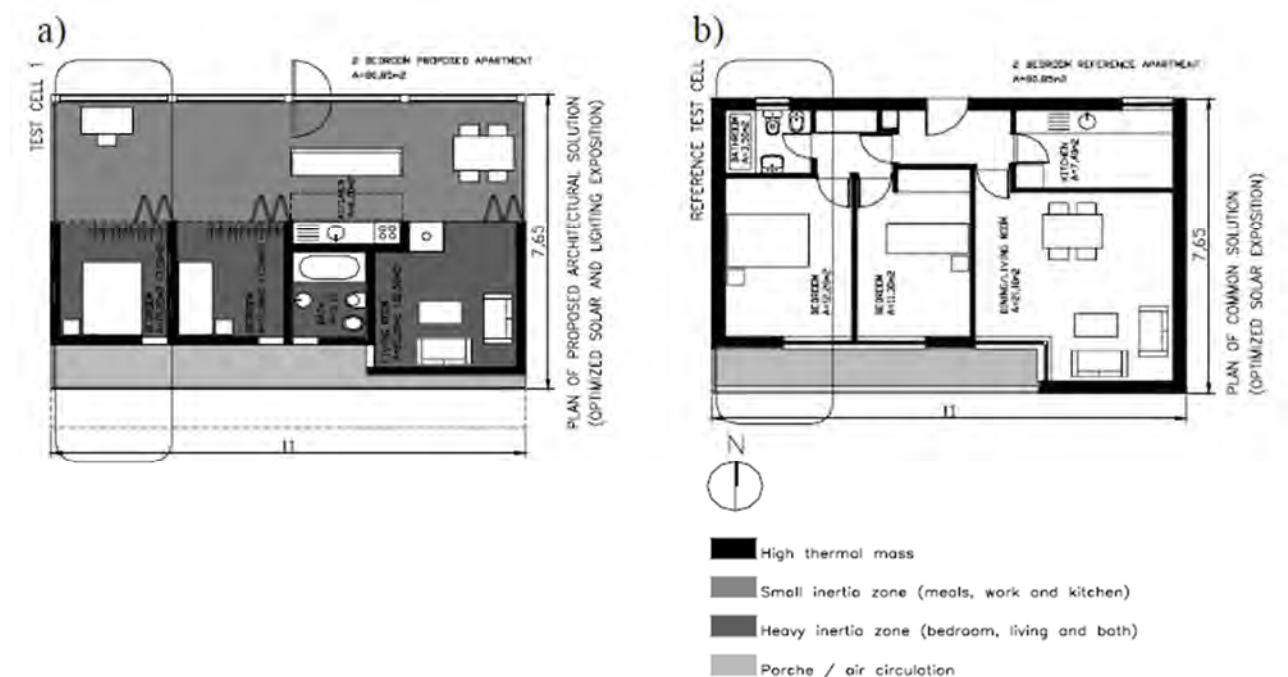


Figure 32 : Logement réorganisé (à g.) et logement conventionnel équivalent (à d.) [P. Mendonça & L. Bragança]

Les résultats de l'étude expérimentale donnent une réduction de 50% en matière de consommation d'énergie pour le concept de logement réorganisé.

En considérant que dans un logement climatisé, il est plutôt rare que l'ensemble des pièces soient traitées, [M. Bojic & al.] se sont intéressés par le calcul aux effets sur les besoins en rafraîchissement du zonage des espaces climatisés en positionnant l'isolant dans les voiles intérieurs séparant les pièces climatisées du volume non traité (les portes étant elles-mêmes isolées intérieur/extérieur) plutôt que sur les murs extérieurs. Les résultats montrent pour un appartement de type T3, de surface 73 m², situé à Hong-Kong, une réduction d'environ 15% des besoins en froid avec une isolation polyuréthane d'épaisseur 5 cm positionnée dans les murs séparatifs, face interne délimitant le contour de la zone climatisée, ce qui représente environ 75% (chambres et séjour) de la surface totale d'un logement par rapport à une isolation équivalente mais positionnée dans les voiles

extérieurs. L'essentiel de la baisse des besoins en rafraîchissement provient de la réduction du volume à climatiser mais l'inertie thermique des parois extérieures et des volumes non traités limitent les gains qui se situent en-deçà de 25%.

Une même approche du zonage thermique a été proposée par [Fiorentini M. & al.], qui ont étudié le bénéfice de la séparation des systèmes de chauffage ou de climatisation zone par zone ou pièce par pièce. Ils ont évalué par la modélisation les besoins en chaud et en froid d'un bâtiment alternativement découpé en deux zones disposant chacune de leur propre système de climatisation/chauffage et traité en une seule zone. Les simulations comprennent quatre scénarii différents au niveau des apports internes situés dans la première zone, la seconde n'en ayant aucun. Plusieurs climats australiens ont été appliqués Hobart (Froid), Melbourne (tempéré), Sydney (Chaud et tempéré), Cairns (été humide et hiver chaud). Ils montrent que la mise en commun des espaces peut être avantageuse en terme d'économies d'énergie, en particulier pour des volumes occupés en permanence, des apports internes inégalement répartis et lorsque la température extérieure est inférieure à la température du logement.

Une autre simulation a été réalisée sur un appartement à l'aide du logiciel AccuRate, avec deux scénarii : celui de référence pour lequel les ouvertures de portes ont été déterminées par l'usage et l'occupation du bâtiment à l'aide du protocole NatHERS, le second correspondant à l'ouverture de toutes les portes pour la connexion des pièces entre elles.

L'ouverture des portes entre les pièces a permis d'obtenir un gain de 2,2 à 9,9% sur les besoins annuels chaud et froid sous les climats tempérés et froids.

Au contraire, le zonage thermique par la séparation des pièces climatisées apparaît très légèrement avantageux : 0,2 à 2,3% de gain sur les besoins en froid dans les climats chauds et humides.

[I. Budaiwi & A. Abdou] ont étudié le cas particulier des mosquées qui sont sujettes à une occupation très intermittentes et montrent par le surdimensionnement et une stratégie de pilotage des systèmes de climatisation ainsi que par l'organisation d'un zonage thermique adaptée, que les consommations énergétiques peuvent être réduites respectivement de 23% et 30%. Les cas d'études ont été modélisés avec VisualDOE et pour le climat chaud et humide de Dhahran (Arabie Saoudite). La première approche consistait à limiter le fonctionnement des appareils aux seules plages horaires d'occupation en surdimensionnant les équipements de climatisation de 65% du besoin nécessaire pour le pic de chaleur du bâtiment. Par ailleurs, la stratégie de séparation de la salle de prière par des cloisons légères équipées de parois et de portes vitrées en trois zones correspondant à différents taux d'occupation accompagné d'un surdimensionnement de 40% des équipements de climatisation pour les deux premiers espaces ainsi que d'un fonctionnement allongé d'une heure sur l'espace restant (le moins utilisé) permet de réduire de façon substantielle la consommation d'énergie avec le même niveau de confort thermique pendant les périodes d'occupation.

[S.A. Mirrezaei & al.] ont fait l'exercice de dresser une liste de recommandations pour la bonne conception thermique d'un bâtiment dans son environnement. Ils se sont appuyés sur un cas d'étude situé à Famagusta (Chypre, Nord) : appartements « the Mesan » et les avis de 45 occupants résidentiels. Ces propositions ont été formulées pour profiter au maximum du rayonnement solaire durant les périodes hiver et les mi-saisons. Le climat local n'en est pas moins chaud en été avec des températures qui culminent à 41°C au pic de l'été et doux en hiver avec des minimales autour de 5°C. Le même type d'approche pourrait être menée pour élaborer un plan d'aménagement opposé répondant aux besoins des bâtiments soumis à des hivers et mi-saisons très chaud-e-s.

- Étirer le bâtiment sur un axe Est-Ouest permet de profiter au maximum du rayonnement solaire
- Positionner les espaces habitables principaux sur la façade Sud et les espaces moins occupés sur les façades Est et Ouest
- Les pièces bénéficiant d'apports internes, par exemple la cuisine, doivent être placées au centre du volume habitable
- Les ouvertures doivent être orientées pour favoriser la pénétration du rayonnement solaire mais elles seront protégées et calculées pour éviter l'éblouissement des occupants et les surchauffes
- Les ouvertures doivent être situées sur des espaces occupés plutôt que sur des passages
- Une serre est recommandée au Sud près des espaces principaux, des murs végétalisés peuvent également apporter un peu de fraîcheur
- Prévoir les circulations d'air traversantes dès l'organisation des pièces et des ouvertures.
- Sous cette latitude 35,13°, les orientations les mieux exposées au soleil sont 15° Ouest et 30° Est par rapport au Sud.

2.4.8. Isolation réfléchive ou « basse émissivité »

Afin de réduire les apports solaires, des revêtements de peinture métallisée ou des films aluminium tendus sous les tuiles peuvent être utilisés pour limiter les apports par rayonnement thermique infrarouge sur la couche isolante du toit, respectivement en limitant le rayonnement des tuiles vers l'isolant recouvrant le volume à rafraîchir et en réduisant l'absorption de la chaleur par la soupente isolée. Ces solutions techniques sont appelées « isolations réfléchives ».

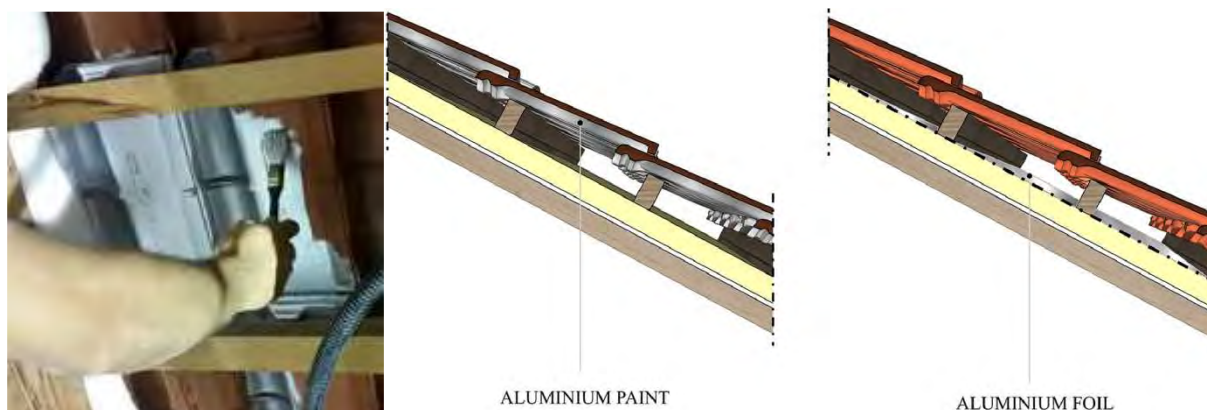


Figure 33 : Vue et coupes d'isolation réfléchive par peinture métallisée ou par film d'aluminium [S. Fantucci & V. Serra]

[S. Fantucci & V. Serra] ont montré que l'application de l'une de ces deux solutions techniques, peinture métallisée basse émissivité ($\epsilon = 0,5$) ou film d'aluminium ($\epsilon = 0,29$) permettent de réduire respectivement de 10% et 23% les apports solaires dans les combles aménagés sous un toit isolé avec 5 cm de polystyrène extrudé ventilé et recouvert par des tuiles mécaniques en terre cuite, situé à Turin (Italie). La réduction des besoins de rafraîchissement diminue très légèrement avec l'augmentation de la résistance thermique du toit (épaisseur d'isolant). Le modèle calibré sur les mesures a permis d'envisager un gain maximum de 53% avec une émissivité $\epsilon = 0,1$ et un facteur de forme entre les surfaces rayonnantes i et j de $F_{ij} = 1$. La réduction de la température de surface intérieure des combles aménagés a été mesurée respectivement de $0,6^{\circ}\text{C}$ et $1,4^{\circ}\text{C}$. La réduction du pic de température ambiante intérieure est de $0,5^{\circ}\text{C}$ avec le film d'aluminium. La réduction correspondante du pic de flux thermique traversant le toit est mesurée respectivement de 15% et 38%.

L'utilisation de ces techniques ne modifie pas le comportement thermique du toit isolé en hiver.

2.4.9. Rafraîchissement radiatif

Le principe du rafraîchissement radiatif repose sur les propriétés optiques des matériaux qui échangent par rayonnement, avec la voûte céleste située au-dessus d'eux, c'est-à-dire avec l'espace autour du globe terrestre. La plupart des matériaux utilisés dans les technologies de rafraîchissement radiatif réfléchissent les ondes électromagnétiques sur le spectre solaire (250 – 2500 nm) et émettent un rayonnement thermique principalement dans le domaine des ondes infrarouges moyen et lointain (> 2500 nm).

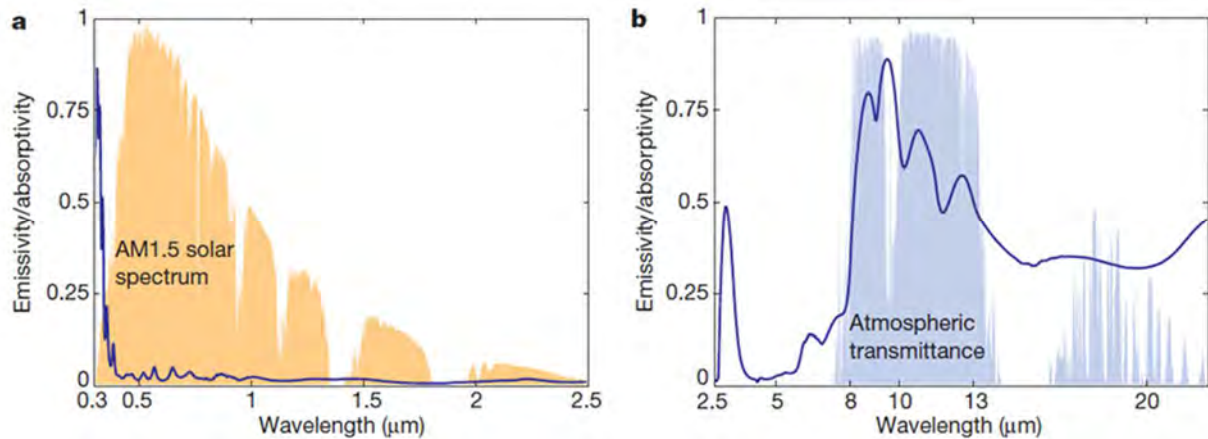


Figure 34 : Emissivité/absorptivité d'une surface utilisée pour du rafraîchissement radiatif diurne [A. P. Raman, M. A. Anoma, L. Zhu, E. Rephaeli et S. Fan, «Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight,» *Nature*, vol. 515, pp. 540-544, 2014]

L'atmosphère terrestre se comporte comme un filtre d'ondes électromagnétiques. Ainsi, les transferts radiatifs entre les objets terrestres et l'espace se limitent principalement à la fenêtre de transmission des longueurs d'ondes infrarouges située entre 8 et 13 μm . Aussi, pour assurer une certaine capacité de refroidissement par transfert thermique radiatif, l'émissivité de la surface considérée pourra être plus ou moins sélective mais toujours suffisamment élevée sur cette plage de longueurs d'ondes.

Les performances des surfaces de froid radiatif sont très fortement liées à l'émissivité :

- Les surfaces radiatives à émissivité large bande qui se rapproche du corps noir, matériau très émissivité sur toutes les longueurs d'ondes excepté sur le spectre solaire (250 nm à 2,5 μm).
- Les surfaces radiatives à émissivité sélective qui est centrée sur la plage de longueurs d'ondes : 8 à 13 μm . Ces surfaces permettent généralement une diminution de la température beaucoup plus basse qu'avec les surfaces radiatives à émissivité large bande.

La capacité de refroidissement d'une surface radiative est directement mesurée à partir du bilan thermique à sa surface qui mêle à la fois les échanges par conducto-convection (vent et température de l'air), le rayonnement thermique infrarouge (clarté, nébulosité du ciel), et le rayonnement thermique infrarouge avec les objets dans son environnement et éventuellement conduction thermique (support...). Lorsque la température ambiante est très supérieure à la température de refroidissement désirée, les apports par convection ou par rayonnement thermique avec l'environnement viennent contrebalancer une éventuelle dissipation thermique par rayonnement vers la voûte céleste, jusqu'à supprimer tout effet de refroidissement de la surface considérée.

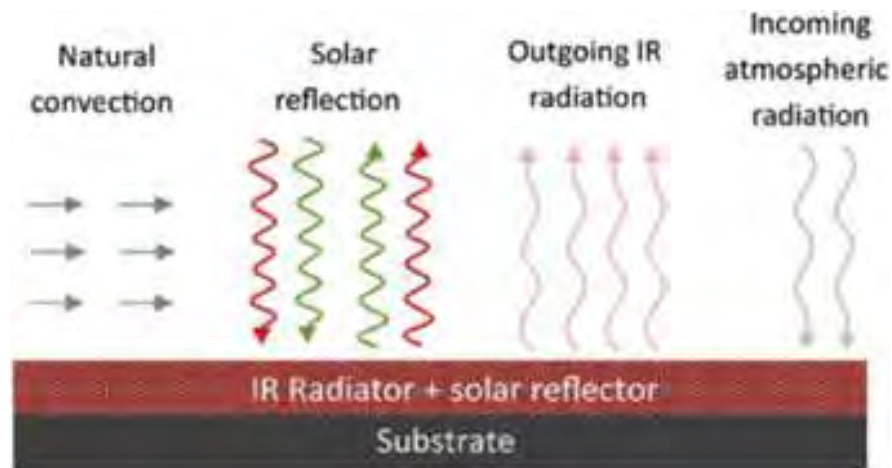


Figure 35 : Bilan thermique à la surface radiative : faible absorbance dans le spectre solaire, transfert par convection avec le milieu ambiant, forte émissivité vers la voûte céleste ou le milieu extérieure [Hossain & Gu]

Le rafraîchissement radiatif dépend principalement des paramètres suivants :

- Emissivité de la surface de matériau considérée
- Température ambiante
- Humidité relative
- Conditions atmosphériques [Ursula Eicker & Antoine Dalibard]

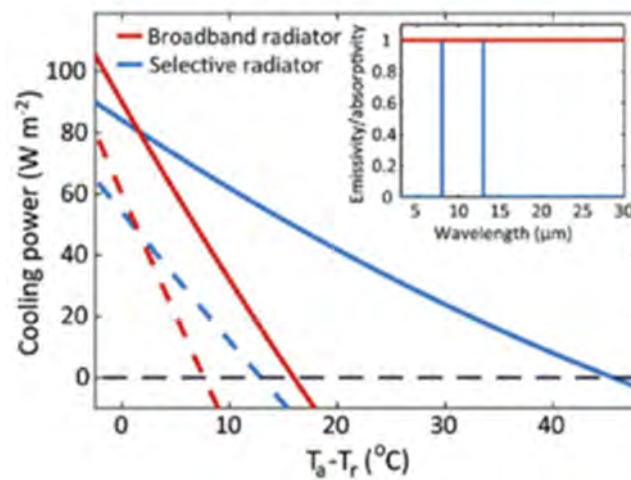


Figure 36 : Capacité de refroidissement par transferts radiatifs d'une surface émissive à large bande et d'une autre plus sélective [Hossain & Gu]

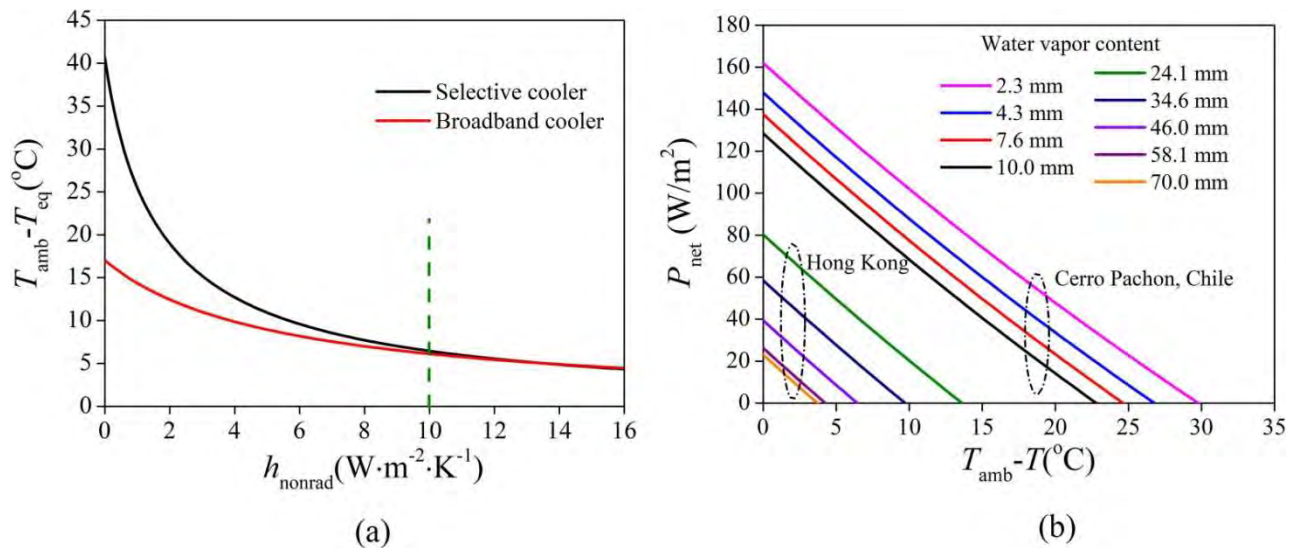


Figure 37 : (a) Influence du coefficient d'échange non radiatif sur l'équilibre thermique de la surface radiative - (b) influence de l'humidité atmosphérique sur la puissance de refroidissement de la surface radiative [J. Chen & L. Lu]

Le coefficient d'échange non radiatif h_{nonrad} rend compte des transferts de chaleur par conducto-convection depuis l'environnement sur la surface radiative : $h_{nonrad} \times S_{rad} \times (T_{amb} - T_{Srad})$. Lorsque les échanges par conducto-convection en face avant de la surface radiative sont limités, il est possible de maximiser le potentiel de refroidissement obtenu. L'utilisation de films polymères transparents aux infrarouges tels que le polyéthylène (PE) ou le polyéthylène haute densité (PEHD) ou encore une couverture de convection à base de zinc résistante aux dommages du temps sont cités parmi les solutions techniques permettant de réduire les échanges conducto-convectifs en face avant des surfaces radiatives [J. Chen & L. Lu].

2.4.9.1. Ra fraîchissement radiatif nocturne

Le rafraîchissement radiatif le plus connu et le plus utilisé est le rafraîchissement radiatif nocturne. Il vise à profiter de la température de ciel (voûte céleste) relativement basse par ciel clair pour rafraîchir un fluide comme, par exemple, l'air insufflé dans une habitation.

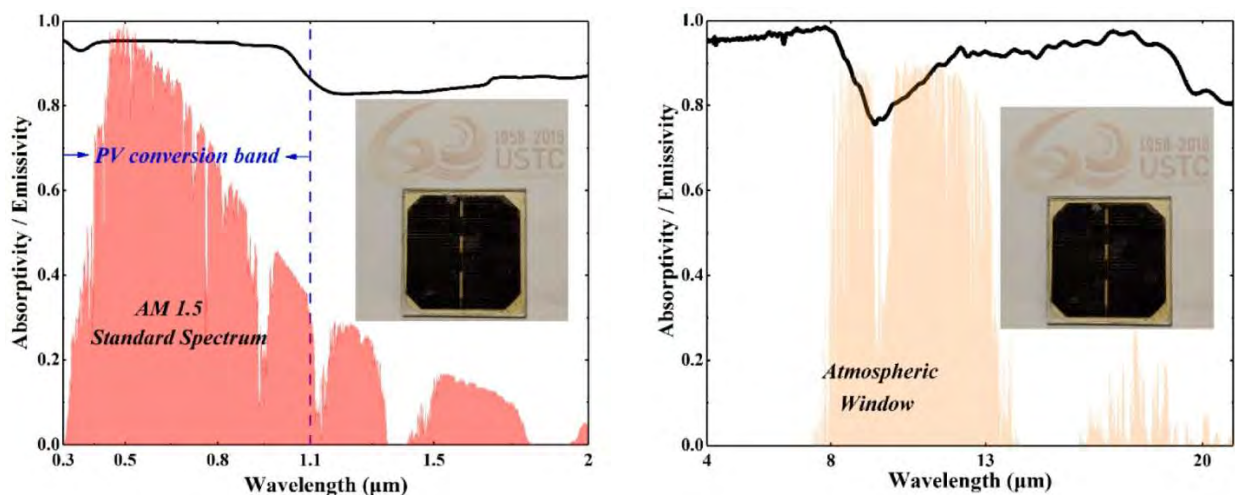


Figure 38 : Emissivité/absorptivité spectrale d'un panneau PV, sur le spectre solaire (à g.), et dans l'infrarouge $>4 \mu m$ (à d.) [Bin Zhao & al.]

L'absorptivité du capteur PV illustré ci-dessus lui permet de capter le rayonnement solaire pour produire de l'électricité mais elle est trop élevée pour produire du froid en journée sous l'irradiance solaire directe.

L'émissivité de ce capteur PV non sélectif est uniformément répartie dans l'infrarouge. Elle lui offre une forte capacité à dissiper la chaleur au-dessus de l'atmosphère en période nocturne, en l'absence de rayonnement incident. Le refroidissement nocturne permet d'atteindre une température jusqu'à 13°C sous la température ambiante comme le montre la Figure 49.

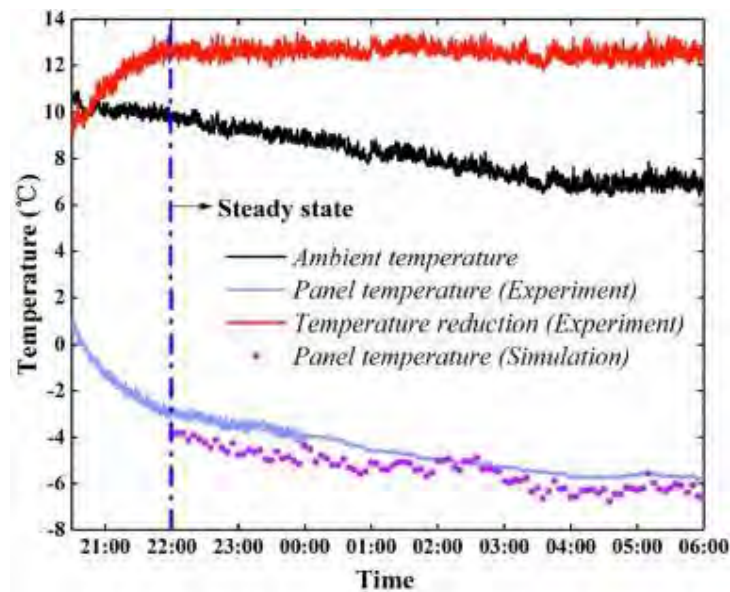


Figure 39 : $T^{\circ}\text{C}$ d'un PV-RC hybride et réduction de $t^{\circ}\text{C}$ par rafraîchissement radiatif nocturne [B. Zhao & al.]

La courbe présentée sur la Figure 40 fournit la réflectance d'une surface de monoxyde de Silicone sur une couche d'Aluminium, mesurée pour le rayonnement dans le spectre infrarouge et un angle d'incidence à 15° . La faible réflectance ρ observée pour les longueurs d'ondes correspondant à la fenêtre de transmission atmosphérique signifie une forte émissivité α sur la même bande spectrale : $1 = \alpha + \tau + \rho$

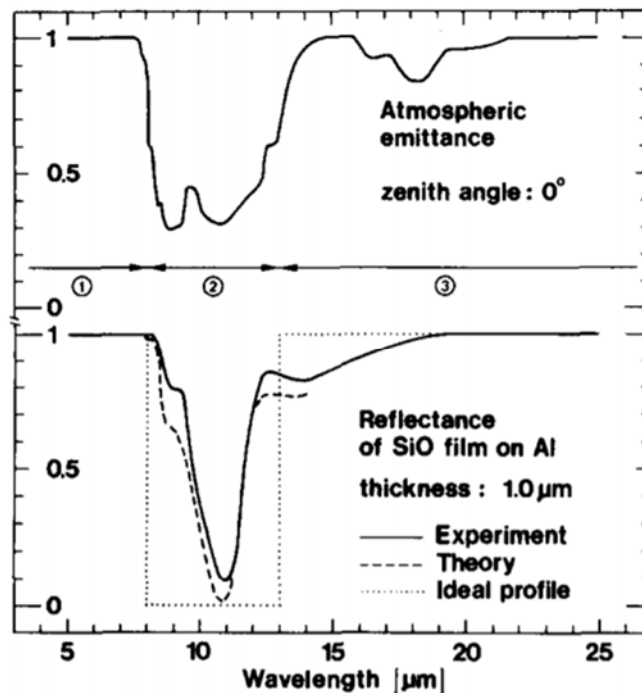


Figure 40 : Réflectance d'un film SiO , $1\mu\text{m}$, déposé sur une feuille Alu , incidence : 15° [C.G. Granqvist & A. Hjortsberg]

Il existe aussi des capteurs solaires thermiques qui sont utilisés pour du rafraîchissement radiatif nocturne [S. Vall & al.]. Ces auteurs nous présentent les résultats expérimentaux obtenus à Lleida (Espagne – climat chaud et sec) sur un capteur solaire thermique FUJI-P recouvert spécialement d’une couche de polyéthylène d’épaisseur 0,6 mm en lieu et place de la surface vitrée de 3 mm. Ce type de capteur émetteur est appelé Radiative Collector and Emitter (RCE).

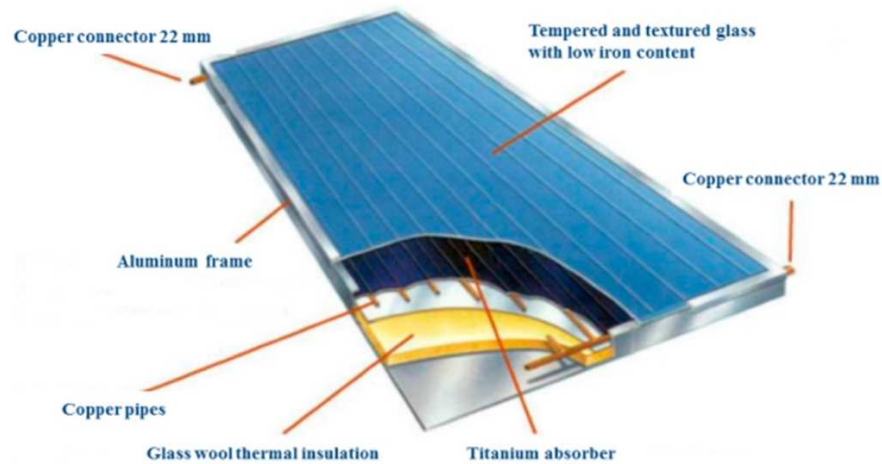


Figure 41 : Structure du capteur solaire thermique radiatif (adaptée du catalogue constructeur) [S. Vall & al.]

Un tel capteur émetteur est capable de réchauffer un fluide caloporteur sous le rayonnement solaire d’une journée ensoleillée et de rafraîchir de l’eau durant la nuit. Les fluides peuvent être stockés dans des ballons isolés et réutilisés en fonction des besoins. La puissance maximale de refroidissement mesurée en sortie du capteur émetteur improvisé est de l’ordre de 45 W/m^2 , ce qui peut représenter jusqu’à 900 W pour une surface de 20 m^2 .

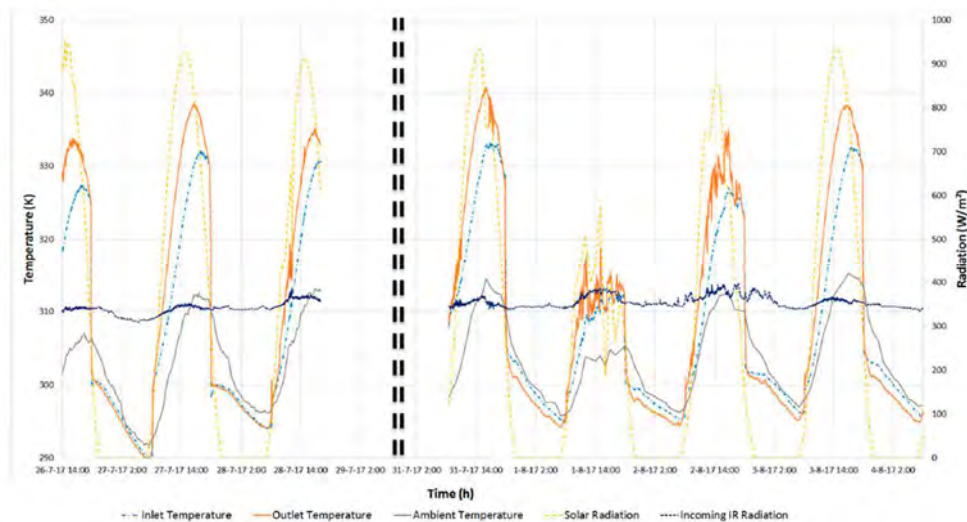


Figure 42 : Mesures d'irradiance solaire et de températures entrée et sortie du capteur émetteur [S. Vall & al.]

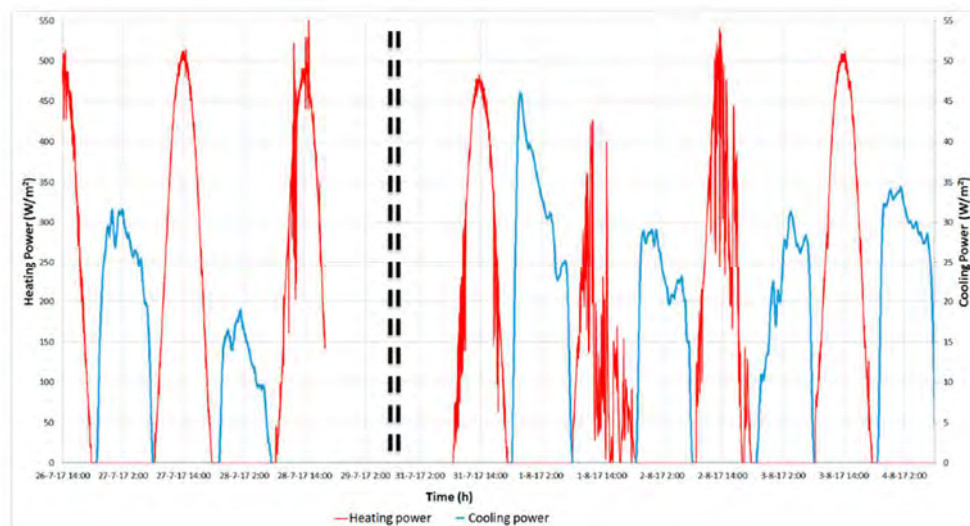
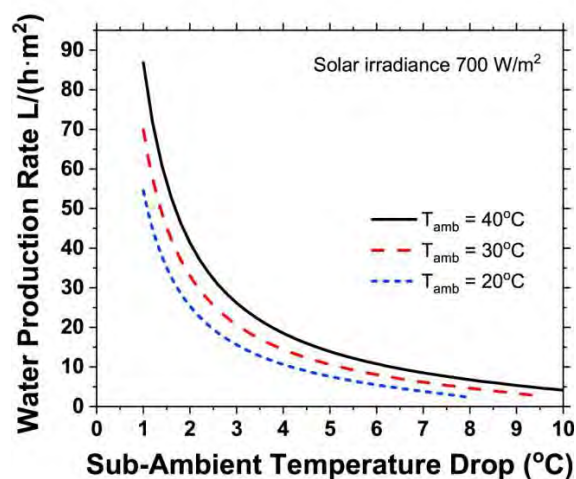


Figure 43 : Puissances de chaud et de froid produites par le concept de radiateur émetteur (RCE) - [S. Vall & al.]

2.4.9.2. Rafraîchissement radiatif diurne

D. Zhao & al.] montrent qu'il est possible de produire de l'eau fraîche à partir d'une surface radiative exposée sous une irradiance solaire globale de 700 W/m^2 .

Figure 44 : Production d'eau froide à $t^\circ\text{C} < t_{\text{amb}}$ sous irradiance solaire 700 W/m^2 [D. Zhao & al.]



[Y. Zhai & al.] propose un méta matériau hybride polymère d'épaisseur $50 \mu\text{m}$, composé de microsphères de SiO_2 encapsulées dans une matrice polyméthylpentène TPX, l'ensemble étant couvert en partie inférieure d'une couche réfléchive d'argent $200 \mu\text{m}$, pour des applications de refroidissement radiatif diurne et nocturne. L'émissivité d'un tel système sur la fenêtre de transmission de l'atmosphère entre 8 et $13 \mu\text{m}$ a été mesurée supérieure à $0,93$ tandis que le système présente une totale transparence au rayonnement dans le spectre solaire, $0,96$.

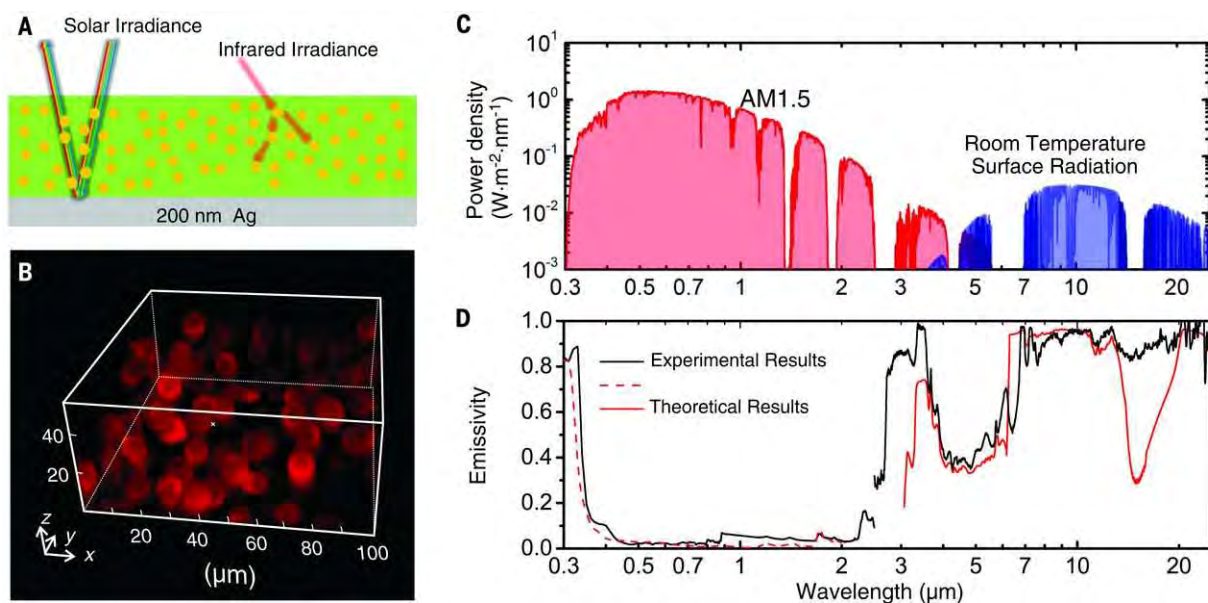


Figure 45 : Performances optiques mesurées et calculées pour le méta matériau - [Y. Zhai & al.]

Un tel dispositif permet d'atteindre des puissances de 93 W/m² sous le rayonnement solaire à 12H00 UTC.

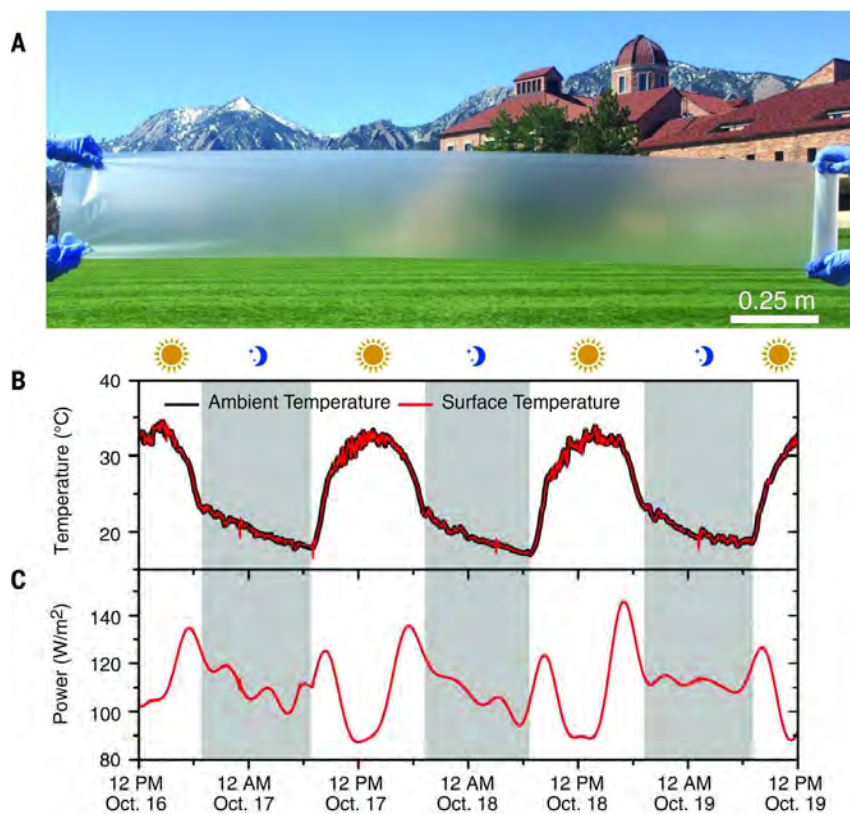


Figure 46 : Visuel du film de 30 cm de large et performances du méta matériau [Y. Zhai & al.]

Les avantages d'une solution de rafraîchissement radiatif :

- Pas de consommation d'eau et consommation d'énergie électrique limitée à la pompe de circulation du fluide dans l'émetteur radiant.

- Cette solution permet de lutter efficacement contre le réchauffement climatique car la chaleur est évacuée dans l'espace. Cela signifie également que cette solution permet de lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain.
- La performance moyenne est élevée supérieure à 10 en journée.

Les inconvénients du rafraîchissement radiatif :

- En hiver et en intersaison il y a un risque que la température du fluide soit inférieure à 0°C. Lorsque le système est à l'arrêt la température du fluide peut être jusqu'à 10°C inférieure à la température ambiante
- Cette solution n'est pas encore technologiquement mature et demande un investissement dans la régulation pour une application bâtiment.

2.4.10. Brasseurs d'air

Les brasseurs d'air peuvent être fixes (ventilateurs plafonniers) ou mobiles (ventilateurs sur pied). Ils traitent l'ensemble du volume d'une pièce habitable ou peuvent être individualisés sur un poste précis (repos ou travail).



Figure 47 : Exemple de ventilateur plafonnier <https://www.fanelite.fr/ventilateur-plafond-ac-sem56alu-c2x28014983>

La norme NF EN ISO 7730 définit les indicateurs de confort adaptatifs suivants : Vote moyen prévisible (PMV) et Pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD).

Ces deux indicateurs sont liés et leur calcul repose sur les six paramètres principaux suivants :

- M : métabolisme énergétique (lié à l'activité physique des occupants), en W/m^2
- I_{cl} : isolement thermique du vêtement (lié à la vêtue des occupants), en $m^2.K/W$
- t_a : température ambiante, en $^{\circ}C$
- $\bar{t}_r$: température moyenne de rayonnement des parois environnantes, en $^{\circ}C$
- v_{ar} : vitesse d'air relative, en m/s
- p_a : pression partielle de vapeur d'eau, liée à l'hygrométrie ambiante, en Pa

Cette norme précise aussi les effets de la vitesse d'air sur la température ressentie par les occupants dans son annexe G. Elle indique des gains substantiels de l'ordre de 0,6 à 3°C, et même jusqu'à 4°C et au-delà, suivant les conditions ambiantes de vitesse d'air et de température moyenne radiative.

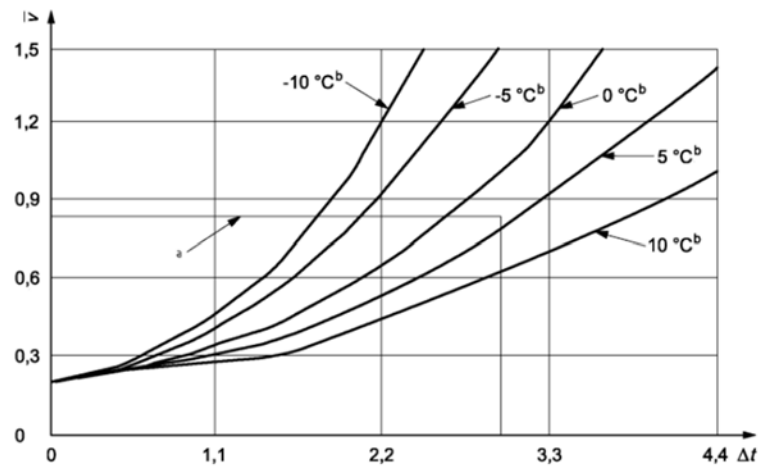


Figure 48 : Vitesse de l'air requise pour compenser une augmentation de la température et en fonction de la température moyenne radiative (extrait de la norme NF EN ISO 7730 annexe G)

Avec :

- $\bar{v}$: vitesse d'air relative, en m/s
- Δt : augmentation de la température au-dessus de 26°C
- a : limite conseillée pour une activité légère essentiellement sédentaire. Il convient de rester sous les valeurs suivantes : $\bar{v} \leq 0,82 \text{ m/s}$ et $\Delta t \leq 3^\circ\text{C}$
- b : $(\bar{t}_r - t_a)$: différence de température entre la moyenne de rayonnement des parois environnantes et la température ambiante, en °C

Un ventilateur plafonnier brasse des débits de l'ordre de 5000 à 15000 m³/h, soit des vitesses d'air moyennes de 0,3 à 0,8 m/s pour la section ouverte la plus faible d'un volume habitable de 6 x 4 x 2,5 m.

En l'absence d'inertie thermique, le local équipé d'un brasseur d'air sera généralement ouvert sur l'extérieur pour un usage rationnel par les occupants, afin d'extraire l'énergie dissipée par convection et évapotranspiration.

[Steven V. Szokolay] introduit la notion de « apparent cooling effect » qui traduit l'effet de confort adaptatif ressenti par la vitesse de l'air comme capacité de rafraîchissement équivalente. Ce « cooling effect » est exprimé en °C ou °K et l'auteur de l'étude indique qu'il peut atteindre 4,8°C sous 1,5 m/s.

[Steven V. Szokolay] montre qu'un ventilateur plafonnier quelle que soit ses dimensions permet d'obtenir des vitesses d'air de 1,3 m/s verticalement et pour une puissance jusqu'à 20 m², des vitesses d'air horizontales de 0,5 à 0,77 m/s. L'abaissement de température correspondant ou le « cooling effect » est alors de 1,6 à 2,8°C.

L'auteur propose d'extrapoler ce résultat aux surfaces plus grandes avec un coefficient d'atténuation f :

$$f = \frac{20}{\text{area}_{\text{room}}}$$

Où : $\text{area}_{\text{room}}$ est la surface de la pièce considérée, exprimée en m²

[Steven V. Szokolay] s'intéresse également aux économies d'énergie liées au « cooling effect » qui impacte la consommation du système de climatisation. Il calcule sur deux cas d'étude différents les gains suivants :

- 8 kWh/(m².an) pour une maison d'architecte « P-house » à Townsville (Australie)
- 7 et 12 kWh/(m².an) pour une maison individuelle suivant ses caractéristiques constructives. Les économies sont d'autant plus importantes que la structure n'est pas thermiquement performante.

La performance des systèmes de brassage peut être définie comme le rapport de la puissance évacuée dans l'ambiance par convection et évapotranspiration au contact de tous les occupants sur la puissance électrique consommée par le(s) ventilateur(s). Or, s'il est difficile d'évaluer correctement le flux dû à l'évapotranspiration en tenant compte de la vêtue, de l'activité et du métabolisme des occupants, une approche beaucoup plus simple serait d'estimer la capacité de rafraîchissement produite par un climatiseur de type split, brassant le

volume intérieur à 550 m³/h, ayant une efficacité moyenne $EER = 6$ et qui produirait un abaissement de la température ambiante d'environ $\Delta T = 2,8^{\circ}\text{C}$ à 4°C , équivalent à l'effet de froid ressenti avec le brasseur d'air.

La capacité de rafraîchissement du climatiseur serait alors, en fonction de la charge à combattre :

$$P_{cooling_effect} = \frac{550 \text{ m}^3/\text{h}}{3600} \times 1,2 \text{ kg/m}^3 \times 1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}) \times \Delta T^{\circ}\text{C} = 513 \text{ W ou } 733 \text{ W}$$

On peut en déduire que la performance du système brasseur d'air, EER_{fan} , varie entre 6 et 8,6 suivant le ΔT ressenti et en considérant une consommation électrique du ventilateur : 85 W_é.

$$EER_{fan} = \frac{P_{cooling_effect}}{85 \text{ W}_e}$$

Un système de brasseur d'air présente les avantages suivants :

- Le brasseur d'air limite la création d'entropie en réduisant le rejet à l'extérieur de l'énergie accumulée dans le volume à rafraîchir. Le rejet s'effectue surtout sous forme d'humidité.
- Faibles coûts d'installation et faibles consommations.
- La performance du brasseur est augmentée avec le nombre d'occupants, car ils ressentent tous le même effet de rafraîchissement tant que la circulation de l'air n'est pas entravée.

Les principaux inconvénients du système de brassage d'air intérieur sont les suivants :

- La sensation de rafraîchissement est limitée à environ 4°C. Ce système ne peut donc pas combattre des apports thermiques importants et impose une gestion rigoureuse de l'enveloppe du bâtiment (réduction des apports solaires, ventilation naturelle...).
- La dimension de la pièce à traiter peut nécessiter d'installer plusieurs appareils pour couvrir toute la zone ou faire du brassage local/individuel poste par poste, ce qui réduit d'autant les performances.
- Ce type de système a tendance à augmenter l'hygrométrie ambiante lorsque le volume d'air est fermé, ce qui a pour effet de réduire les échanges de rafraîchissement latents.

2.4.11. Rafraîchissement évaporatif

Le principe du rafraîchissement par évaporation repose sur le principe de changement d'état de la matière. Le changement d'un état liquide à gazeux est une réaction endothermique c'est-à-dire qu'elle consomme de l'énergie sous forme de chaleur. Un système de rafraîchissement par évaporation utilise donc un liquide généralement de l'eau et cherche à l'évaporer afin de refroidir un fluide, un gaz ou un solide.

On distingue deux catégories de système de rafraîchissement par évaporation, les systèmes de rafraîchissement par évaporation directe et les systèmes de rafraîchissement par évaporation indirecte.

Les systèmes de rafraîchissement par évaporation directe vont rafraîchir l'air ambiant en le faisant circuler au contact de surface mouillée, ce qui va également apporter de l'humidité à l'air ambiant.

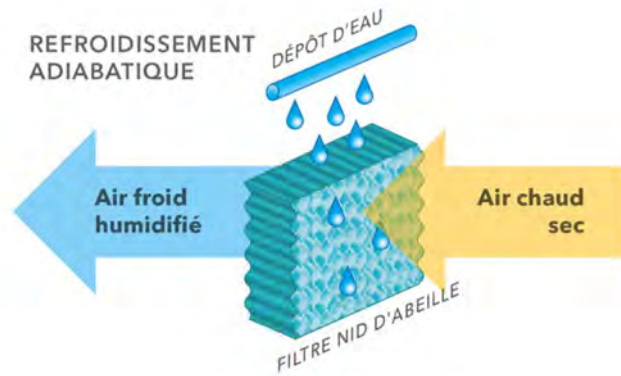


Figure 49 : <https://clever-energies.com/le-refroidissement-adiabatique-une-alternative-a-la-climatisation-a-detente-directe/>

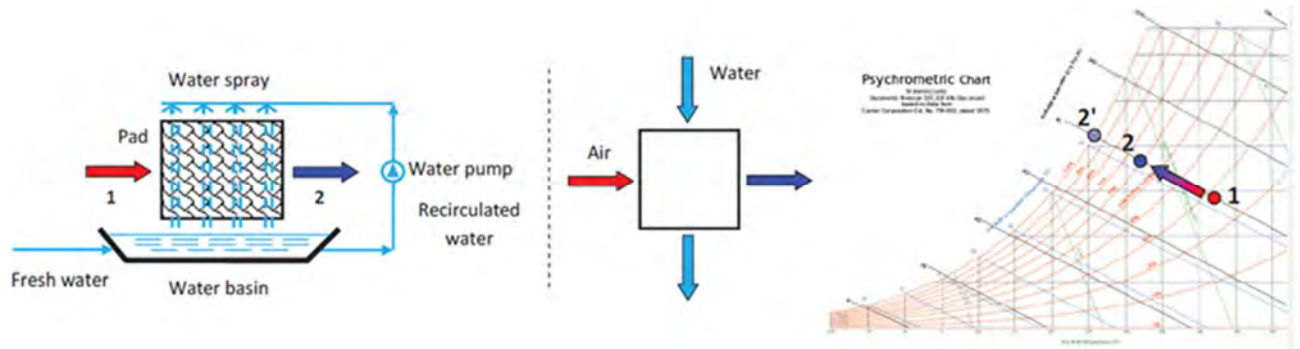


Figure 50 : Fonctionnement d'un système de rafraîchissement par évaporation directe [B. Porumb & al.]

Les systèmes de rafraîchissement par évaporation indirecte utilisent deux flux d'air. Un flux primaire arrivant dans l'air ambiant sans être humidifié car il est rafraîchi via un échangeur par un flux secondaire. Ce flux secondaire est rafraîchi par évaporation en circulant en contact d'une surface mouillée, il augmente sa teneur en humidité.

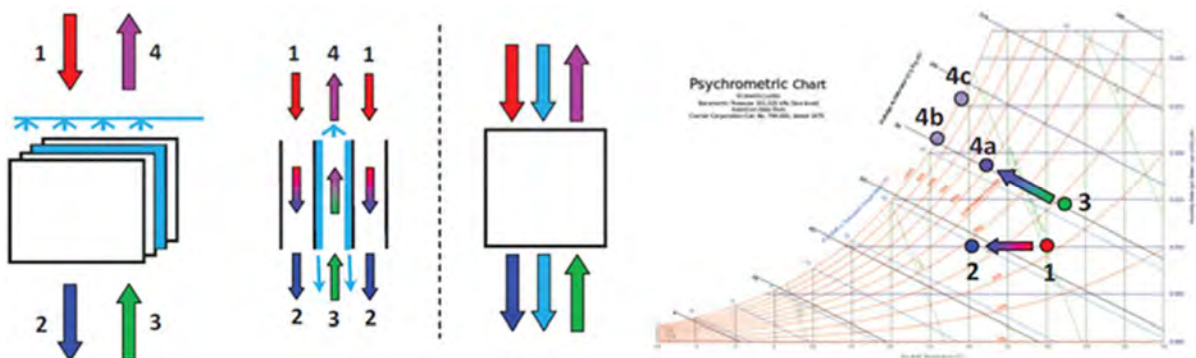


Figure 51 : Fonctionnement d'un système de rafraîchissement par évaporation indirecte [B. Porumb & al.]

Il existe également des systèmes de rafraîchissement par évaporation indirecte plus complexes qui utilisent une partie du flux d'air primaire sortant pour l'injecter dans un canal humidifié à contre-courant puis le rejeter. Le moteur du système refroidit progressivement l'air entrant par un échangeur sensible ($1 \rightarrow 2a \rightarrow 2b$). Cela permet d'atteindre en sortie une température d'air plus basse que la température de bulbe humide de l'air extérieur entrant (3a), qui est la limite théorique de température atteinte par un laveur ou système de rafraîchissement évaporatif direct.

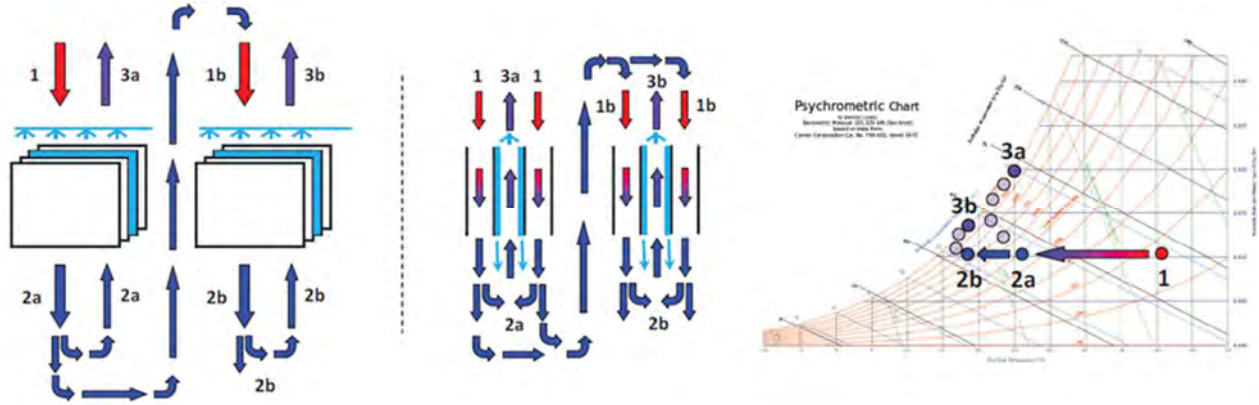


Figure 52 : Fonctionnement d'un système de rafraîchissement par évaporation indirecte à point de rosée [B. Porumb & al.]

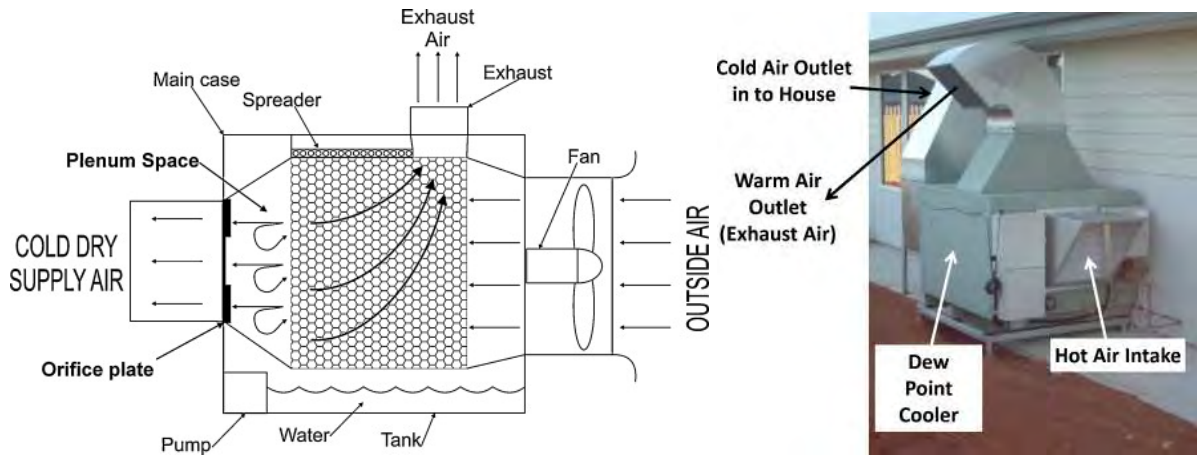


Figure 53 : Système de rafraîchissement évaporatif à point de rosée [B. Porumb & al.]

[Bruno Franck] définit plusieurs indicateurs d'efficacité concernant les systèmes de rafraîchissement évaporatifs :

Le rapport d'efficacité énergétique EER, correspond au rapport de la capacité frigorifique produite sur la somme des consommations électriques de la pompe et du ventilateur, pour une période de temps donnée.

$$EER = \frac{\text{énergie froide absorbée sur la période}}{\sum \text{consommations électriques (pompe + ventilateur) sur la même période}}$$

L'efficacité de bulbe humide ε_{bh} , correspond à l'efficacité d'un échangeur à contre-courant échangeant entre un fluide à la température de bulbe humide T_{bh} , limite potentiellement atteinte par l'air sec entrant à la température T_{in} , et l'air le traversant pour être rafraîchi puis diffusé à la température d'air sec T_{out} .

$$\varepsilon_{bh} = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_{bh}}$$

L'efficacité de point de rosée ε_{dp} , correspond à l'efficacité d'un échangeur à contre-courant échangeant entre un fluide à la température de rosée T_{dp} correspondant à la température de l'air sec entrant T_{in} et l'air le traversant pour être rafraîchi puis diffusé à la température d'air sec T_{out} .

$$\varepsilon_{dp} = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_{dp}}$$

[Bruno Franck] fournit des résultats de mesure pour les deux cas d'études suivants. Le premier concerne un centre commercial dont 20% du débit de climatisation est renouvelé et traité par un système de rafraîchissement évaporatif à point de rosée, avec un fonctionnement du ventilateur à sa vitesse maximum. Le second s'intéresse à une maison individuelle de 140 m² équipée d'un système équivalent mais avec un contrôle

de la température intérieure par action sur la vitesse du ventilateur. Les deux cas d'expérimentation étaient situés en Australie, respectivement à Adélaïde et Roxby Downs :

- Pour le centre commercial,
 - La température de sortie moyenne était de 17,3°C. La plus basse température atteinte était de 14,7°C
 - Le rapport d'efficacité énergétique moyen *EER* de chaque journée était compris entre 7,2 et 11,5 sur une période estivale où la température maximale atteint 35°C. Le même rapport *EER* est tombé entre 4 et 5 pour des jours ensoleillés bénéficiant d'une température maximale de 27°C
 - L'efficacité de bulbe humide a été calculée entre 93 et 106% alors que l'efficacité de point de rosée était estimée entre 57 et 74%.
- Pour le logement résidentiel,
 - Le rapport d'efficacité énergétique moyen *EER* se situait entre 4,9 et 11,8 alors que la température extérieure variait entre 27,5 et 40,4°C.
 - La température de sortie moyenne était de 14,9°C pour une température ambiante extérieure de 34,7°C. Et la plus basse température de sortie atteinte a été relevée à 10,2°C. Même pour des conditions extérieures humides, la température de sortie est restée sous les 20°C.
 - L'efficacité de bulbe humide était dans la plage 118% à 129% pour une moyenne à 124%, alors que l'efficacité de point de rosée est restée entre 65% et 83% et une moyenne de 75%

Ces résultats sont corroborés par ceux de [M. Jradi & S. Riffat], qui ont développé et validé un modèle numérique par différences finies et donnent les valeurs suivantes :

- Le rapport d'efficacité énergétique *EER* = 14,2 à 300 m³/h et 5,9 à 1500 m³/h pour des conditions en températures et humidités extérieures, respectivement de 41,1°C/14,5%HR et 26,1°C/38,1%HR
- La température et l'humidité en sortie du système de rafraîchissement évaporatif à point de rosée étaient de 17,3°C/61,6%HR et 19,5°C/76%HR, et donc à des puissances de 1053 W et 1247 W respectivement
- L'efficacité de bulbe humide de 112% pour le débit le plus faible 300 m³/h
- L'efficacité de point de rosée de 78% pour le débit le plus faible 300 m³/h

[M. Jradi & S. Riffat] précisent aussi que l'efficacité énergétique d'un système de rafraîchissement évaporatif à point de rosée est proportionnelle à la température extérieure et à la longueur du canal d'échange, et inversement proportionnelle à la vitesse de l'air au travers de l'échangeur.

Un modèle du rapport d'efficacité énergétique est proposé par [Bruno Franck] pour des systèmes de rafraîchissement évaporatif à point de rosée, fonctionnant à vitesse constante.

$$EER = 0,3433 \times (T_{in} - T_{dp}) - 0,117$$

Ces résultats et ce modèle montrent que l'efficacité d'un tel système augmente de façon très sensible lorsque les conditions météorologiques sont de plus en plus chaudes et sèches.

La comparaison avec un système de climatisation par compression, donne une économie d'énergie de l'ordre de 52% et à 56% avec le rafraîchissement évaporatif à point de rosée.

Les avantages d'une solution de rafraîchissement évaporatif :

- La performance moyenne est élevée de l'ordre de 10
- La puissance augmente lorsque l'humidité relative extérieure baisse ce qui arrive généralement au cours de la journée lorsque la température extérieure augmente
- Ce système est compact et peut remplir les mêmes fonctions qu'une VMC double flux

Les inconvénients du rafraîchissement évaporatif :

- Pas utilisable la nuit car l'humidité de l'air extérieure est généralement élevée
- Dépend fortement des conditions extérieures

- Consommation d'eau, selon l'étude [M. Jradi et S. Riffat, «Experimental and numerical investigation of a dew-point cooling system for thermal comfort in buildings,» Applied Energy, vol. 132, pp. 524-535, 2014] la consommation d'eau varie de 3,6 kg/h à 4,2 kg/h lorsque le débit varie de 300 m³/h à 1500 m³/h.
- Pour le rafraîchissement évaporatif direct, risque de développement bactérien vecteur de maladie par l'insufflation d'air
- Pour le rafraîchissement évaporatif direct, augmentation de l'hygrométrie ambiante
- Pour le rafraîchissement évaporatif indirect, limitation de la puissance dissipée en fonction de l'hygrométrie de l'air intérieur, peut nécessiter un traitement dessicant au niveau de l'insufflation d'air

2.4.12. Climatisation solaire

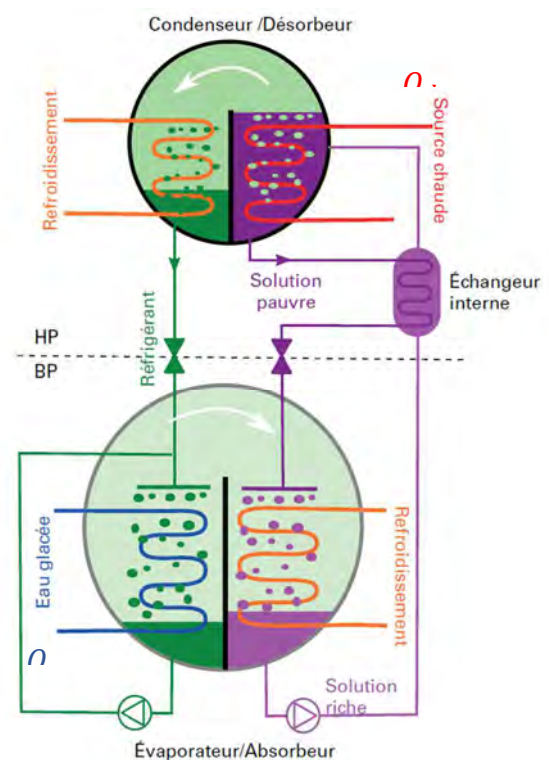
La climatisation solaire s'effectue principalement avec des systèmes à absorption. Dans les machines à absorption, aussi appelées machines trithermes, le cycle thermodynamique est le même que pour les machines à compression : évaporation → compression → condensation → détente.

Mais le compresseur y est remplacé par l'association absorbeur / générateur (ou concentrateur ou encore désorbeur).

Les machines trithermes utilisent deux fluides : le réfrigérant ou frigorigène qui capte l'énergie du fluide ou du milieu à refroidir et le sorbant ou absorbant qui assure la fonction de pompage du fluide frigorigène et entretient le cycle thermodynamique.

Pour les applications de froid solaire, la source chaude est produite au moyen de capteurs solaires thermiques.

Figure 54 : Schéma de fonctionnement d'une machine à absorption simple effet - [sources : Sciences de l'Ingénieur réf. be9735]



Le cycle thermodynamique d'une machine tritherme est le suivant :

1. Dans l'évaporateur maintenu sous à faible pression, le réfrigérant liquide est transformé en vapeur en récupérant l'énergie basse température du fluide ou du milieu à refroidir. Sur la Figure 55, Q_{ev} correspond à l'énergie captée par le réfrigérant au fluide à refroidir.
2. Dans l'absorbeur, les vapeurs de réfrigérant issues de l'évaporateur sont ensuite captées par le fluide absorbant concentré. L'absorption du réfrigérant par le sorbant maintient un niveau de pression basse et occasionne un dégagement de chaleur Q_{abs} , énergie qui peut être récupérée pour d'autres applications ou pour améliorer le rendement du système.

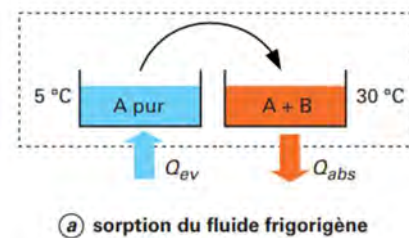


Figure 55 : Principe d'évaporation/absorption gaz dans un liquide – [sources : Sciences de l'Ingénieur réf. be9735]

3. Dans le concentrateur/désorbeur, la solution diluée réfrigérant/absorbant est régénérée, c'est-à-dire que le réfrigérant est séparé du sorbant par une chauffe Q_{des} autour de 80°C (par exemple, au moyen d'un fluide caloporteur mis à température par l'énergie solaire ou d'un brûleur utilisant un combustible fossile). La solution riche en sorbant retourne à l'absorbeur afin de maintenir le cycle d'absorption et les vapeurs de réfrigérant sont envoyées au condenseur.

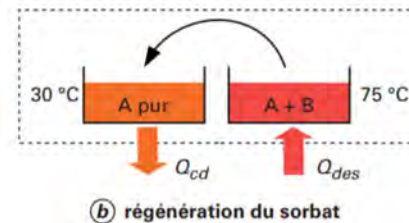


Figure 56 : Désorption gaz/liquide et condensation - [sources : Sciences de l'Ingénieur réf. be9735]

4. Dans le condenseur, les vapeurs de réfrigérants sont refroidies par un fluide caloporteur (énergie potentiellement réutilisable) et les condensats retournent à l'évaporateur pour redémarrer un cycle. Lorsque la condensation des vapeurs du frigorigène s'effectue à haute température (autour de 140°C) et haute pression, il est possible d'ajouter un niveau de désorption pour augmenter le débit du frigorigène et donc la puissance de froid générée (machines double effet). Sur la Figure 56, l'énergie Q_{cd} est libérée par la condensation du réfrigérant.

Les couples réfrigérant/absorbant couramment rencontrés sont : $H_2O/LiBr$ ou $H_2O/LiCl$ ou NH_3/H_2O .

Le coefficient de performance thermique COP_{th} des machines frigorifiques à absorption varie entre 0,6 et 1,5 suivant la température de la source chaude disponible et le nombre d'étages de désorption mis en œuvre.

Lorsque la source de chaleur du générateur/concentrateur est l'énergie solaire gratuite, les performances sont d'autant plus intéressantes que la consommation se résume à quelques circulateurs. Le coefficient de performance électrique COP_{el} des installations de froid solaire, équivalent au rapport d'efficacité énergétique EER (cf. §2.4.13), se situe entre 6 et 25 avec une moyenne de 12,9 [AIE – «Task 48 - Activity D2 Final Report», 2015].

Les différents coefficients de performances sont définis par les rapports suivants :

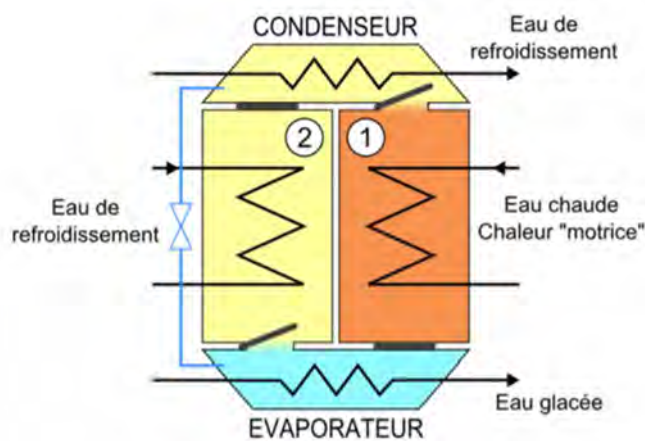
$$COP_{th} = \frac{Q_{ev}}{Q_{des}} \quad COP_{el} = \frac{Q_{ev}}{Q_{elec}}$$

Où Q_{elec} est l'énergie électrique consommée par les pompes de circulation.

Il existe aussi des machines à adsorption qui remplace l'absorbant liquide par un matériau solide, l'adsorbant. Ce matériau dispose de propriétés physiques de sorption lui permettant de capter les vapeurs du fluide frigorigène à sa surface (on dit adsorber) afin de maintenir continuellement la pression basse dans l'évaporateur.

Cependant, l'absorbant étant solide, il n'est pas possible de le régénérer par chauffage lorsqu'il est saturé en réfrigérant sans interrompre le processus d'adsorption. Afin d'assurer la continuité du cycle thermodynamique et la production de froid, l'adsorbeur, correspondant au condenseur/désorbeur peut être constitué de deux compartiments symétriques contenant une même quantité d'adsorbant inversibles au moyen de clapets à chaque fois qu'un compartiment est saturé par le frigorigène.

Figure 57 : Principe de l'adsorbeur pour les machines à adsorption [sources : https://www.solaire-collectif.fr/photo/img/Froid%20solaire/Fiches%20techniques%20composants/02_Machines_frigorifiques_adsorption.pdf]



L'adsorbant peut être du silicagel associé au réfrigérant : eau.

Le coefficient de performance énergétique des machines à adsorption ne dépasse pas 0,65 et la gamme de puissance unitaire est généralement plus faible que celles des machines à absorption.

Un système de climatisation solaire présente les avantages suivants :

- Fait du froid avec du chaud. Il y a concomitance des besoins et de la ressource solaire
- Pas de limite haute de puissance
- Durée de vie longue. Les machines à adsorption ont encore moins de pièces en mouvement (pompes...)
- La performance moyenne est élevée de l'ordre de 12
- Le système peut aussi être utilisé pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire à partir du solaire thermique

Un système de climatisation solaire déplore les inconvénients suivants :

- Complexité du système
- Coûts d'installation élevés
- Absence d'offre pour le résidentiel individuel. L'unité de production des machines à absorption est plutôt le MWf que le kWf (pour les machines à adsorption, la puissance unitaire varie de 10 à 500 kWf)

2.4.13. Climatisation par système à compression

Les systèmes de climatisation à compression fonctionnent suivant le cycle thermodynamique de Carnot qui prévoit deux changements d'état à pression constante. Le fluide frigorigène est successivement :

- évaporé dans l'évaporateur
- comprimé (compresseur)
- condensé dans le condenseur
- détendu (détendeur)

Les machines frigorifiques à compression sont largement répandues pour les applications de climatisation.

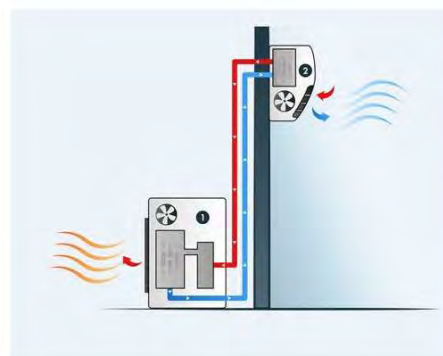


Figure 58 : Vue d'un climatiseur de type air/air, multisplits (à gauche) et splits (à droite) [sources : eurovent-certification.com]

Elles fonctionnent avec différents fluides frigorigènes parmi lesquels, le R32 (tertiaire ou résidentiel), R410A (tertiaire), R134a (fortes puissances tertiaire et industrie).

Il existe plusieurs technologies de compresseur en fonction des usages et des puissances : swing, scroll, vis....

Entre les points 1 et 2, les vapeurs de frigorigène sont comprimées de p_F à p_C . L'enthalpie devient plus importante et la température s'élève. En sortie d'un compresseur réel, l'entropie est également plus grande ($2r$ au lieu du point $2is$).

Entre les points 2 et 4, les vapeurs de frigorigène sont désurchauffées de θ_2 à θ_c , puis condensées à la température constante θ_c . Enfin, le liquide formé est sous-refroidi de θ_c à θ_4 .

Entre les points 4 et 5, le liquide frigorigène se détend dans l'organe de réglage de p_C à p_F en n'échangeant, avec le milieu extérieur, ni énergie mécanique ni chaleur (la détente est isenthalpique). Une partie du liquide s'évapore entre θ_4 et θ_F . Au point 5, le fluide est un mélange liquide-vapeur.

Entre les points 5 et 6, le frigorigène se vaporise, sous la pression constante p_F et à la température constante θ_F , en captant l'énergie du fluide à refroidir dans l'évaporateur. Les vapeurs sont ensuite légèrement surchauffées entre θ_F à θ_6 toujours sous la pression constante p_F .

Entre les points 6 et 1, les vapeurs de frigorigène se réchauffent de θ_6 à θ_1 , dans la conduite d'aspiration du compresseur, toujours sous la pression p_F .

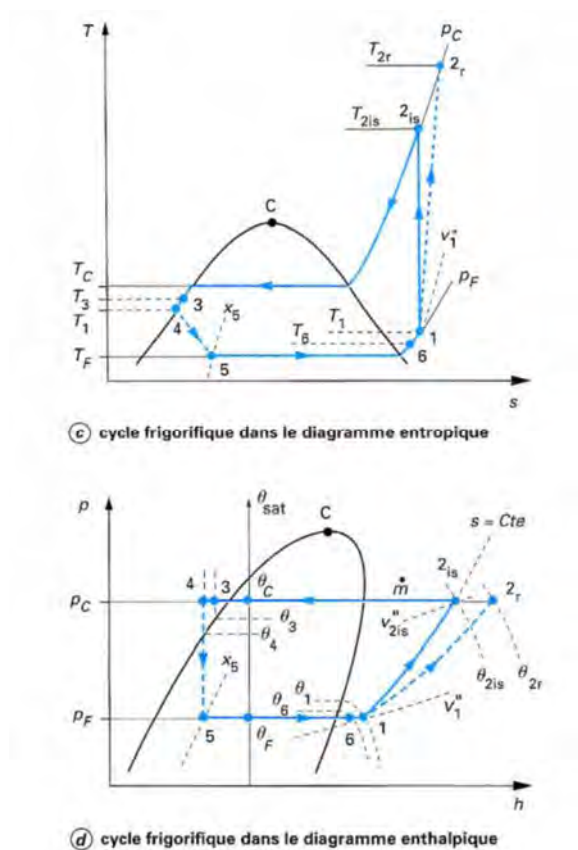


Figure 59 : [sources : Sciences de l'Ingénieur réf. b9730

La performance des systèmes de climatisation par compression s'exprime par le rapport d'efficacité énergétique (EER) et le rapport d'efficacité énergétique saisonnier (SEER).

L'EER est calculée pour les conditions de température / d'hygrométrie suivantes :

- Au condenseur (extérieur) : 35°C / 24°C (bulbe humide)
- A l'évaporateur (intérieur) : 27°C / 50%HR

L'EER_{C%,t°C} est le rapport entre l'énergie absorbée à l'évaporateur (énergie de refroidissement) et l'énergie électrique consommée pour les conditions données. L'EER dépend des conditions de températures et hygrométrie au condenseur et à l'évaporateur. Des valeurs usuelles d'EER se situent entre 3 et 4 pour des climatiseurs individuels.

Le SEER se calcule à partir de la norme NF EN 14825 §5(12/12/2018). Il est défini comme étant le rapport entre la demande annuelle de refroidissement de référence divisée par la consommation annuelle d'électricité.

Ce rapport est calculé à partir des valeurs de EER_{C%,t°C} mesurées dans les conditions de charges partielles : 100% / 74% / 47% / 21%. Les températures / hygrométries côté condenseur et côté évaporateur correspondant aux fonctionnements en charges partielles sont définies dans la norme précitée en fonction du type d'appareil : air/air, eau/air, air/eau et eau/eau.

Les valeurs du SEER sont habituellement supérieures à celles du EER_{100%,35°C} car le rapport saisonnier tient compte des heures de fonctionnement à charge partielle c% pour lesquelles l'EER_{C%,t°C} est plus élevé que pour les conditions nominales de fonctionnement. Aujourd'hui, on trouve des appareils de climatisation air/air dotés d'un SEER certifié par eurovent-certification.com, autour de 8.

Si l'on considère un besoin de climatisation de l'ordre de 25 W/m² x 800 h/an = 20 kWh/(m².an), et une surface à climatiser de 90 m², les besoins annuels de climatisation représentent 1800 kWh/an, et la

consommation électrique annuelle du système de refroidissement est de 225 kWh/an, ou 563 kWh/an en énergie primaire (avec le coefficient de conversion de 2,5 pour la production d'électricité en France).

Un système de climatisation par compression présente les avantages suivants :

- Le climatiseur peut assurer les fonctions de chauffage et de rafraîchissement. Il ne nécessite qu'un seul investissement.
- Rapport d'efficacité EER allant de 6 à 12.
- Large gamme de puissance.
- Ce système de climatisation contrôle l'humidité ambiante par la condensation des apports latents dus à l'évapotranspiration au niveau des occupants.

Un système de climatisation solaire présente les inconvénients suivants :

- La climatisation réchauffe le milieu environnant qui est la cause des besoins de rafraîchissement.
- Le climatiseur assure la fonction refroidissement en quasi toutes circonstances mais ses performances diminuent avec l'augmentation de la température extérieure. En cas de pic de chaleur extrême ($>50^{\circ}\text{C}$), il se peut que l'appareil ne soit plus opérationnel.
- Les fuites de fluides frigorigènes ont un impact sur le réchauffement climatique.

2.4.14. Effet Peltier

Les sondes Peltier reposent sur le principe physique de l'effet Peltier qui dit que qu'un gradient de potentiel électrique n'engendre pas seulement un déplacement de charges mais également un flux de chaleur proportionnel au coefficient Peltier du matériau. Si l'on fait parcourir un courant électrique dans un matériau composé de jonctions de semi-conducteurs, la différence de flux de chaleur lié à la différence de coefficient Peltier de chaque matériau va faire que la jonction va s'échauffer ou bien se refroidir (en fonction du type de la jonction). En exploitant ce phénomène physique on peut donc créer un système de rafraîchissement composé d'agencement de semi-conducteurs fonctionnant sans fluide frigorigène comme illustré par la figure **Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

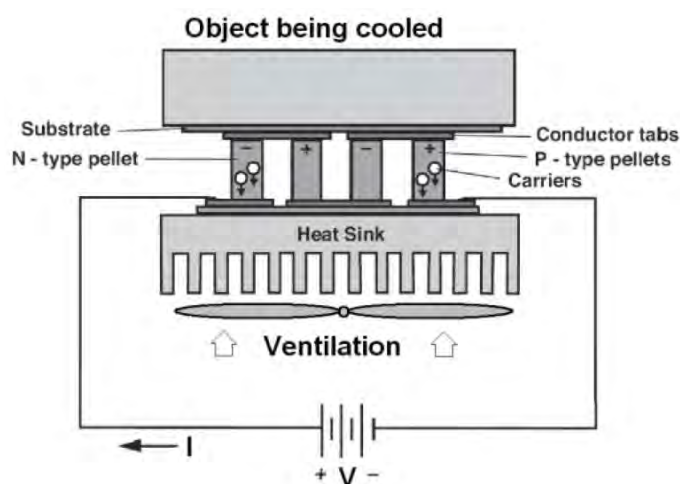


Figure 60 : Système de rafraîchissement utilisant l'effet Peltier [C. Alaoui]

Cette technologie présente de nombreux avantages :

- La durée de vie est importante entre 125 000 et 200 000 h de fonctionnement [32]
- Le système est silencieux
- Le système est peu dépendant des conditions extérieures, uniquement dépendant de la différence de température

Les inconvénients de cette technologie sont les suivants :

- La performance est faible entre 1 et 2

- La distance séparant la partie froide et la partie chaude étant faible, il faut pouvoir évacuer la chaleur sans qu'elle ne vienne réchauffer la source froide.

2.4.15. Puits provençal

Le puits provençal aussi appelé puits canadien pour les climats plus froids est simplement constitué d'un échangeur air-sol, un tube circulant dans le sol véhicule l'air de renouvellement insufflé dans le logement. Le traitement des infiltrations d'air, rafraîchissement de l'air l'été et réchauffement en hiver au contact du sol, est d'autant plus important que le bâtiment est étanche et thermiquement performant. En effet, les apports ou les déperditions par infiltrations représentent alors une part importante des gains / pertes totaux et peuvent être ainsi efficacement combattus par ce système.

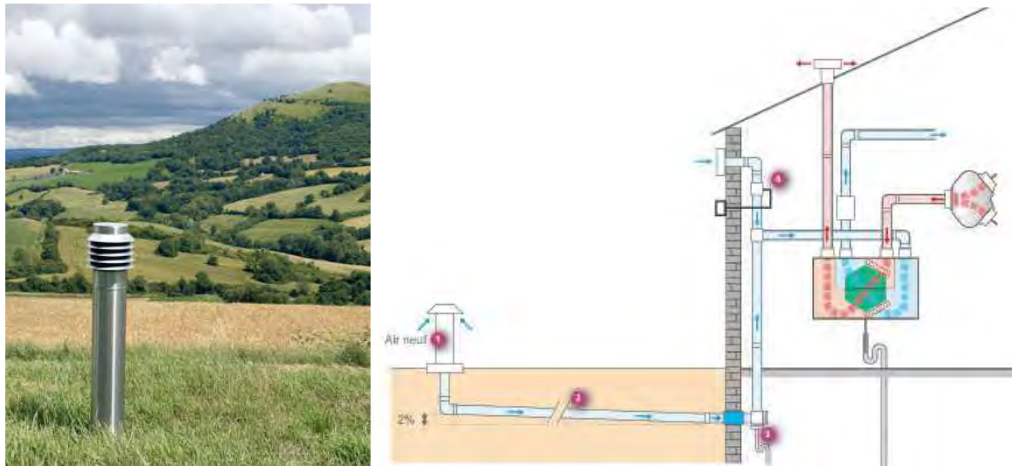


Figure 61 : www.sodielec-berger.fr/fr/-content/255/88/vmc/puits-canadien-putts-canadien

L'air circulant dans les tubes enterrés provient de l'extérieur et le gain de température à la sortie de l'échangeur air-sol peut atteindre de 10 à 15°C suivant la longueur, le diamètre, la conductivité thermique et la profondeur du tube, le débit d'air, et la nature du sol.

La profondeur des tubes enterrés est au minima de 2 m, profondeur à partir de laquelle la température du sol varie peu sur une année complète sinon sur la saison estivale. La température moyenne dans le sol à cette profondeur se situe entre 10 et 17°C suivant les conditions climatiques du site considéré. Elle est généralement assez proche de la température moyenne extérieure.

La longueur optimale du tube enterré est généralement au minimum de 30 m.

L'efficacité d'un tel échangeur se calcule avec la formule des échangeurs à contre-courant pour laquelle T_{in2} serait remplacée par T_{sol} :

$$\eta = \frac{T_{air,in} - T_{air,out}}{T_{air,in} - T_{sol}}$$

L'efficacité dépend donc de la température d'air en sortie de l'échangeur. $T_{air,in}$ est la température d'air à l'entrée du puits provençal, et est égale à la température extérieure.

En été pour des températures extérieures élevées, plus la température de sortie $T_{air,out}$ est haute, plus la différence de températures sur l'air $T_{air,in} - T_{air,out}$ est faible, et donc plus l'efficacité est faible. C'est ce qui explique pourquoi l'efficacité du puits diminue avec l'augmentation du débit car l'air est moins refroidi au contact du sol sur une même longueur de tube enterré lorsque son débit est plus élevé. Dans ce cas, la puissance échangée entre l'air et le sol est plus importante notamment parce que l'écart de température entre le sol et l'air est en moyenne plus grand sur la longueur du tube enterré. Si la température de sortie $T_{air,out}$ est égale à la température de consigne d'été 26°C, les économies d'énergie réalisées sur les besoins en rafraîchissement correspondent aux apports par infiltration du bâtiment quel que soit le débit de ventilation. Lorsque la température de sortie $T_{air,out}$ est inférieure à cette

température de consigne, le puits provençal distribue alors un air plus frais dans l'ambiance, ce qui permet de combattre plus d'apports (solaires, internes, parois...) et augmente ainsi les économies d'énergies en climatisation. Et pour une même température d'air en sortie du puits, plus le débit est élevé, plus les économies d'énergies sont importantes sur les besoins en rafraîchissement. Le débit de ventilation d'un puits provençal doit donc être le meilleur compromis entre la température de sortie la plus faible possible et le débit d'air le plus élevé possible.

En hiver, le comportement thermique de l'échangeur n'est pas tout-à-fait le même puisque la température d'air en sortie du puits est toujours inférieure à la température de consigne hivernal, 19 à 20°C. Le puits provençal n'est donc pas en mesure de compenser la totalité des pertes par infiltrations. Ainsi, comme pour tous bâtiments énergétiquement performants, plus le taux de renouvellement d'air est faible en hiver, plus importantes sont les économies de chauffage. Cependant, il faut aussi souligner que les écarts de températures intérieur/extérieur souvent plus importants en hiver qu'en été permettent à ce système d'assurer une plus grande partie du service chauffage comparativement au rafraîchissement.

Le choix du débit d'air distribué par le puits provençal est donc le résultat d'un compromis multiple, d'une part entre les économies de chauffage et de rafraîchissement, et d'autre part entre l'abaissement de la température d'air soufflé et la masse d'air transportée. Ainsi, il apparaît judicieux d'adapter le débit de ventilation du puits provençal entre l'hiver, débit faible correspondant aux seuls besoins de renouvellement hygiéniques et l'été, débit optimum pour améliorer le rafraîchissement dans le bâtiment ventilé.

Les simulations réalisées sous TRNSYS par [E. Massaguer & al.] sur une maison de 120 m², volume habitable : 300 m³, 40% de ratio de surface vitrée dont 40% exposée Sud, située à Barcelone (Espagne) ont permis d'atteindre les économies d'énergie suivantes, respectivement 10,5% en hiver et 25,1% en été. Le puits provençal était dimensionné pour 165 m³/h, à 2 m de profondeur (température du sol : 17°C), et 40 m de longueur de tube enterré. Cette étude semble indiquer que l'énergie apportée par le puits provençal dépend assez peu du diamètre de la canalisation enterrée. Celui-ci peut être optimisé autour de 40 cm.

Une autre étude menée sur une villa de 200 m² exposé au climat de Hay Riad (Maroc) donne des résultats différents avec une plus grande contribution du puits provençal sur la réduction des besoins en chaud que pour les besoins en froid. La canalisation est réalisée avec un tube de diamètre 20 cm, une longueur de 30 m et une profondeur d'enfouissement de 2 m. La température moyenne annuelle du site considéré est de 15,5°C avec une amplitude de 4,9°C. La température moyenne du sol à 2 m est identique. Le débit d'air circulant dans le puits provençal était de 260 m³/h.

[Najia Touzani & J. Eddine Jellal] nous donne les plages de puissance du puits provençal, respectivement pour le chauffage et la climatisation, entre 0 et 1 kW en février et entre 0 et 700 W en août. Les économies d'énergies sont estimées à 26 kWh par mois d'été et jusqu'à 258 kWh par mois d'hiver (en tenant compte de la consommation du ventilateur associé au puits).

[S.N. Ahmad & O. Prakash] ont recherché l'optimum de la longueur du tube échangeur et du coefficient de transfert thermique à partir d'un plan d'expérimentation faisant varier les paramètres dimensionnels et physiques du système : profondeur (1 / 1.5 / 2 m), diamètre intérieur (5 / 10 / 15 cm), conductivité thermique du tube enterré (0.15 / 0.2 / 0.25 W/m.K), température d'entrée d'air (305 / 309 / 313 K), température de sortie d'air (298 / 299.5 / 301 K), vitesse d'air à l'entrée du tube (1 / 1.5 / 2 m/s).

[G. Leroux] rappelle que la puissance froide échangée entre l'air et le sol par le puits provençal varie entre 6 et 30 W/m ou 9 et 50 W/m². Il ajoute que le potentiel est nettement plus important pour les climats continentaux ayant des hivers rigoureux permettant de recharger le sol.

Le COP, coefficient de performance à un instant donné, d'un échangeur de chaleur Sol-Air est défini par le rapport entre le flux de chaleur absorbée à l'air par le sol au travers du système de puits provençal et la puissance électrique absorbée par le ventilateur. La formule est la suivante :

$$COP = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{air,in} - T_{air,out})}{Q_E}$$

Où :

- $\dot{m}$: débit d'air exprimé en kg/s

- c_p : chaleur spécifique de l'air, exprimé en J/(kg.K)
- $T_{air,in} - T_{air,out}$: différence de température d'air entre l'entrée et la sortie du tube enterré, exprimée en °C
- Q_E : puissance électrique absorbée par le ventilateur, exprimée en W

On peut également l'écrire en y ajoutant les échanges latents le cas échéant : $COP = \frac{\dot{m} \cdot (h_{air,in} - h_{air,out})}{Q_E}$

En été, le COP des puits provençaux se situe généralement entre 2 et 3,5. En hiver, il est plus important, jusqu'à 5,8 [N. Touzani & J.E. Jellal].

L'étude expérimentale de [H. Li & al.] concernant un système associant un récupérateur de chaleur Air-Air à un puits provençal a pu mesurer un COP instantané beaucoup plus important (> 20). Le COP annuel correspondant au rapport entre l'énergie ôtée à l'air entrant sur l'énergie électrique consommée (ventilateurs du puits et du système de récupération double-flux) a été évalué à 8,5. Le puits provençal était constitué d'un tube de diamètre 31 cm circulant dans le sol à 5 m de profondeur avec un retour à 2,5 m, pour une longueur totale de 36 m. Le débit du ventilateur était de 1808 m³/h pour une puissance électrique nominale de 170 W.

[Basharat Jamil & M. Jammil Ahmad] ont montré qu'un échangeur sol-air dimensionné pour un taux de renouvellement de 40 vol/h et une vitesse d'air de 3 m/s, diamètre : 60 cm, longueur = 78 m et enterré à 1,5 m de profondeur (température de sol de 25°C) est en mesure d'abaisser la température intérieure d'un logement en pisé situé à Jodhpur (Inde) à 25 à 27,1°C soit jusqu'à 12°C sous la température extérieure estivale (27,2°C à 38,8°C) et de plus de 16°C sous la température du logement ventilé sans le puits provençal (43,9°C max). L'intérêt de l'échangeur sol-air n'est pas démontré pour les régions plus froides de l'Inde (Srinagar) mais reste pertinent pour le climat modéré de Bangalore (23,6 à 34°C l'été).

[Vikas Bansal & al.] montrent également par la modélisation FLUENT qu'un puits provençal de diamètre 15 cm, de longueur 23,4 m, profondeur d'enfouissement de 2,7 m et une vitesse d'air de 2 à 5 m/s permet un gain en température de 8 à 12,7°C par rapport à la température extérieure. L'échangeur sol-air alimentait une installation expérimental situé à Ajmer (Inde, Ouest). Le COP de l'échangeur varie de 1,9 à 2,9 pour la même plage de vitesse d'air dans le tube.

[F. Al-Ajmi & al.] ont obtenu par la modélisation TRNSYS-IISIBAT les résultats suivants concernant un logement koweïtien traditionnel équipé d'un puits provençal :

- Un échangeur sol-air de longueur 60m, de diamètre 25 cm, profondeur : 4 m et dans lequel circule un débit de 100 kg/h permet d'obtenir une réduction de température de 2,8°C au pic de température à la mi-juillet. La température intérieure est limitée à 28 à 32°C durant l'été avec le dispositif de puits provençal.
- Sur la période de mai à septembre sous le climat du Koweït, l'échangeur sol-air apporte une réduction de 1700 W sur le pic de charge d'un bâtiment climatisé.
- L'échangeur sol-air associé à un système de climatisation permet de réduire les besoins en froid jusqu'à 420 kWh sur le seul mois de juillet. Une réduction de 30% de la charge de climatisation sur la saison estivale est possible.
- Un puits provençal seul permet d'assurer le confort saisonnier (22 – 27°C)

Le puits provençal présente les avantages suivants :

- Ce système est également intéressant en hiver pour préchauffer l'air entrant, sans surcoût.
- C'est un système simple nécessitant peu d'entretien (quelques changements de filtre et nettoyage du tuyau).
- Une partie de l'humidité contenue dans l'air véhiculé se condense sur les parois du puits provençal, ce qui contribue à abaisser l'hygrométrie de l'air ambiant et favorise les échanges latents.
- Lorsqu'il est couplé à un échangeur récupérateur de chaleur, les performances du système puits provençal + échangeur double-flux sont élevées et de l'ordre de 10.

Les inconvénients de cette technologie sont les suivants :

- Des précautions sont à prévoir dans les zones géographiques où la concentration en radon est importante dans le sol. Ce gaz radioactif naturellement présent dans le sol peut être distribué dans l'ambiance du bâtiment via le puits provençal. Pour limiter ce risque, il faut privilégier une ventilation par insufflation afin de générer une surpression dans le puits et éviter d'aspirer l'air à travers le puits en dépression, ce qui favoriserait la migration du gaz dans l'air.
- Le calcul du COP à partir de l'énergie extraite à l'air circulant dans le puits provençal n'est pas représentatif de la capacité de rafraîchissement du bâtiment qui dépend de la différence de température entre l'air frais sortant du puits provençal et de l'air ambiant intérieur. Dans la réalité, il faut prendre des précautions pour le dimensionnement d'un tel système.
- Le puits canadien a besoin d'un volume enterré important. Ce système n'est pas envisageable sur les sites urbanisés de forte densité.

2.4.16. Géocooling

Les systèmes de géocooling peuvent être regroupés en deux catégories : sondes géothermiques verticales et sondes géothermiques horizontales peu profondes. Le principe du géocooling est similaire au système du puits provençal (cf. §2.4.15), car il repose sur l'idée d'évacuer la chaleur dans le sol. La principale différence est que la dissipation d'énergie dans le sol s'effectue au travers d'un fluide caloporteur intermédiaire, généralement l'eau glycolée, circulant en boucle fermée dans un réseau enterré dans le sol. Pour les installations verticales, le système est réalisé par un ensemble de sondes géothermiques verticales comme autant de tubes en U qui plongent sur plusieurs dizaines de mètres de profondeur.

[G. Leroux] donne un ordre de grandeur des performances d'un système de rafraîchissement par sondes géothermiques verticales : 20 W/m pour une profondeur de forage de 50 m. Le COP annuel est mesuré à 9,85 (cf. §2.4.15).

Les systèmes de géocooling présentent les avantages suivants :

- Les performances moyennes sont proches de 10
- La puissance est stable par rapport aux conditions météorologiques
- Le système peut être utilisé en hiver s'il est couplé à une PAC. Cela permet de décharger le sol thermiquement pendant tout l'hiver et de le recharger en été. Le sol est plus froid avant le début de la saison estivale.

Les inconvénients de cette technologie sont les suivants :

- Cette solution n'est pas optimale si elle est utilisée en continu il faut permettre au sol de se régénérer.
- Cette solution est coûteuse à cause du forage.
- Nécessite un terrain exploitable.

2.4.17. Conclusions

D'après [Taylor, M.], « la conversion de bâtiment d'usage industriel, commercial en logements », la division en « petits espaces mal ventilés », « les volumes non isolés et non ventilés », « les toitures non isolés », « le simple vitrage », « les vitrages peints », « les surfaces vitrées fixes, sans ouverture », « les murs vitrés, les dômes de verre », « les défaillances des systèmes de chauffage et d'eau chaude », « les systèmes de chauffage et eau chaude collectifs », « la situation en espace urbain », « les nuisances sonores et la pollution », « les questions de sécurité », « la densité de surfaces absorbantes et réfléchissantes », « le manque d'espace vert », « l'aménagement du bâtiment produisant des appartements à aspect unique s'ouvrant sur un couloir central » sont autant de facteurs de risque de surchauffe dans les bâtiments anciens rénovés.

Pour des constructions récentes, il énonce « les systèmes de ventilation en défaut », ou « non maîtrisés par les occupants » ou « mal conçus », « les systèmes de chauffage comme les planchers chauffants difficiles à contrôler », « les conduites d'eau chaude collectives circulant dans les appartements ou les circulations communes » comme contributeurs aux risques de surchauffe.

Le choix des systèmes de rafraîchissement passif(s) et actif(s) n'est jamais trivial.

- Les paramètres constructifs comme l'orientation du bâtiment, et son aménagement, les matériaux structurels, l'isolation (position, épaisseur, matériau) dépendent de nombreux facteurs dont le climat et les usages (heures d'occupation, systèmes de rafraîchissement / climatisation utilisés).
- Le coefficient de forme et le volume des bâtiments à rafraîchir sont à minimiser autant qu'il peut être acceptable.
- Les protections supplémentaires : le choix des vitrages et de leurs dimensions, celui des masques solaires fixes ou mobiles, leur pilotage dépendent aussi des conditions extérieures.
- La question de la présence d'une ou de plusieurs source(s) froide(s) exploitable(s) permettant de choisir le(s) système(s) de rafraîchissement passif(s) et éventuellement actif(s) doit être systématiquement posée.
- La ventilation naturelle doit être mise en œuvre partout où le climat le permet (exposition aux vents et potentiel nocturne notamment).
- Le choix des systèmes de rafraîchissement dépend de la nature des sources froides exploitables (clarté du ciel, température moyenne du sol, exposition aux vents, amplitude des températures extérieures sur 24 heures, ressources en eau fraîche) mais aussi de la puissance de rafraîchissement à fournir (volumes à rafraîchir, apports internes à combattre...) et des ressources en électricité.
- L'association de plusieurs systèmes de rafraîchissement passifs doit être préférée aux systèmes actifs. Le cas échéant, la combinaison de systèmes passifs et actifs peut être étudiée pour atteindre les objectifs de confort adaptatif fixés.
- L'efficacité des systèmes de rafraîchissement actifs complémentaires dépend de leur juste dimensionnement, du mode de pilotage ainsi que de la température de la source froide exploitée.
- L'ajout de murs ou d'éléments de façade végétalisés est une question plus d'esthétique et budgétaire.

L'application des mesures suivantes visant à réduire les gains solaires et internes ainsi qu'à dissiper l'excès de chaleur du bâtiment : inertie, ventilation naturelle nocturne, gestion des protections solaires permet de réduire de 70% le nombre de degrés-heures de surchauffe selon [M. Orme & J. Palmer].

2.5. Indicateurs de performance

2.5.1. Confort thermique

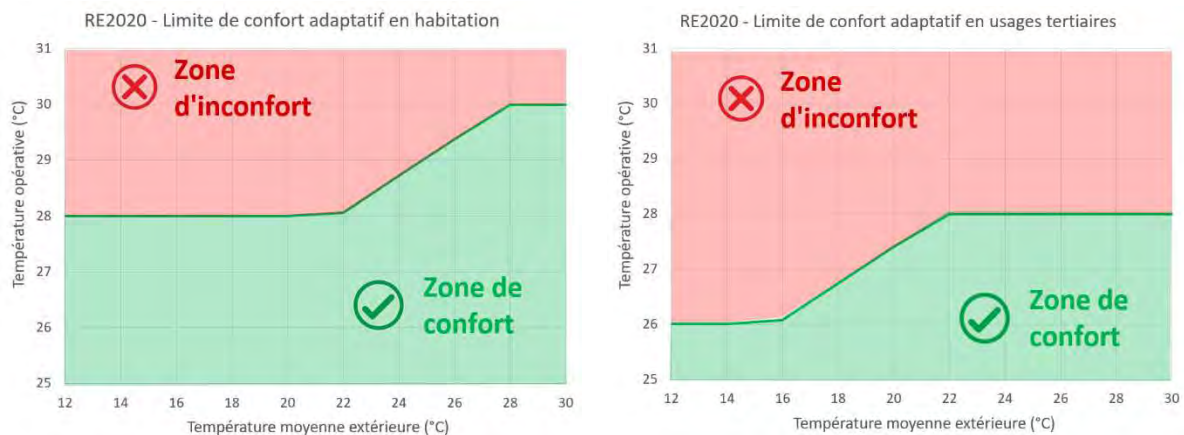
2.5.1.1. Selon la RE 2020

La RE2020 a introduit un nouvel indicateur de confort hygrothermique : le nombre de degrés-heures d'inconfort estival, exprimé en °C.h et noté DH. Il est évalué pour chaque partie de bâtiment thermiquement homogène, c'est-à-dire au niveau groupe au sens de la méthode de calcul réglementaire. Le calcul de cet indicateur consiste à sommer sur chaque pas de temps l'écart entre la température opérative du groupe et une température limite d'inconfort chaud prenant en compte le confort adaptatif, basée sur la norme NF EN 15251.

Conformément à la norme, la température limite d'inconfort chaud considérée est calculée à chaque pas de temps en fonction de la température extérieure en moyenne glissante journalière. La valeur de catégorie d'ambiance retenue pour l'exigence réglementaire est la catégorie 1 pour tous les usages.

Par rapport à la norme, le calcul de l'indicateur réglementaire retient les adaptations suivantes :

- La température limite d'inconfort chaud n'est jamais inférieure à la température de consigne réglementaire considérée pour les locaux climatisés (28°C en logement, 26°C pour les autres usages).
- La température limite d'inconfort chaud est limitée à 2°C au-dessus de cette même température de consigne de refroidissement
- L'échange thermique entre l'occupant et l'air ambiant étant considéré comme réduit en période de sommeil, pour les usages d'habitation, la température d'inconfort chaud aux heures de la nuit (22h à 6h) est supposée égale à la température de consigne de refroidissement en occupation normale, sans effet du confort adaptatif.



Températures limites d'inconfort chaud adaptatives prises en compte pour l'indicateur réglementaire DH

Conformément à la norme, en présence de systèmes qui modifient la sensation thermique des occupants (par la création d'une vitesse d'air, un apport ou une diminution de l'humidité de l'air, etc.), la zone de confort est modifiée : augmentation de la température limite d'inconfort chaud.

Un inconfort n'est considéré qu'en période d'occupation et en période de confort adaptatif, lorsque la température limite d'inconfort chaud est à la température de consigne de refroidissement. Sur ces périodes, l'indicateur est calculé en sommant pour chaque pas de temps l'écart entre la température opérative du groupe et une température limite d'inconfort chaud.

Cet indicateur a l'avantage d'exprimer à la fois la durée et l'intensité des périodes d'inconfort et de prendre en compte le phénomène de confort adaptatif qui constitue une approche intéressante du comportement et du ressenti des occupants. Il présente en cela un intérêt supérieur aux indicateurs plus basiques de type nombre d'heures ou pourcentage d'inconfort au-delà d'une température fixe.

Autre avantage, son utilisation dans le prochain calcul réglementaire va en faire un indicateur que les intervenants (concepteurs, maîtres d'ouvrage, architectes) vont s'approprier, en termes de définition et d'ordres de grandeur.

D'autres indicateurs peuvent cependant rendre compte de façon plus complète des phénomènes influant sur le confort hygrothermique : humidité de l'air, vitesse d'air, habillement...

2.5.1.2. Autres indicateurs

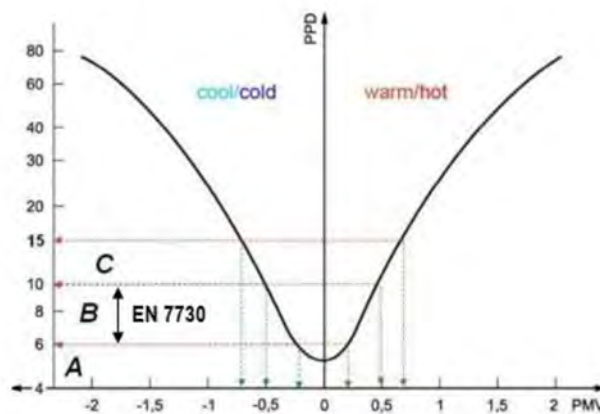
Indicateurs PMV/PPD et modèle de Fanger

Le PMV (Predicted Mean Vote) est un indicateur de confort représentant l'avis moyen d'un groupe important de personnes qui exprimerait un vote de sensation de confort thermique. Cet indicateur se mesure sur une échelle de sensation thermique à 7 niveaux. Une valeur de PMV négative signifie que la température est plus basse que la température idéale et réciproquement une valeur positive signale qu'elle est plus élevée. Cette échelle a été conçue en confrontant les équations physiques avec des expériences réalisées en chambre climatique et validée à la fin des années 70 par une enquête statistique sur un grand nombre de personnes (500) placées dans des conditions thermiques données.

Echelle de ASHRAE	
+3	Très chaud
+2	Chaud
+1	Légèrement chaud
0	Neutre
-1	Légèrement froid
-2	Froid
-3	Très froid

Échelles de sensation de confort thermique PMV (ASHRAE)

A partir de l'indicateur PMV, il est possible d'évaluer le pourcentage de personnes insatisfaites par rapport à la situation thermique à l'aide de la Figure IV. 11. Par exemple, 25 % de la population n'est pas satisfaite pour un PMV est de -1 ou $+1$. A l'inverse, pour limiter le PPD à 10 % (comme précisé dans la norme ISO 7730), le PMV doit se situer entre $-0,5$ et $+0,5$. Notons enfin que même pour un état de confort thermique optimal ($PMV = 0$), il y a encore 5 % d'insatisfaits.

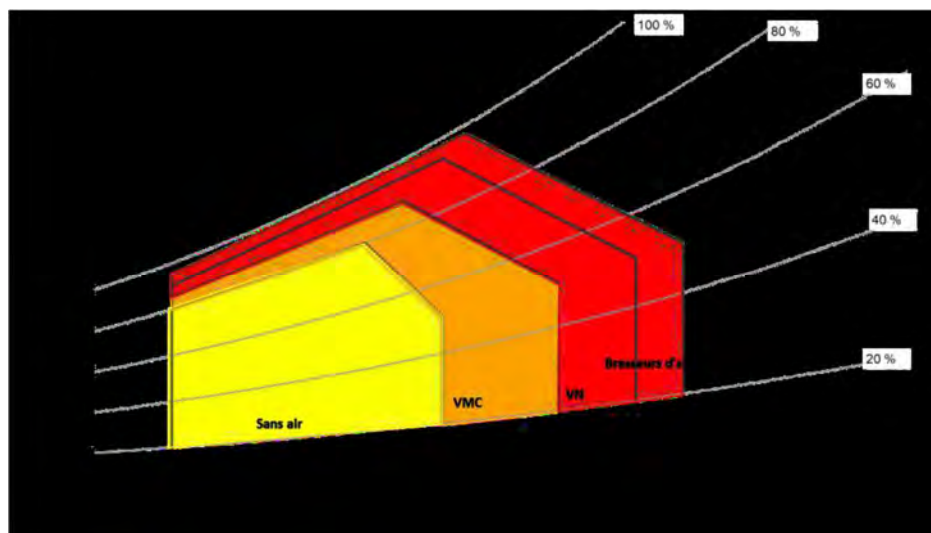


Pourcentage prévisible d'insatisfaits en fonction de l'indice PMV (Norme EN 7730)

Le sondage d'un nombre significatif d'occupants étant rarement possible, le modèle de Fanger permet d'évaluer l'indicateur PMV en fonction des paramètres d'ambiance cités plus haut (température d'air, températures de parois, humidité de l'air, vitesse de l'air fixée à 0,12m/s) et des paramètres de comportement (habillement, activité).

Confort thermique selon GIVONI

Pensant aux nombreux foyers dépourvus de systèmes de rafraîchissement actif, Givoni travaille dans les années 80 sur l'expression du confort pour des bâtiments naturellement ventilés. Son modèle prend en compte la température résultante (ou opérative), l'humidité, et la vitesse d'air (Givoni, 1992). Le diagramme de GIVONI définit sur le diagramme de l'air humide des zones de confort pour une activité sédentaire et avec un habillement adapté à l'été (0,5 clo).



Zone de confort selon GIVONI sur le diagramme psychrométrique des conditions ambiantes

Les zones sont définies pour des plages de vitesse d'air allant de 0 jusqu'à 1,5 m/s, vitesse au-delà de laquelle un risque de nuisance existe. La plage 0 m/s correspond aux modèles de confort classiques (valables jusqu'à 0,20 m/s). La plage 0,5 m/s peut être atteinte avec des dispositions de ventilation naturelle et l'ouverture des fenêtres, ou par sur-ventilation mécanique sur le réseau de renouvellement d'air hygiénique. Les vitesses supérieures ne peuvent être atteintes que grâce à des dispositifs mécaniques (brasseur d'air ou ventilateur de plafond). Comme pour l'indice PMV où les indicateurs de cumul d'heures de dépassement de seuils, le nombre d'heures d'inconfort estimé d'après GIVONI est exprimé en heures d'occupation, pour des conditions d'ambiance temporelles selon un modèle quasi-statique (considérant chaque instant comme indépendant du précédent). Or, la perception du confort est aussi fonction de ce qui s'est passé récemment et de comment notre corps a réagi pour mieux supporter le froid en hiver ou la chaleur en été.

Critères de confort adaptatif

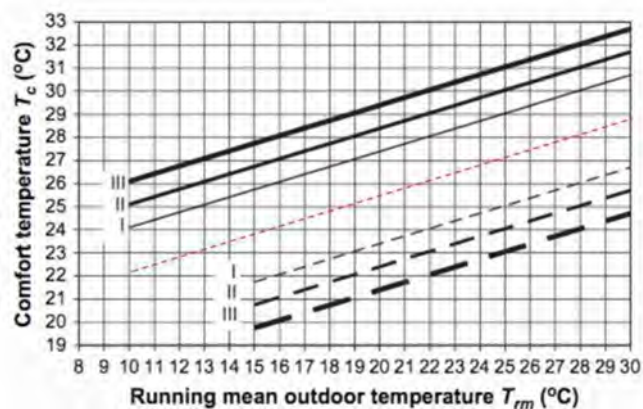
En 1998, Brager et De Dear (Brager et de Dear, 1998) ont questionné la notion de confort par rapport à l'historique vécu, soit les conditions climatiques passées, l'aspect culturel... Ainsi, un premier graphique présentant la température opérative intérieure souhaitable en fonction de la température moyenne mensuelle passée est tracé. Basée sur ce concept de confort adaptatif, la norme EN 15251 est instaurée en 2007. Elle préconise de tracer la température opérative T_{op} en fonction de la température moyenne glissante hebdomadaire extérieure $Text_{mg}$. Cette $Text_{mg}$ est une moyenne glissante sur les 7 derniers jours (T_{jm} : température journalière moyenne) avec un coefficient α qui attribue un poids plus important à la température extérieure de la veille, qu'à celle de l'avant-veille, et ainsi de suite. Elle se calcule de la manière suivante (avec $\alpha = 0.8$) :

$$Text_{mgi} = (1 - \alpha) * \{T_{jm\ i-1} + \alpha * T_{jm\ i-2} + \alpha^2 * T_{jm\ i-3} + \alpha^3 * T_{jm\ i-4} + \alpha^4 * T_{jm\ i-5} + \alpha^5 * T_{jm\ i-6} + \alpha^6 * T_{jm\ i-7}\} \quad (5)$$

$$Text_{mgi+1} = (1 - \alpha) * T_{jm\ i} + \alpha * Text_{mgi} \quad (6)$$

Ces données du projet sont comparées aux plages acceptables de température définies. On y distingue 3 catégories de confort définies pour une vitesse d'air de 0.12 m/s et une humidité relative à 50 % :

- Catégorie I : 90% de satisfaction, réservée aux publics vulnérables (EPHAD, crèches...)
- Catégorie II : 80% de satisfaction, doit être utilisée pour les bâtiments neufs ou rénovés
- Catégorie III : 65% de satisfaction, réservée aux bâtiments existants



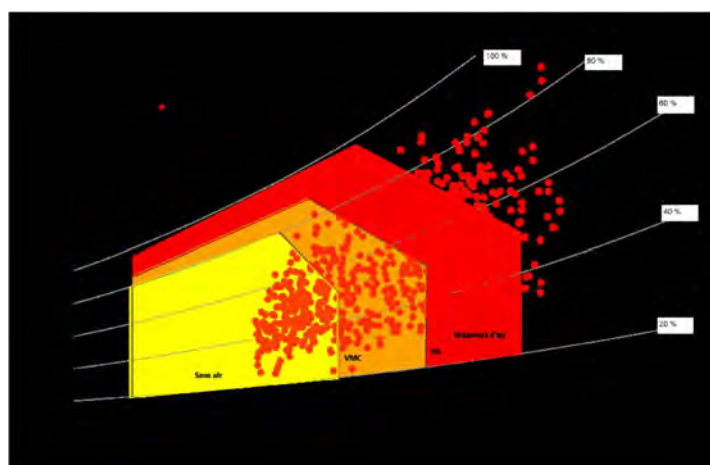
Catégories de confort acceptable de la norme européenne EN15251.

Cette norme s'applique essentiellement aux bâtiments non industriels pour lesquels les critères d'ambiance intérieure sont déterminés par l'occupation humaine et dont l'ambiance intérieure n'est pas notablement influencée par une production de chaleur ou par des procédés. La norme est ainsi applicable aux types de bâtiments suivants : maisons individuelles, immeubles d'habitation, bureaux, bâtiments d'enseignement, hôpitaux, hôtels et restaurants. Le critère de confort adaptatif EN 15251 étant basé sur la confrontation de la température intérieure, et de la température extérieure, il reprend également la notion de confort relatif, soit le delta de température entre l'extérieur et l'intérieur. L'intérêt de prendre en compte le caractère adaptatif du confort a été exposé dans le guide sur le confort d'été de l'ICEB. L'utilisation d'indicateurs de confort adaptatif (Givoni, EN 15251) devrait se généraliser dans les projets de bâtiment.

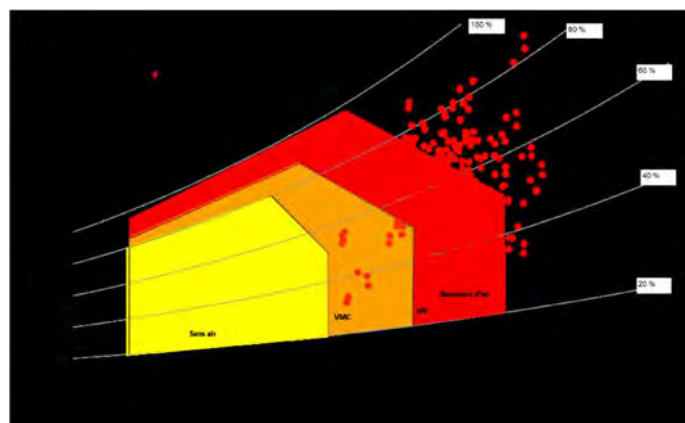
Proposition d'une approche mixte entre EN 15251 et GIVONI

La norme EN 15251 décrit le confort selon la relation température intérieure, température extérieure, pour une vitesse de déplacement d'air fixée à 0,12 m/s et une humidité relative à 50 %. Le diagramme de GIVONI exprime le confort suivant l'humidité, la température et la vitesse de déplacement de l'air intérieur, sans prendre en compte la notion d'adaptation qui est pourtant importante. Une idée d'utiliser les avantages de ces deux indicateurs est proposée dans la thèse de N. Lauzet de la manière suivante :

- 1- Évaluation des heures inconfortables selon la norme EN 15251 (celles pour lesquelles il est jugé que le corps n'a pas pu s'adapter),
- 2- Tracé de ces heures inconfortables uniquement sur le diagramme de GIVONI.



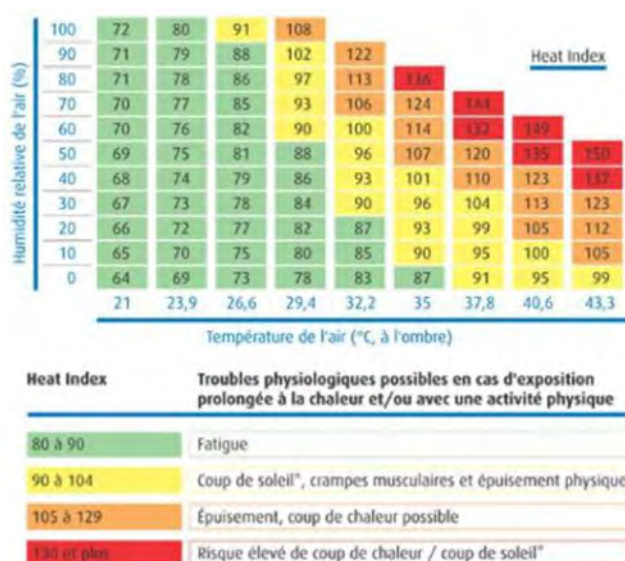
Tracé classique de GIVONI reprenant toutes les heures en occupation



Tracé de GIVONI avec prétraitement EN15251 qui supprime les heures confortables, où les personnes sont considérées comme adaptées

Quantification des risques liés à un fort inconfort chaud

La question des risques liés à un inconfort chaud important est peu traitée dans la littérature. En première approche, la notion de température opérative maximale Top_max qui donne le niveau de température maximum atteint en occupation dans une pièce donne une idée sur les conditions extrêmes potentielles. L'association anglaise Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) propose des tests pour évaluer les risques de surchauffe, notamment par son examen TM59 relatif aux projets de logements. Ce test demande que la température opérative des chambres ne dépasse pas 26 °C pendant plus de 1 % des heures d'occupation en configuration de ventilation naturelle, et 3 % des heures en ventilation mécanique. Des températures supérieures à 26°C peuvent empêcher les personnes de dormir et de récupérer de leur fatigue. Par ailleurs, des températures supérieures à 35 °C dans une pièce peuvent provoquer du stress, de l'anxiété, voire même la mort prématurée de personnes vulnérables comme les personnes âgées ou les nouveaux nés. Enfin l'Institut National de Recherche Sécurité (INRS) qui traite les questions de la santé et la sécurité au travail propose un Heat Index pour les risques de coup de chaleur en cas de travaux en extérieur ou d'activité physique importante. Cet indicateur s'exprime en fonction de l'humidité relative et de la température d'air mesurées à l'ombre. Pour les expositions en plein soleil, une addition de 15°C est à prendre en compte sur la température d'air. En revanche, la notion d'adaptation n'est pas prise en compte dans cet indicateur. Même s'il est défini pour des conditions extérieures, l'utilisation de cet indicateur en intérieur pourrait être pertinente pour anticiper les risques de coup de chaleur, notamment pour des périodes d'exposition longues et en particulier durant des épisodes caniculaires.



Heat Index pour l'évaluation des risques de coup de chaleur selon INRS

2.5.2. Performance environnementale

Pour ne pas trop compliquer la présentation des résultats mais éviter le déplacement d'impact (par exemple améliorer la résilience mais induire des impacts sur la santé ou la biodiversité), il est proposé de considérer l'ensemble suivant d'indicateurs d'ACV :

- Emissions de gaz à effet de serre en kg équivalent CO₂ (méthode de calcul selon IPCC, 2013),
- Consommation d'énergie primaire en kWh,
- Dommages sur la santé en DALY (année de vie en bonne santé perdues, calcul selon Bulle, 2019),
- Dommages à la biodiversité en PDF.m2.an (pourcentage d'espèces qui disparaissent sur un certain territoire et une certaine durée, calcul selon Bulle, 2019).

2.5.3. Performance économique

Le bâtiment est le premier secteur consommateur d'énergie en France, avec près de 45% de la consommation énergétique nationale. Il s'agit d'un gisement majeur de réduction des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre. La loi de transition énergétique pour la croissance verte définit une politique énergétique visant notamment à assurer notre sécurité d'approvisionnement, réduire notre dépendance aux importations, favoriser l'émergence d'une économie riche en emplois non délocalisables, atténuer le changement climatique et lutter contre la précarité énergétique. Dans cette perspective, la loi fixe l'objectif de rénover l'ensemble des logements, d'ici 2050, à un niveau Bâtiment Basse Consommation Rénovation (BBC-rénovation) ou équivalent.

D'autre part le raisonnement financier est une des composantes majeures de la décision d'un ménage ou d'un gestionnaire de bâtiment d'opérer des travaux de rénovation énergétique. La raison financière est souvent évoquée pour expliquer la difficulté à enclencher la décision de travaux de rénovation énergétique / thermique visant le niveau BBC-rénovation afin :

- ➔ **D'objectiver** en quoi l'analyse économique et financière des projets est aujourd'hui le plus souvent négligée :
 - o Calcul faussé car réalisé sur la totalité de l'investissement et non sur le surcoût lié à la rénovation énergétique,
 - o Durée de vie non ou mal prise en compte, indicateurs non pertinents pour des ménages,
 - o Présentation difficilement compréhensible et manque de pédagogie...
- ➔ **De mettre en évidence** que les lacunes des raisonnements économiques et financiers couramment rencontrés peuvent expliquer pourquoi les travaux réalisés sont insuffisamment ambitieux en termes de performance énergétique / thermique et d'adaptation au changement climatique
- ➔ **D'outiller les maîtres d'ouvrage sur des modèles technico-financier permettant de combiner audit énergétique / thermique et performance d'adaptation au changement climatique**
- ➔ **D'aider à dimensionner les équilibres entre modèle technico-financier, confort et usage liés aux travaux sur les systèmes et sur l'enveloppe.**

Quand on pense au rapport « cout » vs « rentabilité » pour une opération de rénovation énergétique et/ou thermique, on pense souvent « temps de retour sur investissement ». Pourtant, alors que la comparaison des rentabilités de différents scénarios de travaux est un facteur clé dans la prise de décision, le calcul du temps de retour sur investissement se montre souvent contre-productif.

Alors comment mesurer la rentabilité d'un investissement et permettre une comparaison juste entre plusieurs scénarios permettant de concilier performance énergétique/thermique des bâtiments et adaptation au changement climatique ?

Des méthodes permettent d'aider la prise de décision et de faire des choix judicieux d'un point de vue financier et environnemental, sans pour autant oublier la qualité du bâtiment et sa capacité d'adaptation au changement climatique.

Déjà, commençons par examiner ce qu'est le **temps de retour sur investissement**. Il est calculé en divisant l'investissement réalisé par les économies annuelles obtenues. Cet indicateur est donc supposé révéler au bout de combien d'années une opération devient rentable et efficace en termes de performance énergétique et/ou thermique. Son utilisation conduit généralement vers des travaux peu ambitieux car bénéficiant d'un temps de retour sur investissement plus court. Avec ce seul indicateur, les travaux d'envergure paraissent rarement intéressants.

Les travers du calcul du temps de retour sur investissement comme indicateur de rentabilité de l'opération :

- **Durées de vie des travaux non prises en compte.** Le calcul du temps de retour sur investissement ne prend pas en compte le fait que les différents travaux comparés ont des durées de vie différentes. Par exemple, le remplacement d'une chaudière sera certes plus « rentable » au moment de l'investissement, mais cette dernière devra être remplacée de nouveau au bout de 15 ans, ce qui entraînera un investissement supplémentaire. Au contraire, l'isolation des murs demande un effort financier plus important à l'origine, mais la durée de vie bien plus importante de l'opération (environ 40 ans) peut la rendre plus avantageuse sur le long terme.
- **Absence de comparaison avec les coûts d'entretien courant du bâtiment.** Pour calculer le temps de retour sur investissement, il est souvent considéré comme coût d'investissement la somme des dépenses pour les travaux engagés. Cette méthode ne prend pas en compte les dépenses qui auraient de toute façon dû être réalisées pour l'entretien courant du bâtiment (fin de vie des équipements, ravalement de façade...). Le surcoût réel de la rénovation est donc surestimé et la rentabilité réelle sous-estimée.
- **Un indicateur peu incitatif.** Le calcul du temps de retour sur investissement masque les économies réellement réalisées suite aux travaux de rénovation. En effet, il est possible qu'une opération peu coûteuse de changement des luminaires affiche le même temps de retour sur investissement que des travaux ambitieux comme l'isolation du bâtiment. Or, la seconde opération va en réalité entraîner des économies plus importantes malgré un investissement plus lourd. De plus, les chiffres obtenus avec ce calcul sont souvent effrayants pour la maîtrise d'ouvrage. « Votre opération commence à devenir rentable seulement au bout de 30 ans ». De quoi décourager !

Mais alors, quelle solution pour mesurer la rentabilité d'une opération et orienter la prise de décision en termes d'efficacité énergétique et/ou thermique en contexte d'adaptation au changement climatique ?

Plusieurs indicateurs existent dans le milieu économique de la construction pour mieux évaluer la rentabilité d'une opération de rénovation énergétique et/ thermique. de l'indicateur économique utilisé que des différences de travaux entre les scénarios. Le choix d'un bon indicateur économique de comparaison est donc primordial.

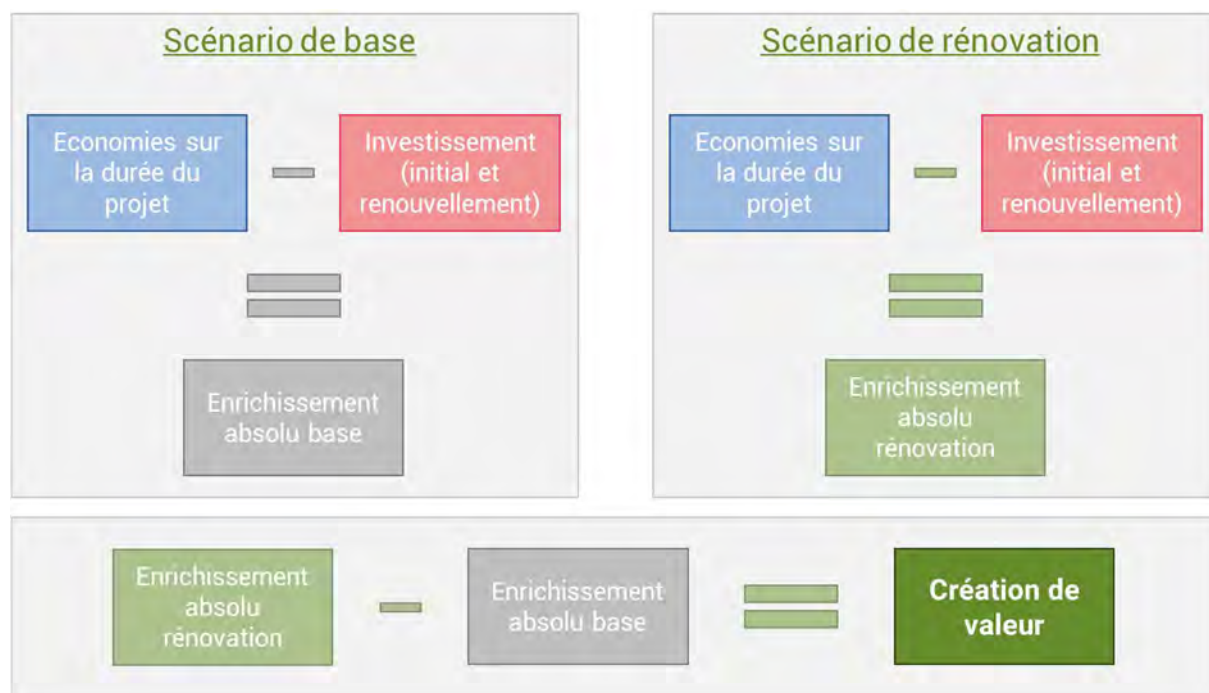
Pour être pertinent, le raisonnement économique que nous proposons dans le cadre du projet articulera :

- Le **surcoût par rapport aux coûts d'entretien courant** du bâtiment. Chaque scénario doit être comparé à un scénario de base de la vie du bâti.
- Sur une **période d'analyse adaptée** pour prendre en compte la durée de vie des travaux.
- En **coût global** afin d'intégrer les coûts de renouvellement des travaux dont la durée de vie est plus faible que la période d'analyse. D'ailleurs, on vous a parlé de coût global
- En **intégrant les conditions de financement** (emprunts, aides à l'investissement), ce qui permet de prendre en compte les effets de levier de l'emprunt (investissement facilité car amorti sur plusieurs années) et des aides.

Nous proposons ainsi un indicateur composite pertinent pour comparer des scénarios de travaux de rénovation énergétique / thermique dédiés à l'adaptation au changement climatique tout en intégrant l'ensemble des facteurs ci-dessus.

Pour ce faire notre méthode consistera à sommer les flux monétaires sur la durée du projet / cycle de vie du projet / cycle de vie du bâtiment. Elle s'apparente au calcul de la **valeur actuelle nette (VAN)**. Cependant, le calcul sera simplifié en ne sommant sur la durée du projet que les gains sur les factures, le confort et en « soustrayant » les investissements (initial et renouvellement). La différence de cet indicateur « composite » par rapport à celui d'un scénario de base (vie courante du bâtiment) permettra d'estimer la « création de valeur et de performance résilience » par rapport à ce scénario. Le scénario de base peut déjà être source d'économies, par exemple du fait du renouvellement d'équipements anciens ciblant à la fois la performance énergétique / thermique et l'adaptation au changement climatique.

La comparaison de la donnée « création de valeur » pour différents scénarios permet d'accompagner le choix des travaux de rénovation à réaliser.



Pour remédier à ce constat, l'équipe RESALLIENCE appliquera un raisonnement économique lié à la rénovation énergétique / thermique des bâtiments en contexte d'adaptation au changement climatique. Notre approche n'entend évidemment pas rediscuter la dimension macro-économique (externalités positives en termes d'emploi, d'indépendance énergétique, d'atténuation du changement climatique...) de l'analyse à l'échelle nationale ayant conduit à la définition des objectifs de transition énergétique inscrits dans loi. Il s'agit au contraire de mieux faire converger l'approche micro-économique des maîtres d'ouvrages, guidant leurs arbitrages financiers et budgétaires à l'échelle d'un projet, au niveau d'ambition défini par la loi, à savoir la rénovation ambitieuse au niveau BBCrénovation des bâtiments adaptés aux scénarii RCP 4.5 RCP 8.5 à horizon 2050. Cette démarche présente un double objectif :

- Construire une méthode robuste d'analyse économique et de rentabilité des travaux de rénovation énergétique/thermique adapté au changement climatique (RCP 4.5 et RCP 8.5), qui incite à plus d'ambition, et reste accessible et facilement utilisable par des non-spécialistes ;
- Mobiliser les acteurs pour co-construire la méthode et faciliter sa diffusion et son utilisation.

3. Evaluation des indicateurs sur cas réels

3.1. Cas d'étude

Les cas étudiés sont déterminés par le climat, la période estivale et les bâtiments habités pour lesquels nous souhaitons évaluer l'inconfort chaud.

Le projet RESILIANCE s'intéresse au confort d'été et plus précisément à la résilience des bâtiments occupés, conformes aux dernières normes en terme de réglementation thermique, sous les scénarii de vagues de chaleur élaborés par les experts de Météo-France et du CNRM à l'horizon 2050 ou 2100.

Nous nous sommes donc orientés vers les étés 2018, 2019 et 2020 au cours desquels les pics de chaleur en France étaient relativement élevés. Les bâtiments à la fois occupés ou habités et instrumentés qui alimentent la base de données du CEA sont essentiellement les maisons du projet COMEPOS (24 unités différentes réparties en France métropolitaine construites entre 2013 et 2017) et le bâtiment HELIOS qui est occupé par nos équipes depuis 2014.

Le projet s'adresse autant aux bâtiments résidentiels qu'aux bâtiments à usage tertiaire.

En terme de climat, le projet s'est focalisé principalement sur deux sites : le premier exposé à un climat chaud, et donc le plus proche possible de la zone géographique H3 entre Toulouse et Montpellier et le second site concerné par la problématique des îlots de chaleur urbain et de la densité urbaine, plutôt situé dans l'agglomération parisienne.

Il nous a fallu explorer nos fichiers de données mesurées afin de sélectionner parmi les sites instrumentés disponibles (maisons COMEPOS et bâtiment HELIOS), ceux dont la ressource en informations est la plus intéressante, ou du moins ceux pour lesquels les trous de données semblent les moins nombreux.

La représentativité des différentes architectures constructives, des ratios de surface vitrée sur surface habitable ou encore des systèmes de rafraîchissement actifs ou passifs installés est plutôt une conséquence du choix des maisons et bâtiment répondant aux critères cités précédemment.

Une sélection itérative nous a conduit à nous intéresser aux bâtiments suivants :

- Bâtiment HELIOS (tertiaire), région Auvergne-Rhône-Alpes
- Maison Hanau1, région Grand-Est
- Maison IGC2 (climatisé), région Occitanie
- Maison MAS_PROVENCE (Posa), région Provence-Alpes-Côte-d'Azur
- Maison Pierre1, région Île-de-France
- Maison Pierre2 (tertiaire), région Île-de-France
- Maison Pierre5, région Île-de-France
- Maison Tradimaisons1, région Auvergne-Rhône-Alpes
- Maison Trecobat2 (climatisé), région Occitanie

Les différentes caractéristiques constructives et les équipements de ventilation et/ou de rafraîchissement sont décrits en annexes (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et §**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Fonctionnement saisonnier des équipements de chauffage et de refroidissement :

Concernant les équipements, selon leur fonction (chauffage, refroidissement), ils sont soumis à des autorisations de fonctionnement (dites respectivement saison de chauffage et saison de refroidissement pour indiquer respectivement l'autorisation de chauffer ou de refroidir les locaux). Les dates de début et de fin de ces saisons sont déterminées au travers de tests logiques menés à chaque début de jour de simulation :

- L'initiation d'une saison repose sur la comparaison du total cumulé des degrés-heures d'inconfort thermique froid (respectivement chaud) à un seuil de 40 °C.h.
- L'achèvement d'une saison est quant à lui associé à une comparaison de la moyenne glissante des besoins en chaud (respectivement en froid) sur une période de 4 semaines glissantes à une valeur limite de 2 Wh/m².

Par défaut, les 8 premières semaines de l'année sont considérées comme étant de saison de chauffage. De même, par défaut, 10 semaines durant l'été sont considérées comme n'étant pas de la saison de chauffage. En mode Th-D, la saison de confort adaptatif est supposée sans chauffage.

Figure 62 : Extrait de l'arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine – § 1.4.1 – Définition de la période de confort adaptatif

3.2.Descriptif des bâtiments étudiés

Les logements étudiés sont pour la plupart, des maisons individuelles : Hanau1, IGC2, MAS_PROVENCE, Pierre1, Pierre5, Tradimaçons1 et TRECOBAT2.

Deux bâtiments sont occupés pour un usage tertiaire : différents bureaux du bâtiment HELIOS et la maison Pierre2.

Le bâtiment HELIOS offre environ 6000 m² de bureaux et laboratoires hébergeant des chercheurs au sein de différents organismes de recherche œuvrant dans le domaine de l'énergétique du bâtiment et de l'intégration des énergies renouvelables aux bâtiments et aux réseaux.

La maison Pierre2 située en région parisienne est utilisée comme maison d'exposition par le fabricant « Maison Pierre ». Elle est donc occupée en journée comme un bureau.

Chamois4	511 chemin du Cerf	38330 ST-NAZAIRE-LES-EYMES	340
Hanau1	rue du Maréchal Foch	67540 OSTWALD	141
IGC2	Lieu-dit "chemin Laurent" impasse Paul Langevin	31140 AUCAMVILLE	129
Pierre1	17 rue Albert Lepetit	77330 OZOIR-LA-FERRIERE	108
Pierre2	36Bis, rue de Dijon	93600 AULNAY-SOUS-BOIS	50
Pierre5	Rue du bois d'Auteuil	94440 VILLECRESNES	83
Tradimaçons1	Lotissement "Le Grand Mail 3" Lot 16b-3	63800 COURNON D'AUVERGNE	363
TRECOBAT2	11 avenue Henri Jambon	31770 COLOMBIERS	176
HELIOS / Bur. B3033, B3071, B3072, B3105	60, avenue du lac Léman	73370 LE BOURGET-DU-LAC	235
MAS PROVENCE	845 Bd Joliot Curie	13160 CHÂTEAURENARD	59

Tableau 3 : Liste des maisons COMEPOS et bâtiment étudiés dans le cadre du projet RESILIANCE

Les maisons suivantes sont climatisées : IGC2, Chamois4. L'application des scripts Python à ces maisons présente l'intérêt de comparer les résultats obtenus avec ceux des maisons non climatisées et d'en estimer le bénéfice.

Au moment où nous rédigeons ce livrable, la maison Chamois4 n'a pas fait l'objet de la mise en forme des données d'entrée et des calculs d'indicateurs d'inconfort à partir des deniers scripts Python.

3.3.Préparation des données

3.3.1. Période d'analyse et période de confort adaptatif

Les indicateurs de confort d'été réglementaires sont calculés pour une année, non bissextile. Leur calcul dépend notamment de la période de confort adaptatif définie (cf. Figure 62) et de l'occupation (cf. §3.5.1). Le CEA a extrait des fichiers de données COMEPOS et HELIOS, les mesures de température, humidité et de CO₂, pour les années 2018, 2019, 2020, depuis le 1^{er} avril jusqu'au 31 octobre, en considérant que les risques d'inconfort chaud au-delà de cette plage étaient inexistantes.

La maison MAS_PROVENCE a nécessité d'étendre l'étude jusqu'au 30 novembre de chaque année afin de ne pas tronquer la période de confort adaptatif, suivant la mesure de température extérieure exploitée.

3.3.2. Lissage – pas de temps

La première étape consiste à construire un fichier de données au pas de temps horaire. Les mesures des maisons COMEPOS et du bâtiment HELIOS sont enregistrées sur un pas de temps plus court, respectivement de 1 minute et de 10 minutes.

1.4 SEGMENTATION TEMPORELLE DES CALCULS

1.4.1 CAS DU CALCUL ENERGETIQUE

La méthode de calcul énergétique est une méthode au pas de temps horaire. Les calculs sont menés pour une année civile non bissextile, allant du lundi 1^{er} Janvier au 31 décembre.

Figure 63 : Extrait de l'arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine – ANNEXE II § 1.4.1

```
# Fonction moyenne de l'échantillonnage #
def moyenne(df, tps):
    df=df.resample(tps).mean()
    return df
```

```
# jour='D' ou Heure='H' ou Tri-horaire='180T'
resampling = 'H' # TODO: choix du pas de lissage des données
```

```
fulldf = moyenne(fulldf, resampling)
```

Les mesures sont moyennées sur un pas horaire. La fonction `df.resample(tps).mean()` permet de s'affranchir d'une partie des trous de données inférieurs au pas de temps horaire. Cette opération est exécutée sur l'ensemble des capteurs de mesure : Température / Humidité Relative / CO₂. Il faut noter que cette étape contribue à lisser légèrement le profil des températures mesurées et efface donc une partie des informations sur un pas de temps inférieur à l'heure. Compte tenu de l'usage et de l'inertie des bâtiments étudiés dans lesquels les conditions ambiantes sont d'amplitude peu variable, il est considéré que cette approche reste correcte.

Même avec ce premier remodelage des mesures, il existe toujours des trous de données quels que soient les maisons ou les bâtiments étudiés.

3.3.3. Nettoyage des données erronées

La présence d'informations à chaque pas de temps horaire ne garantit pas la justesse des mesures. Les capteurs peuvent transmettre des données erronées. Le CEA a filtré les valeurs enregistrées pour en supprimer les bornes hautes et basses des différents capteurs ou encore les informations répétitives sur deux ou plusieurs pas de temps consécutifs.

```

# Fonction filtrage des concentrations CO2 abberantes (valeurs trop basses ou trop hautes)
def filtre_CO2(df, bas, haut):

    df_ = pd.DataFrame()

    for col in df.columns:
        if 'CO2' in col:
            df_[col] = df[col].where(((bas<df[col]) & (df[col]<haut)), np.nan)

    return df_

# Fonction filtrage des températures aberrantes (valeurs trop basses ou trop hautes)
# Modified by EFR: add or 'SPDEG' in the if test in col
def filtre_TEM(df, bas, haut):

    df_ = pd.DataFrame()

    for col in df.columns:
        if 'TEM' in col or '-T' in col or 'METEO-T' in col or 'SPDEG' in col:
            df_[col] = df[col].where(((bas<df[col]) & (df[col]<haut)), np.nan)
#         elif '-T' in col:
#             df_[col] = df[col].where(((bas<df[col]) & (df[col]<haut)), np.nan)

    return df_

# Fonction suppression des valeurs consécutives identiques (1440 valeurs consécutives)
def drop_consecutive_N_value (df, N):

    df_final = pd.DataFrame()

    for col in df.columns:
        df_ = pd.DataFrame()
        df_['value'] = df[col]
        # df_['diff'] = (df[col].diff()==0).astype(int)
        df_['diff'] = (abs(df_['value'].diff())<1e-6).astype(int)
        df_['count'] = df_["diff"].groupby((df_["diff"]==0).cumsum()).cumcount()
        df_['final'] = df_['value'].where(df_['count']<N, np.nan)
        df_final[col] = df_['final']

    return df_final

#####
##-----FILTRAGE DES DONNEES MESUREES-----##
#####
# TODO: choose the boundaries you want to limit the data TEM, HUM and CO2
df_y_1H = pd.concat([filtre_TEM(df_y_1H, 0, 50), filtre_HUM(df_y_1H, 0, 100),\
                    filtre_CO2(df_y_1H, 390, 3500)], axis=1)

df_y_1H = drop_consecutive_N_value(df_y_1H, 1) #12) #1440)

```

Les limites hautes et basses choisies dans les appels des fonctions « filtre » pour chacun des différents capteurs sont fixées par les échelles de mesures des capteurs eux-mêmes.

Ces traitements d'informations génèrent de nouveaux trous de données mais fournissent un jeu de données plus robustes.

3.3.4. Reconstruction des trous de données

A partir des données lissées et filtrées, le CEA a reconstruit les données manquantes par interpolations linéaires sur des pas de temps courts. Cette reconstruction est limitée aux températures et aux mesures de CO₂ pour les calculs des indicateurs d'inconfort d'été. Les données d'hygrométrie n'ont pas été utilisées dans cette étude.

Afin de ne pas tracer des droites entre deux points de mesure trop éloignés, ce qui n'aurait pas été représentatif de l'évolution réelle des températures ou des concentrations en CO₂, nous avons fixé la limite du nombre de données manquantes à reconstruire par interpolation linéaire à 4 heures.

```
#Reconstruction des data manquantes par interpolation sur une période de temps limitée à qq heures
def interpodata(df, dfData, NlimH, yes):

    if yes=='y':
        dfDataintp = df.copy()

        for capt in dfData.columns:

            dfDataintp[capt] = dfDataintp[capt].interpolate(limit=NlimH)

    elif yes=='n':
        dfDataintp = dfData.copy()

        for capt in dfData.columns:

            dfDataintp[capt] = dfDataintp[capt].interpolate(limit=NlimH)

        dfDataintp.columns = dfDataintp.columns+'_full'

        df = pd.concat([df, dfDataintp], axis=1)

    else:
        sys.exit('only 'y' or n' in function interpodata')

    return dfDataintp, df

#####
##-----REPARATION DES TROUS DE DONNEES MESUREES-----##
#####
# TODO: choose the maximum nb of consecutive nan inplace of CO2 values to be filled in by linear interpo
NlimH = 4
# TODO: choose if the interpolated data should replace the former ones ('y'/'n')
df_colTfull, df_y_1H = interpodata(df_y_1H, df_y_1H[df_y_1H.columns\
                                     [df_y_1H.columns.str.contains('TEM_')]], NlimH, 'y')
df_CO2full, df_y_1H = interpodata(df_y_1H, df_y_1H[df_y_1H.columns\
                                     [df_y_1H.columns.str.contains('CO2_')]], NlimH, 'n')
```

Après ce traitement, il reste encore des trous de données. Mais il n'est pas possible de reconstruire ces mesures manquantes de façon fiable.

On peut d'ores et déjà souligner que les calculs des indicateurs d'inconfort d'été sont dépendants de la ressource en informations mesurées car ces indices sont cumulés sur chaque pas de temps. Plus la donnée est manquante, plus les indicateurs risquent d'être sous-estimés. Pour notre étude et le calcul des indicateurs réglementaires, il apparaît donc nécessaire de disposer d'une quantité suffisante de mesures sur la période de confort adaptatif.

C'est cette dernière considération qui a finalement guidé le choix des maisons ou des bâtiments instrumentés à étudier sur les périodes d'enregistrement visées.

3.3.5. Mesures de la température extérieure

Même si nous disposons sur la plupart des sites, de deux mesures différentes : capteur installé sur façade Nord « TEM_FAC_NOR_I_001 » et station météorologique locale THIES réf. WSC11 « TEM_AIR_EXT_ », les données de température extérieure n'échappent pas, ni aux défauts de mesure ni aux problèmes d'enregistrement.

Nous avons évalué le taux de disponibilité de l'information de température extérieure heure par heure pour les différentes maisons et bâtiments étudiés. Nos résultats ont montré que les températures extérieures ne sont pas suffisamment renseignées. Pourtant, cette information est indispensable au calcul des indicateurs d'inconfort d'été (cf. §3.4).

Comme exemple, la maison MAS_PROVENCE suivie dans le cadre du projet COMEPOS, présente de nombreuses mesures de température, hygrométrie ou CO₂ mais la température extérieure enregistrée est très peu fiable ou disponible (< 20 %) sur les périodes considérées. Il est donc nécessaire de reconstruire les températures extérieures à partir d'autres mesures/informations (cf. Figure 64).

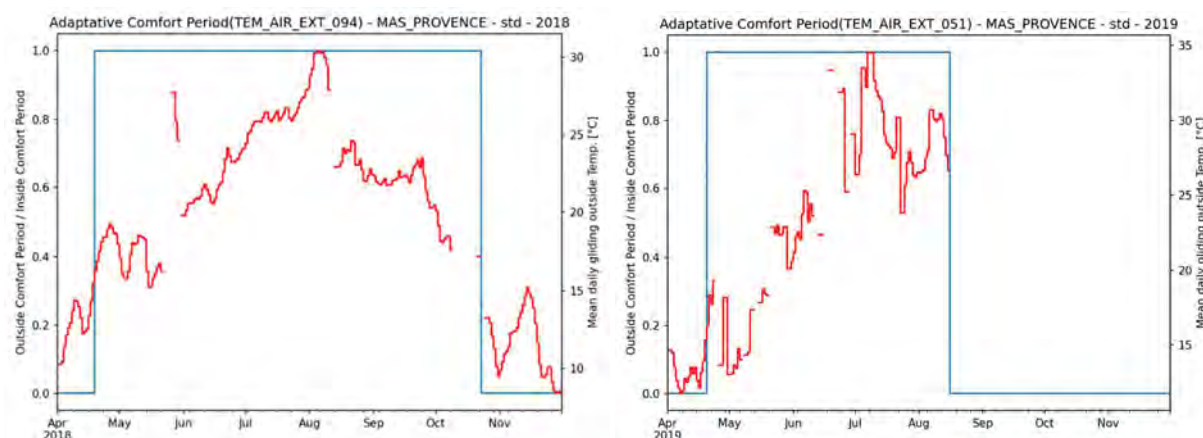


Figure 64 : Températures extérieures mesurées /station météo THIES réf. WSC11 – MAS PROVENCE – 2018 (à g.) et 2019 (à dr.)

3.3.5.1.Reconstruction de la température extérieure

Ainsi, le manque de données enregistrées sur plusieurs cas réels étudiés, des mesures de températures en façade Nord pas toujours fiables ou réalistes, l'absence de capteur de température extérieure sur certains sites, sont autant de raisons qui nous ont contraints à reconstruire heure par heure les données manquantes ou erronées. Les températures extérieures ont été reconstruites à partir des valeurs téléchargées depuis le site www.soda-pro.com et du serveur MERRA.

La Figure 65 présente la structure de fichier de données météorologiques issues du serveur MERRA (www.soda-pro.com) pour la maison Hanau1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	# Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA), version 2											
2	# Provider National Aeronautics and Space Administration (NASA) / Goddard Space Flight Center											
3	# More info: http://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2											
4	# Site latitude: 48.542											
5	# Site longitude: 7.711											
6	# Site altitude: 268											
7	# Date begin: 01/04/2018											
8	# Date end: 31/10/2018											
9	# Time reference: UT											
10	# Summarization: Hour (h)											
11	# Date - Instant: The date or instant given for each value corresponds to the end of the summarization											
12												
13	# Columns:											
14	# Temperature: Temperature at 2 m above ground											
15	# Relative humidity: Relative humidity at 2 m above ground											
16	# Pressure (hPa): Pressure at ground level											
17	# Wind speed: Wind speed at 10 m above ground											
18	# Wind direction: Wind direction at 10 m above ground (0 means from North, 90 from East...)											
19	# Rainfall (kg): Rainfall (= rain depth in mm)											
20	# Snowfall (kg): Snowfall											
21	# Snow depth: Snow depth											
22	# Short-wave: Surface incoming shortwave irradiation (broadband)											
23												
24	# MERRA-2 meteorological data											
25	# Date	UT time	Temperature	Relative Hum	Pressure	Wind speed	Wind direction	Rainfall	Snowfall	Snow depth	Short-wave irradiation	
26	01/04/2018	01:00	276.16	97.84	966.83	2.98	257.76	0.050075	0.000000	0.000000	0.0000	
27	01/04/2018	02:00	276.03	98.47	967.22	3.17	250.80	0.074366	0.000000	0.000000	0.0000	
28	01/04/2018	03:00	275.59	99.51	967.62	3.32	244.67	0.058961	0.000000	0.000000	0.0000	
29	01/04/2018	04:00	275.26	99.76	968.23	3.66	241.91	0.054778	0.000000	0.000000	0.0000	
30	01/04/2018	05:00	275.29	98.86	968.79	3.88	241.63	0.077123	0.000000	0.000000	0.0000	
31	01/04/2018	06:00	275.83	96.62	969.48	4.01	239.47	0.106586	0.000000	0.000000	15.5564	
32	01/04/2018	07:00	277.18	92.30	970.20	5.05	240.32	0.105707	0.000000	0.000000	80.0052	
33	01/04/2018	08:00	278.19	87.44	970.93	6.41	249.52	0.124739	0.000000	0.000000	213.3530	
34	01/04/2018	09:00	279.26	80.42	971.70	7.40	258.01	0.228279	0.000000	0.000000	358.0486	
35	01/04/2018	10:00	280.21	73.91	972.17	7.95	263.57	0.308860	0.000000	0.000000	471.2407	
36	01/04/2018	11:00	281.15	66.76	972.46	8.53	267.35	0.308051	0.000000	0.000000	585.8381	
37	01/04/2018	12:00	281.66	62.57	972.72	8.72	269.03	0.249877	0.000000	0.000000	579.0458	
38	01/04/2018	13:00	281.70	62.24	973.07	8.48	270.24	0.189607	0.000000	0.000000	499.5804	
39	01/04/2018	14:00	281.71	63.02	973.44	8.22	272.39	0.186827	0.000000	0.000000	462.0096	
40	01/04/2018	15:00	281.67	64.50	973.89	7.76	274.08	0.157041	0.000000	0.000000	380.6454	

Figure 65 : Données météorologiques fournies par MERRA (www.soda-pro.com) concernant la maison Hanau1

Ce fichier MERRA fournit, entre autres, la température extérieure à deux mètres au-dessus du sol pour le site étudié et la période considérée ainsi qu'une altitude théorique « représentative » du site correspondant à une résolution d'environ 50 km. Cette résolution peut paraître extrêmement élevée mais nous montrons plus loin qu'elle reste suffisante pour les bâtiments auxquels nous nous sommes intéressés. A contrario, le choix de bâtiments situés dans des zones montagneuses aurait entraîné des écarts de température beaucoup plus importants du fait des expositions différentes d'une vallée à l'autre ou en fonction du versant sur lequel se situent les constructions.

L'altitude alt_{MERRA} est l'altitude « représentative », c'est-à-dire au niveau au-dessus de la mer, calculée et fournie par MERRA correspondant à l'information de température fournie. Elle est lue directement sur le fichier de la Figure 65.

Connaissant l'altitude exacte des bâtiments étudiés alt_{bat} exprimée en mètres (cf. Tableau 3), il est alors possible de calculer la température correspondante à partir de la formule suivante :

$$T_{ext} = (T_{MERRA} - 273,15) + (alt_{MERRA} - alt_{bat}) \times \frac{6,75}{1000}$$

Cette température extérieure reconstruite présente l'avantage de fournir une série temporelle consolidée, au pas de temps horaire, sans trous de données pour l'ensemble des bâtiments. Cette donnée permet de réduire les incertitudes de calcul des indicateurs dues à la température extérieure.

Une fois reconstruite, la température extérieure est complète (cf. Figure 66).

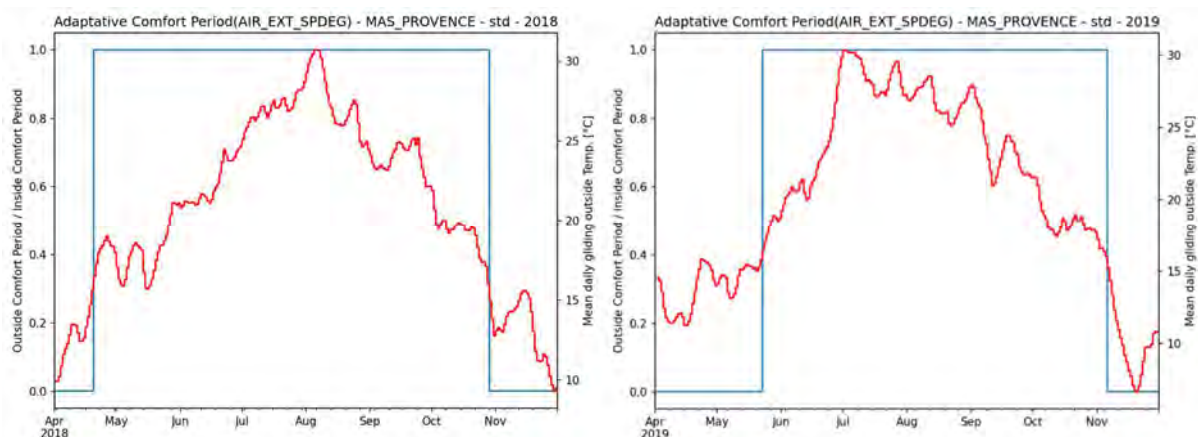


Figure 66 : Text reconstruite à partir du serveur MERRA (www.soda-pro.com) – MAS PROVENCE – 2018 (à g.) et 2019 (à dr.)

La reconstruction de la température extérieure pour les sites disposant d'une quantité suffisante de données questionne sur l'impact de la température extérieure utilisée pour le calcul des indicateurs d'inconfort chaud.

3.3.5.2. Choix de la température extérieure

Nous disposons donc de trois températures extérieures différentes : deux températures mesurées par un capteur posé en façade Nord ou par la station météorologique THIES réf. WSC11 et une température reconstruite à partir du serveur MERRA, site www.soda-pro.com (cf. §3.3.5.1).

Lorsque les données manquantes du capteur TEM_AIR_EXT_I_001 ne permettent pas de déterminer correctement la période de confort adaptatif, il apparaît évident de travailler à partir des données reconstruites. C'est le cas pour la maison MAS_PROVENCE où les enregistrements de température extérieure ont été peu efficaces en 2018 et 2019 (cf. Figure 64).

Mais pour des cas réels et des périodes où les données mesurées semblent plus satisfaisantes, faut-il privilégier les températures mesurées sur site ou peut-on continuer à utiliser la température extérieure reconstruite (cf. Figure 67) ?

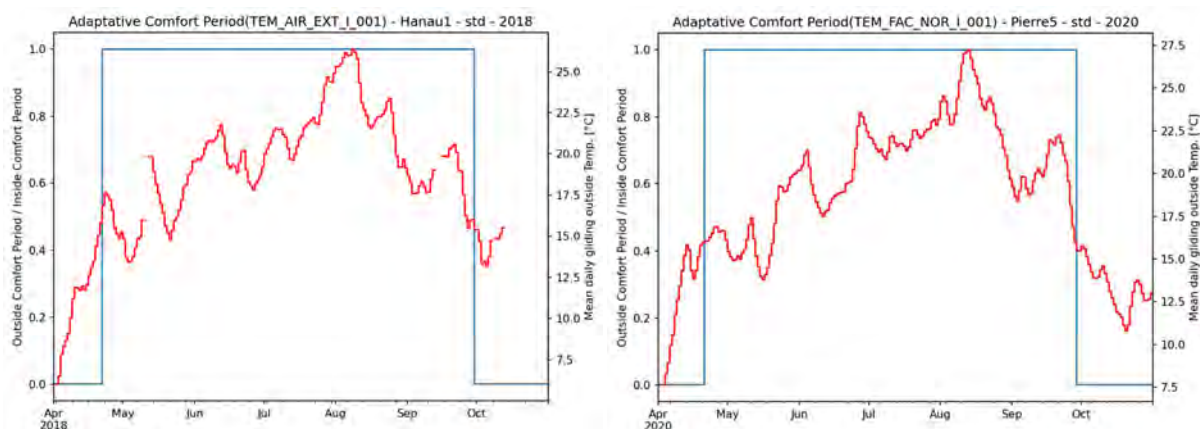


Figure 67 : Période confort adaptatif / t°C moy jour glissante et Text mesurées – Hanau1 / 2018 (à g.) – Pierre5 / 2020 (à dr.)

Pour la maison Hanau1 sur la période 2018, la mesure de température extérieure comprend quelques trous de données et des valeurs fixes à 0°C / 13°C / 15°C / 24°C. Lorsque toutes les valeurs erronées ou manquantes sont écartées, la disponibilité de l'information de température mesurée autour de la maison Hanau1 est de 83 % sur la période considérée (cf. Figure 67). Sur la même figure, pour la maison Pierre5 et en 2020, la mesure de température extérieure en façade Nord (pas de station météorologique), est quasi-complète.

La Figure 68 vise à comparer la température extérieure mesurée par la station météorologique reconstruite d'une part, avec la température extérieure reconstruite et d'autre part, avec la température mesurée en façade Nord, sur la maison Hanau1 sur la période 2018.

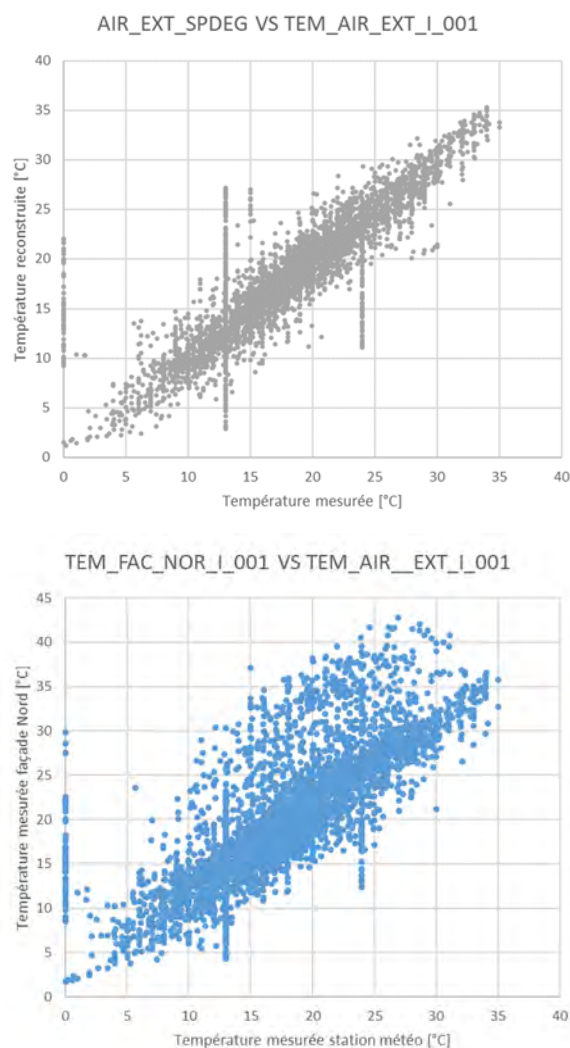


Figure 68 : Text reconstruite (à g.) et mesurée au Nord (à dr.) fonction de la température mesurée /station météo – Hanau1 – 2018

Sur la Figure 68, on observe que la corrélation entre la température extérieure reconstruite et la température mesurée sur site (à g.) est meilleure qu'entre les températures mesurées en façade Nord ou sur la station météorologique (à dr.). L'écart quadratique moyen entre la température reconstruite à partir du serveur MERRA et celle mesurée par la station météo est de 1,6°C alors que le même écart entre la température mesurée sur la façade et la mesure avec la station météorologique est de 4,3°C.

Les Figure 69 et Figure 72 montrent pour le cas de la maison Hanau1 sur la période 2018, le bénéfice de la reconstruction de la température extérieure.

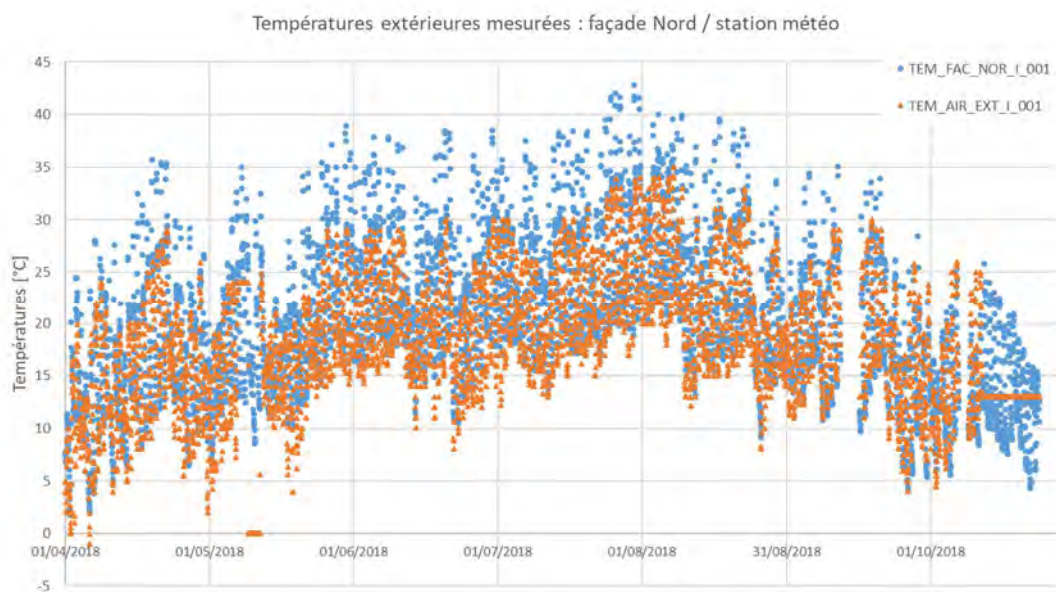


Figure 69 : Températures mesurées sur la façade Nord et sur une station météo – maison Hanau1 – 2018

Sur la Figure 69, on vérifie que les températures mesurées sur la façade Nord et à partir d'une station météo ne sont pas identiques. Les capteurs ne sont pas placés dans les mêmes conditions. Ils ne mesurent donc pas exactement la même température. L'erreur médiane entre les deux mesures sur la période d'avril à octobre 2018 est de 1,5°C et l'erreur moyenne de 2,58°C.

Les principaux écarts entre les températures extérieures mesurées sur la façade Nord et à partir de la station météorologique de la maison Hanau1 sont dus au rayonnement solaire direct reçu par le capteur installé sur la façade, aux premières heures du jour (cf. Figure 70 et Figure 71). C'est ce phénomène qui explique les écarts jusqu'à 18°C entre la température mesurée sur la façade Nord et la température mesurée par la station météorologique.

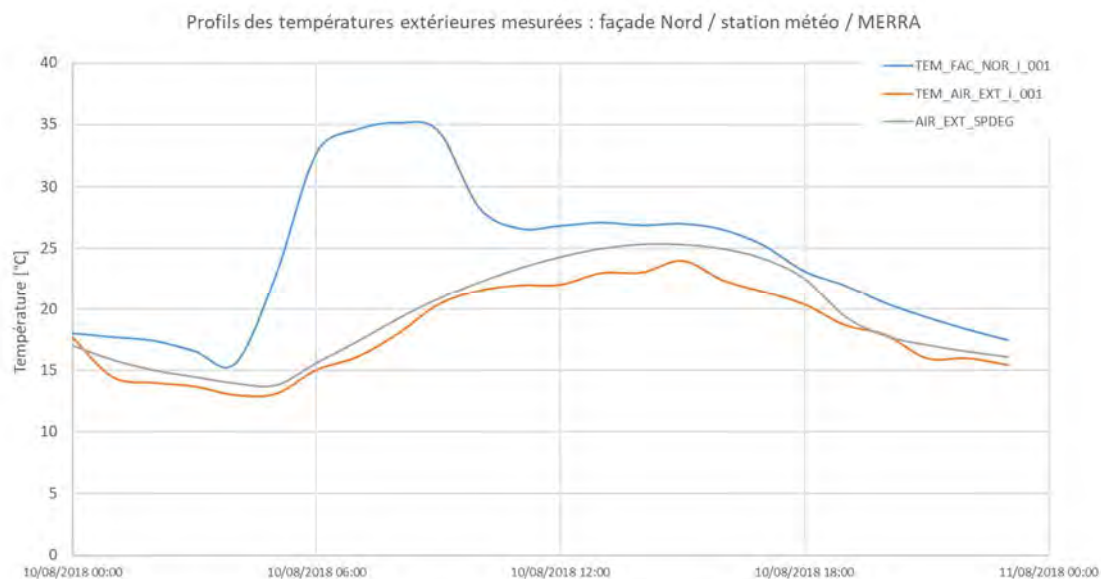


Figure 70 : Températures mesurées et issue du serveur MERRA – maison Hanau1 – 10/08/2018

Sur la Figure 70, on observe une augmentation de l'écart sur la mesure de température entre les deux capteurs, car le premier, bien qu'orienté au Nord, est exposé au soleil sur les premières heures d'une journée ensoleillée. La température mesurée par le capteur situé sur la façade Nord du bâtiment n'est donc pas forcément pertinente pour calculer les indicateurs de confort d'été. La température mesurée par la station météorologique et celle déduite du serveur MERRA présentent une allure similaire.

L'évolution de la première au cours de la journée du 10/08/2018 est d'aspect plus lissée. Cette mesure de température est probablement influencée par le rayonnement thermique des surfaces alentours.

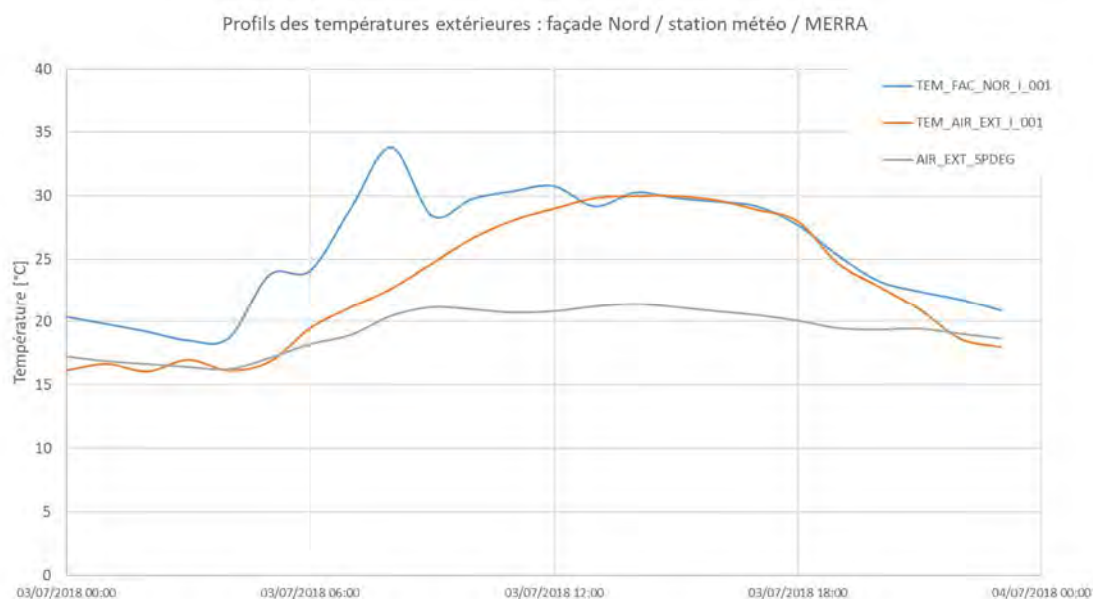


Figure 71 : Températures mesurées sur le site et issue du serveur MERRA – maison Hanau1 – 03/07/2018

Sur certaines journées, la mesure de température extérieure par la station météorologique locale (THIES réf. WSC11) rejoint la mesure sur la façade Nord (cf. Figure 71).

L'écart entre les deux mesures locales d'une part et la température calculée à partir du serveur MERRA d'autre part reflète à la fois la résolution grossière des données reconstruites (50 km) et l'influence du rayonnement thermique provenant du bâti du fait de la proximité des deux mesures avec les façades. La station météorologique THIES réf. WSC11 est fixée sur une potence de 30 cm et donc également proche d'une façade. On note que cet écart a tendance à augmenter jusqu'à la mi-journée puis à rester à une valeur élevée comme si l'inertie accumulée dans les parois du bâtiment influençait la mesure locale.

A contrario, une fois corrigée pour l'altitude du site étudié (cf. Tableau 3), la température extérieure issue du serveur MERRA est assez bien corrélée avec la température mesurée sur le site (cf. Figure 72).

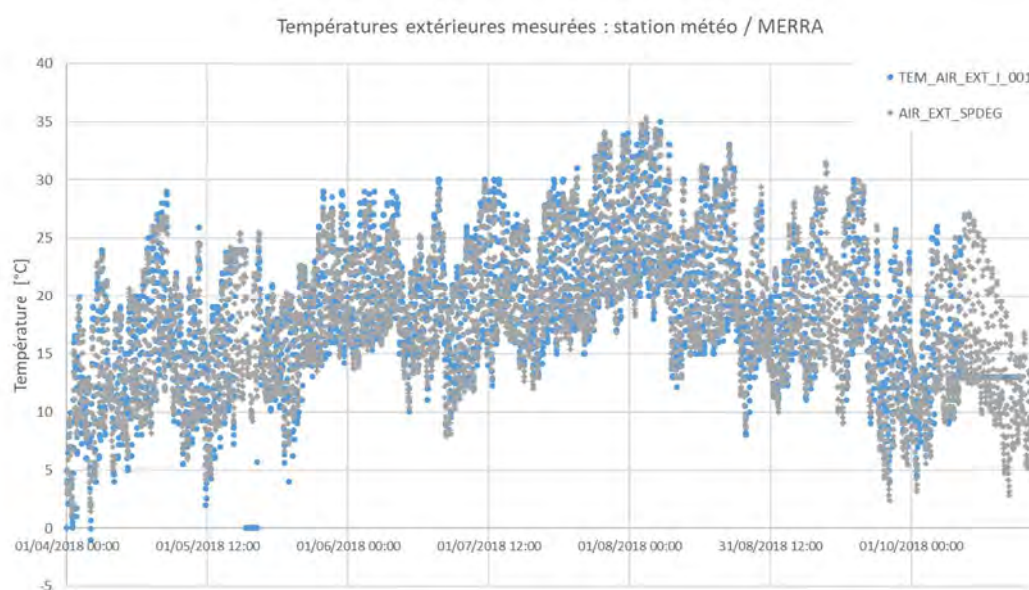


Figure 72 : Températures mesurée par une station météo et issue du serveur MERRA (www.soda-pro.com) – Hanau1 – 2018

L'erreur médiane entre la mesure et la température reconstruite est ramenée à 0,7°C et la moyenne à 1,1°C.

3.3.5.3. Exemples de résultats avec différentes mesures de Text

Lorsque cela a été possible, nous avons cherché à vérifier si les résultats obtenus avec les températures mesurées disponibles et les températures reconstruites sont similaires.

Qu'ils soient calculés à partir des températures extérieures mesurées sur site ou à partir des données reconstruites, les indicateurs d'inconfort d'été sont incomplets car, soit on doit déplorer la donnée manquante avec l'acquisition des mesures in situ, soit la température reconstruite n'est pas exacte compte tenu de la granulométrie des données fournies par le serveur MERRA (50 km).

L'exemple de la maison IGC2 illustre bien l'influence du rayonnement thermique et même solaire pris par la mesure en façade, avec des valeurs qui s'écartent fortement de la température d'air extérieur durant les mois d'été les plus chauds et qui s'en rapprochent un peu au cours du printemps et de l'automne (cf. Figure 73 et Figure 74).

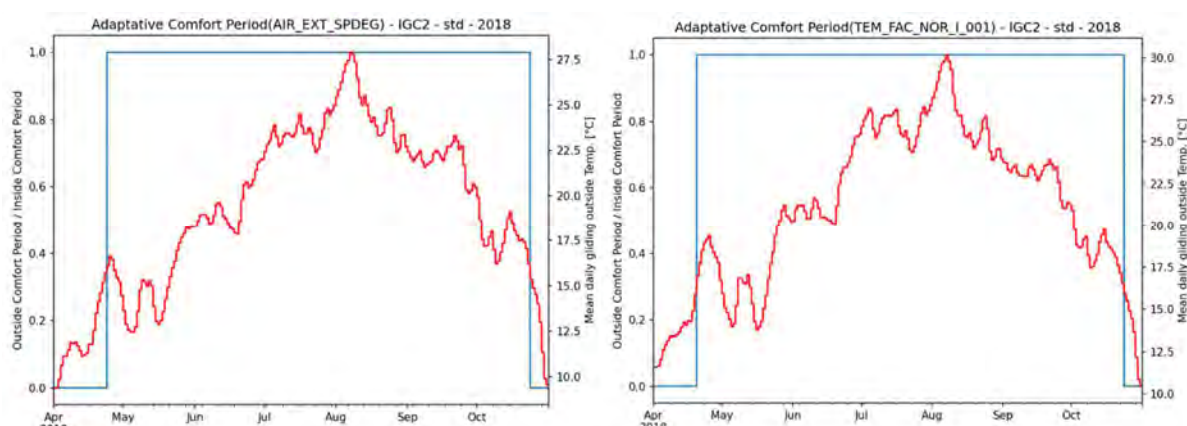


Figure 73 : T°C extérieures mesurée en façade Nord (à g.) et reconstruite (à dr.) - maison IGC2 - 2018

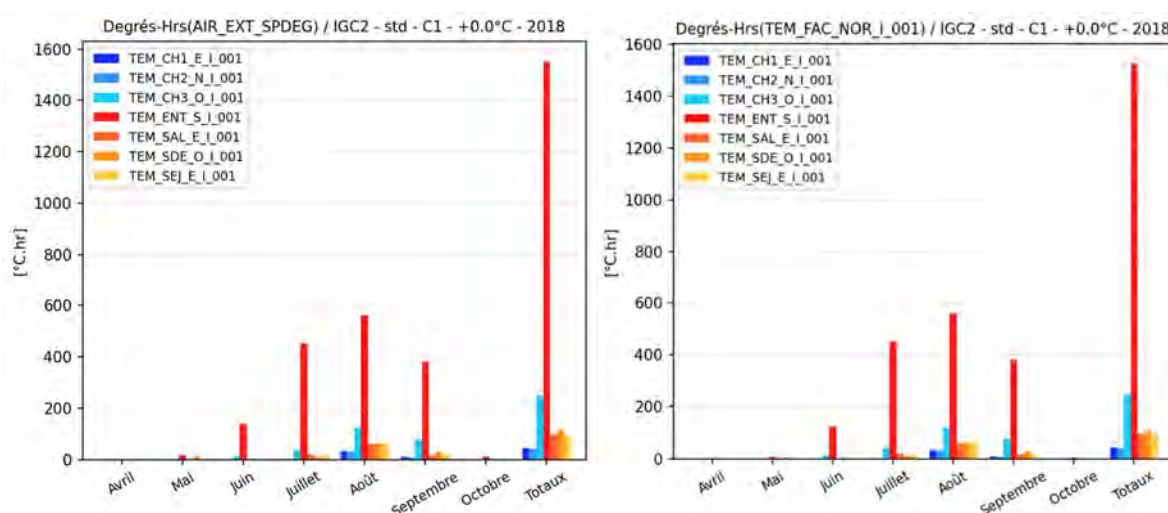


Figure 74 : Degrés-Heurs calculés avec t°C ext mesurée en façade (à g.) et reconst (à dr.) – maison IGC2 – 2018

Les écarts de calcul des degrés-heures DH en fonction de la mesure de température extérieure considérée sont inférieures à 8 %. De façon pas forcément très intuitive, l'indice DH diminue lorsque la température extérieure mesurée augmente. Ceci s'explique du fait du calcul de la température d'inconfort chaud Top_inconf_ch qui dépend de la température moyenne extérieure glissante Trm.

Les mesures de température en façade Nord de la maison Tradimaisons1 sont au contraire plutôt justes (cf. Figure 75). Cela est probablement dû au positionnement de la sonde qui n'est jamais exposée au soleil, ne reçoit pas de rayonnement thermique d'une surface quelconque et est protégée du vent. On peut apprécier que la température mesurée en façade Nord est très proche de celle mesurée par la station météorologique TEM_AIR_EXT_I_001.

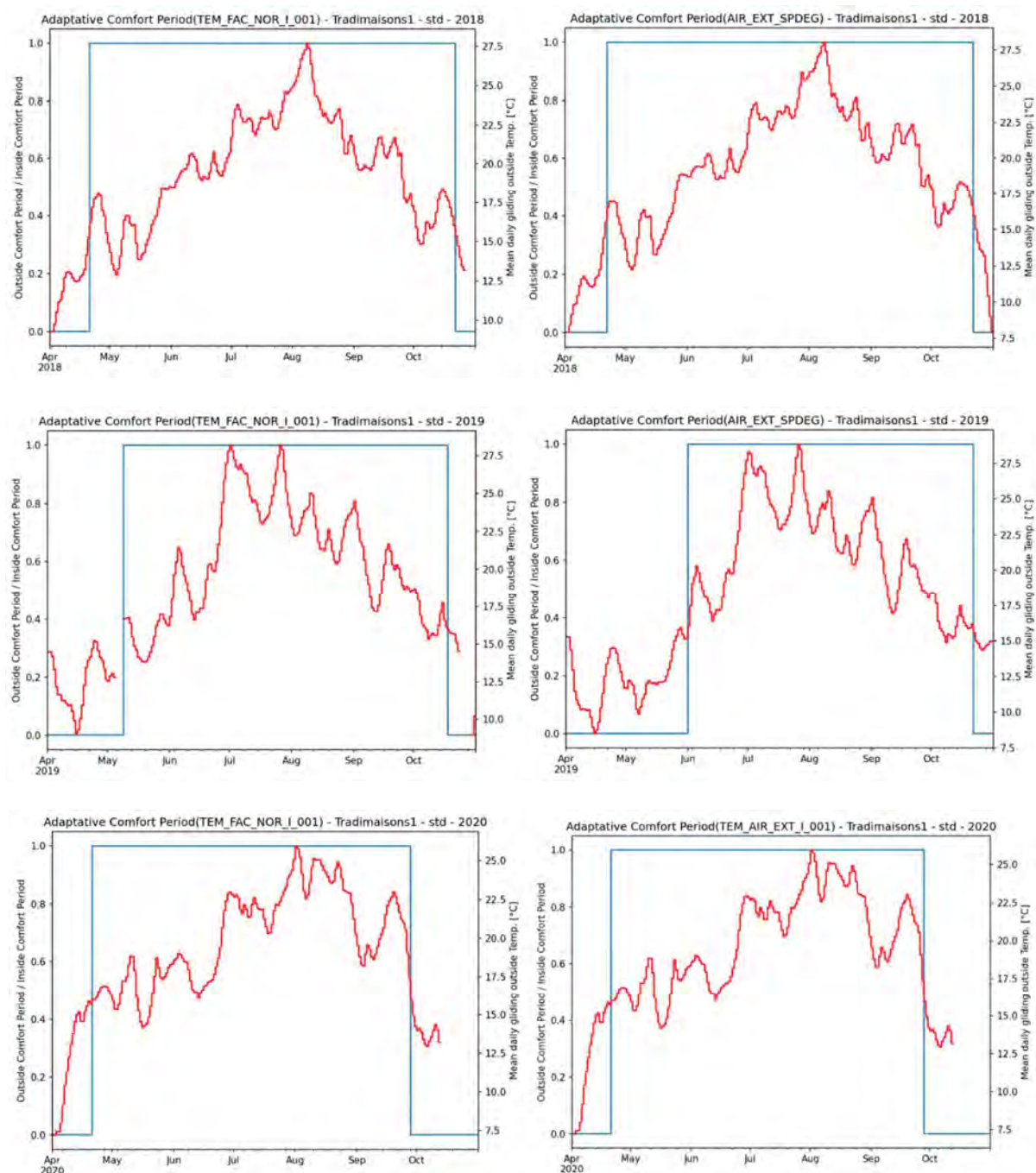


Figure 75 : Température extérieures mesurées en façade Nord, sur station et reconstruite – Tradimaisons1

Pour des maisons disposant de mesures de température extérieure exploitables, il apparaît que la différence entre les degrés-heures calculés avec l'une ou l'autre des températures mesurées sur site ou reconstruite est plus ou moins importante.

A titre d'exemple, la maison Pierre5 fournit des températures TEM_FAC_NOR_I_001 en quantité jugée suffisante qui sont environ 10 % plus élevées que les températures reconstruites à l'aide du serveur MERRA (cf. Figure 76). Les écarts sur l'indicateur DH calculé à partir de cette mesure ou de la température reconstruite sont inférieurs à 5 % (cf. Figure 77).

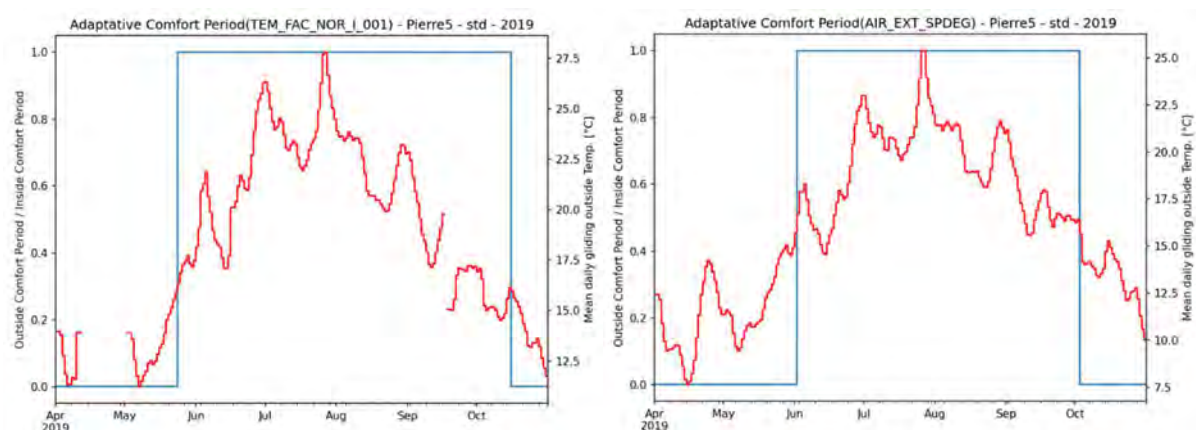


Figure 76 : Température extérieure mesurée TEM_FAC_NOR (à g.) / reconstruite AIR_EXT_SPDEG (à dr.) – Pierre5 – 2019

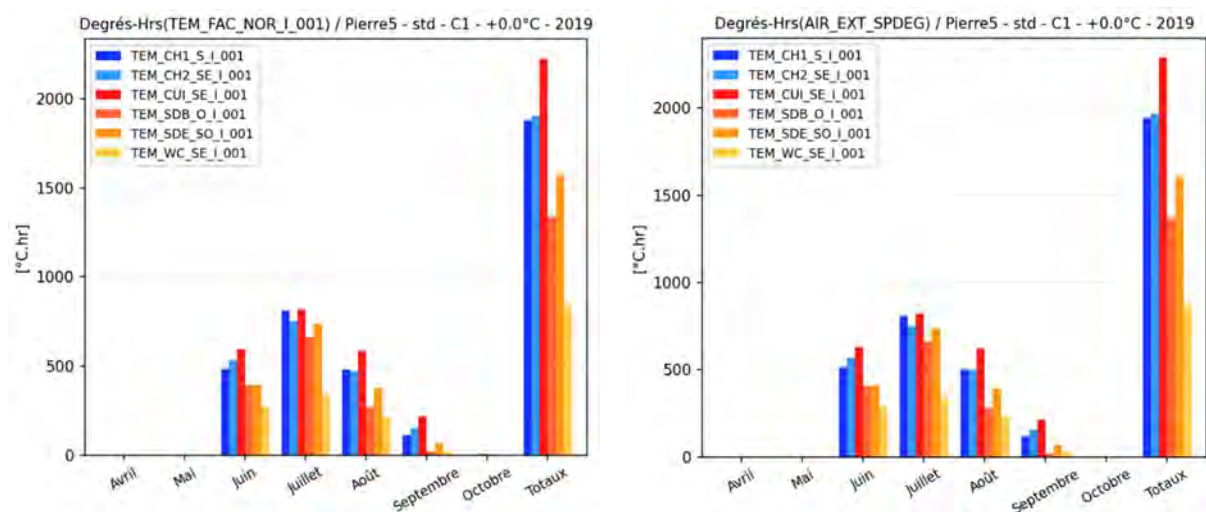


Figure 77 : Degrés-Heures calculés avec t°C mesurée TEM_FAC_NOR (à g.) / reconst. AIR_EXT_SPDEG (à dr.) – Pierre5 – 2019

De la même manière, la température mesurée en façade Nord de la maison Pierre1 est environ 1°C plus chaude que celle reconstruite à l'aide du serveur MERRA. L'erreur de calcul des degrés-heures calculés avec la température reconstruite est inférieure à 3 %.

Au contraire, les écarts supérieurs à 20 % entre la température extérieure mesurée TEM_FAC_NOR_I_001 et la température reconstruite AIR_EXT_SPDEG pour la maison Pierre2 conduisent à des résultats sensiblement différents sur les degrés-heures calculés : maximum 15 % (cf. Figure 78 et Figure 79). Il est toutefois intéressant d'observer que les écarts sur le calcul des degrés-heures sont plus concentrés sur les mois d'avril-mai-juin et septembre-octobre 2018.

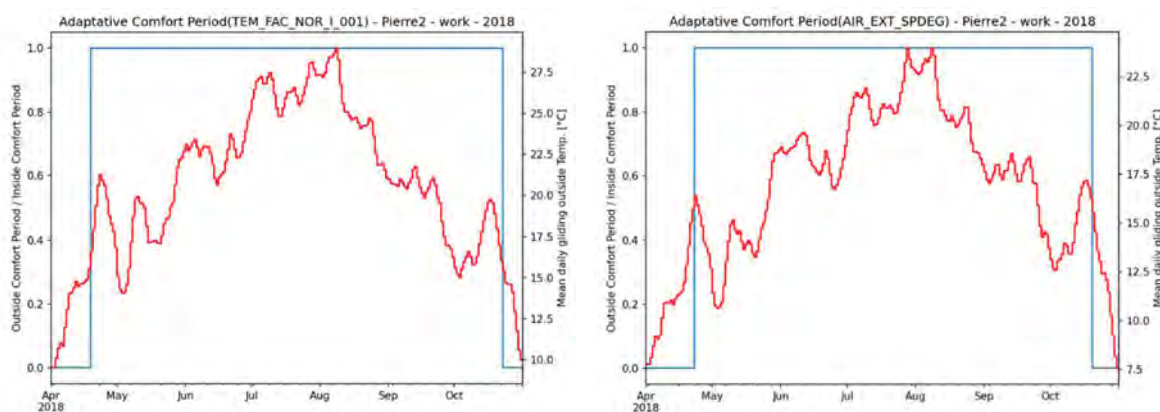


Figure 78 : Températures ext. mesurée TEM_FAC_NOR (à g.) / reconst. AIR_EXT_SPDEG (à dr.) – Pierre2 – 2018

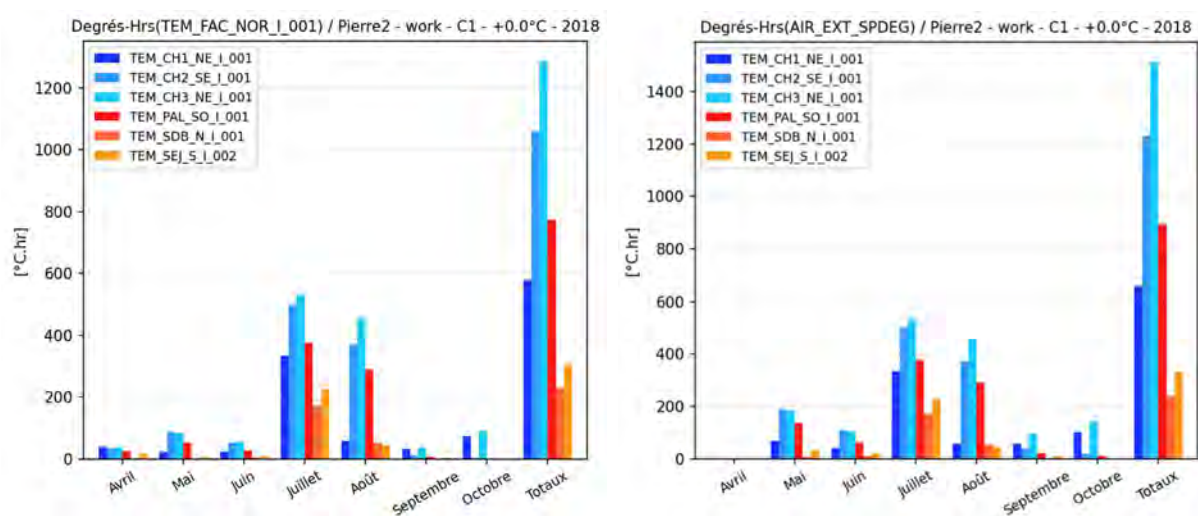


Figure 79 : Degrés-Heures calculés avec t°C mesurée TEM_FAC_NOR (à g.) / reconst. AIR_EXT_SPDEG (à dr.) – Pierre2 – 2018

Et alors que les écarts sur la température extérieure entre façade Nord et station météorologique sont de l'ordre de 10 à 15 % pour la même maison Pierre2 mais en 2020, l'erreur sur le calcul des degrés-heures reste inférieure à 10 %. Cela permet de relativiser l'importance de la précision de mesure de la température extérieure par rapport à l'estimation des degrés-heures et l'appréciation du confort d'été du logement.

En annexes (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), nous fournissons les degrés-heures (DH) pour chaque bâtiment, calculés à partir de la température extérieure mesurée et à partir de la température reconstruite.

Les résultats présentés ici et en annexes, établis en fonction de la température extérieure choisie, montrent que les écarts sur la température extérieure n'amplifient pas les incertitudes de calcul des indicateurs degrés-heures (DH) ou nombres d'heures d'inconfort. On note qu'une température extérieure surévaluée allonge la période de confort adaptatif sur l'année étudiée mais ceci pour des mois ou des jours où le risque de surchauffe est faible et où la température ambiante intérieure reste acceptable (cf. Figure 80).

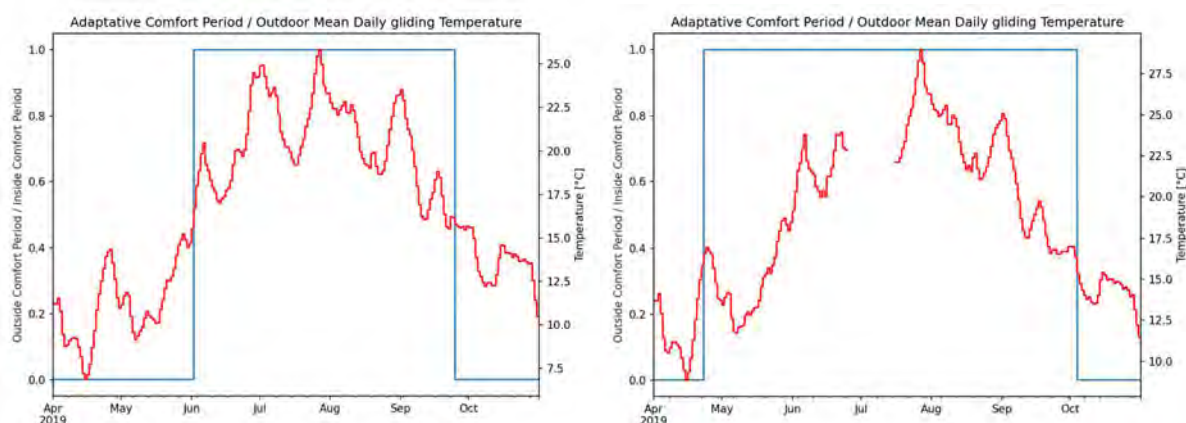


Figure 80 : Période confort adaptatif / $t^{\circ}\text{C}$ moy jour glissante – T_{ext} reconstr. (à g.) / T_{ext} façade Nord (à dr.) – Hanau 1 – 2019

3.4. Méthodologie du calcul des indicateurs d'inconfort d'été appliquée aux sites instrumentés

Une fois les données nettoyées, reconstruites, réparées, le CEA a appliqué la méthode de calcul Th-D 2020 pour calculer les indicateurs d'inconfort chaud tels que les Degrés-Heures (DH) par rapport à la consigne et les nombres d'heures d'inconfort chaud (NbH_inconf_C1/C2/C3).

3.4.1. Température opérative ou intérieure ?

La méthodologie de calcul Th-D 2020 proposée dans l'arrêté du 04 août 2021 s'appuie sur la notion de température opérative définie par la norme NF EN ISO 7726.

En l'absence d'un capteur de température de type BGT (« Black Globe Temperature ») ou de capteurs de température de parois dans un volume instrumenté, il apparaît difficile de déterminer la température opérative ressentie par les occupants. Il est vrai que ces capteurs sont relativement intrusifs et donc difficilement acceptables dans des espaces occupés. Les maisons COMEPOS et les bâtiments étudiés dans le cadre du projet RESILIANCE n'en sont pas équipés. Le CEA a été contraint d'exploiter les données de température disponibles, entre autres, les températures d'air ambiant intérieur mesurées dans les différentes pièces du logement/bâtiment.

Les résultats en terme d'indicateurs d'inconfort en sont obligatoirement affectés mais dans des proportions qu'il est difficile d'estimer. En effet, la température opérative définie par la norme NF EN ISO 7726 tient compte du rayonnement des parois en plus de la convection avec l'air ambiant. Elle dépend de multiples paramètres : isolation des parois extérieures, type et ratio de surfaces vitrées, gestion des éventuels occultants, inertie du bâti, revêtements de surface et des systèmes de rafraîchissement actifs ou passifs.

La température opérative peut être calculée à l'aide des formules suivantes lorsque la vitesse d'air intérieur n'excède pas 0,2 m/s :

$$\theta_{op} = \frac{\theta_{as} + \theta_{mr}}{2} \quad \text{et} \quad \theta_{mr} = \sqrt[4]{\theta_g^4 + \frac{h_{c,g}}{\varepsilon_g \cdot \sigma} \times (\theta_g - \theta_{as})}$$

Où :

- θ_{as} : température ambiante intérieure de l'air sec, exprimée en Kelvin
- θ_{mr} : température radiative moyenne aussi appelée température moyenne de rayonnement et définie dans la norme NF EN ISO 7726. Elle s'exprime en Kelvin et est déduite du bilan d'échange thermique entre le corps d'un occupant et les parois qui l'entourent. Ce bilan est celui du capteur de mesure de type « globe noir ».
- θ_g : température mesurée par le globe noir, exprimée en Kelvin

- $h_{c,g}$: coefficient de transfert thermique par convection à la surface du globe noir, exprimé en $W/(m^2.K)$. Ce coefficient de transfert thermique est fonction de la surface d'échange et de la vitesse d'air.
- ε_g : émissivité moyenne de surfaces extérieure du globe noir
- σ : constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67.10^8 W/(m^2.K^4)$

La formule de calcul de la température moyenne radiative θ_{mr} permet de vérifier que cette température suit la température mesurée par le globe noir θ_g . Lorsque la température θ_g est supérieure à la température d'air ambiant θ_{as} , le terme $\frac{h_c}{\varepsilon_g \sigma} \times (\theta_g - \theta_{as})$ est positif. On vérifie alors que la température moyenne radiative θ_{mr} est également supérieure à θ_{as} et le raisonnement inverse s'applique également. Nous considérons donc que la mesure de température par le globe noir est représentative de la température moyenne radiative.

Avec l'approximation $\theta_{op} = \theta_{as}$, on admet une erreur minorante ou majorante des écarts de températures permettant de calculer les indicateurs en fonction des paramètres constructifs du bâti, du comportement des occupants et des conditions climatiques.

Si l'on s'accorde communément sur le fait que des parois de forte inertie offrent une certaine capacité de rafraîchissement de l'ambiance intérieure des bâtiments isolés par l'extérieur, le CEA a pu mesurer des températures avec des globes noirs dépassant la température d'air intérieure de quelques degrés, au printemps 2011 dans le cadre de son projet « Bulle de confort » qui s'intéressait au confort d'été dans les bâtiments tertiaires.

On ne peut pas exclure que la température moyenne radiative et donc la température opérative, dépassent la température ambiante intérieure lors d'épisodes de chaleur dans des bâtiments correctement isolés comme les maisons COMEPOS et le bâtiment Hélios.

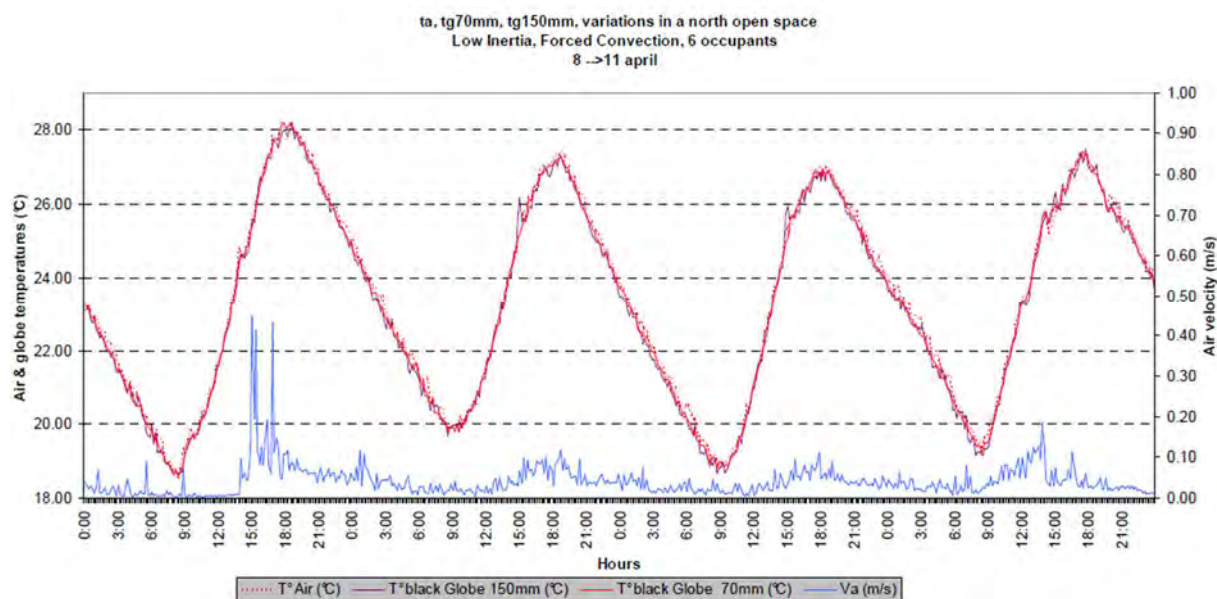


Figure 81 : Projet « Bulle de confort » – Confort d'été dans le tertiaire – bât. faible inertie – bureau orienté Nord – avril 2011

La Figure 81 trace les mesures de températures dans un bâtiment préfabriqué exposé au Nord, isolé mais de faible inertie, équipé d'un système de climatisation et de ventilation associée. Les capteurs de type globe noir étaient situés au centre de la pièce à 1,25 m au-dessus du sol fini. Les fenêtres pouvaient être ouvertes par les occupants ce que retranscrit la mesure de vitesse d'air V_a à certains moments de la journée du 8 et du 11 avril 2011.



Figure 82 : Dans un préfabriqué exposé Nord – avril 2011

Les résultats indiquent clairement que la température ambiante et les températures mesurées par les deux globes noirs se superposent. Les écarts sont toujours contraints dans l'incertitude de mesure ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$).

Le projet étudiait l'incidence de la taille du globe noir sur la précision des mesures : diamètre normatif $\Phi 150\text{ mm}$ (NF EN ISO 7726) ou diamètre réduit $\Phi 70$ pour limiter le caractère intrusif du capteur.

La température ambiante était mesurée par une sonde Pt100 protégée des tâches solaires par un écran thermique laissant la libre circulation de l'air sur le capteur. Il faut noter que ce type de bouclier thermique récupère une partie du rayonnement des surfaces environnantes pour le transmettre au capteur situé à l'intérieur. La température d'air intérieur en conditions de parois chaudes est certainement inférieure à cette mesure.

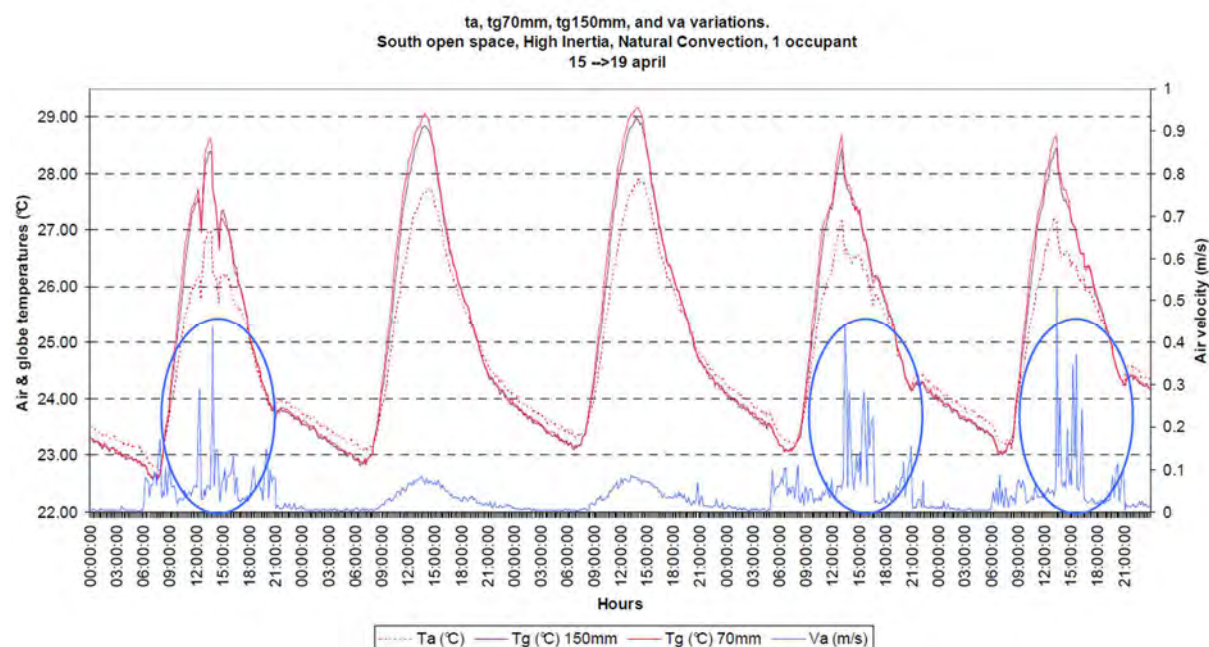


Figure 83 : Projet « Bulle de confort » – Confort d'été dans le tertiaire – bât. forte inertie – bureau orienté Sud – capteurs à 1,5m des surfaces vitrées – avril 2011

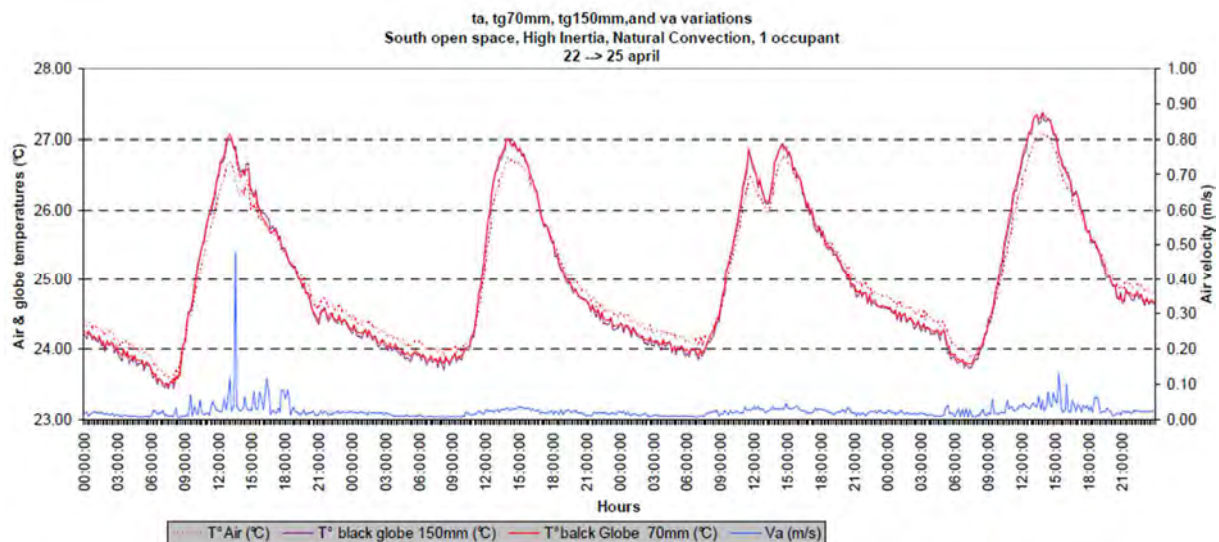


Figure 84 : Projet « Bulle de confort » – Confort d'été dans le tertiaire – bât. forte inertie – bureau orienté Sud – capteurs au centre de la pièce – avril 2011

Les figures précédentes (Figure 83 à Figure 84) montrent des situations où la température mesurée par les globes noirs dépasse celle de l'air intérieur de quelques dixièmes de degrés jusqu'à 1,3°C pour les mesures situées à 1,5 mètres des parois vitrées sur les pics journaliers. On observe également que les températures mesurées par les globes noirs sont inférieures à la température ambiante intérieure en période nocturne.

L'écart entre les températures mesurées par les globes noirs ou les sondes d'ambiance est principalement dû au rayonnement des surfaces vitrées qui sont exposées au Sud contrairement aux résultats de la Figure 81 qui concerne un bureau exposé au Nord. On relève que plus la mesure est proche des surfaces vitrées exposées plus l'écart entre température d'air et température moyenne radiative est important.

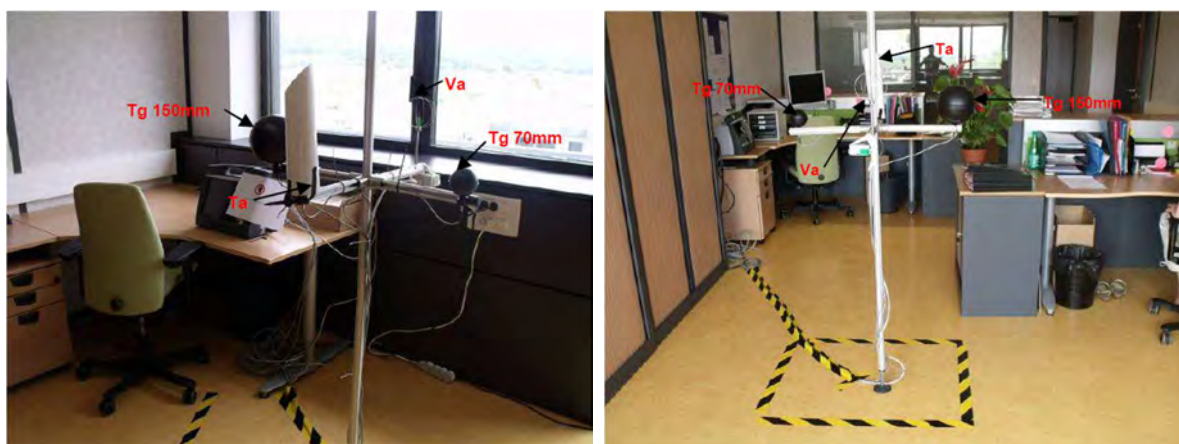


Figure 85 : Dans des bâtiments béton isolés exposés Sud – à proximité des ouvrant (à g.) et au centre de la pièce (à d.) – 2011

Une autre expérimentation menée au CEA dans le cadre du projet « SEREINE » qui visait à mettre au point une méthode d'évaluation du U_{bat} à partir d'échelons de chaleur appliqués au bâtiment, nous fournit une observation de l'évolution des températures des parois intérieures et de l'air ambiant au cours du mois d'août 2019 dans un bâtiment expérimental instrumenté et complètement dévêtu de sa couche d'isolation extérieure (cf. Figure 88).



Figure 86 : Maison expérimentale IBB - août 2019

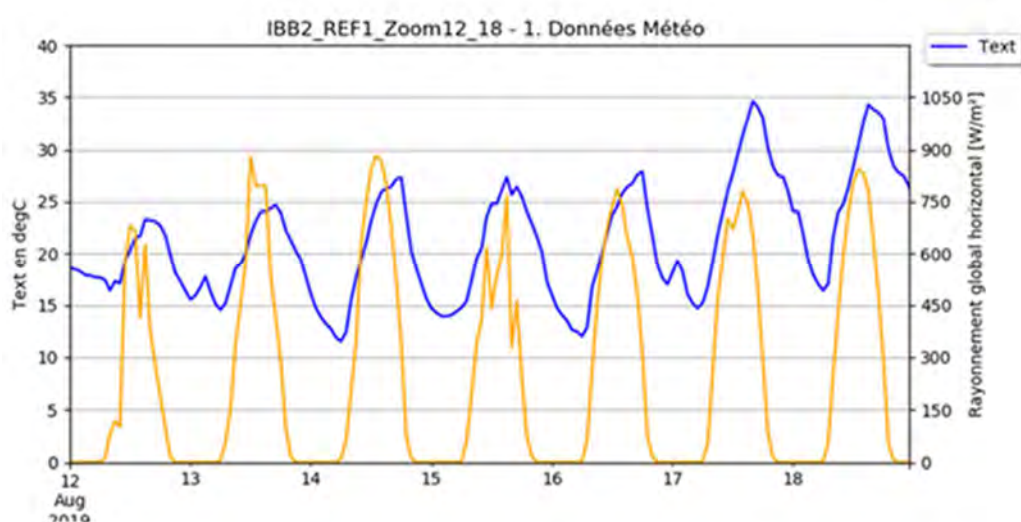


Figure 87 : Projet "SEREINE" – rayonnement solaire et $t^{\circ}\text{C}$ extérieure – maison IBB sans isolation – août 2019

Les relevés font état d'un écart de température entre air ambiant et les parois jusqu'à 5°C . Les murs en béton banché mis à nu, bien que très inertiels, laissent ainsi traverser un flux de chaleur important de l'extérieur vers l'intérieur de la construction.

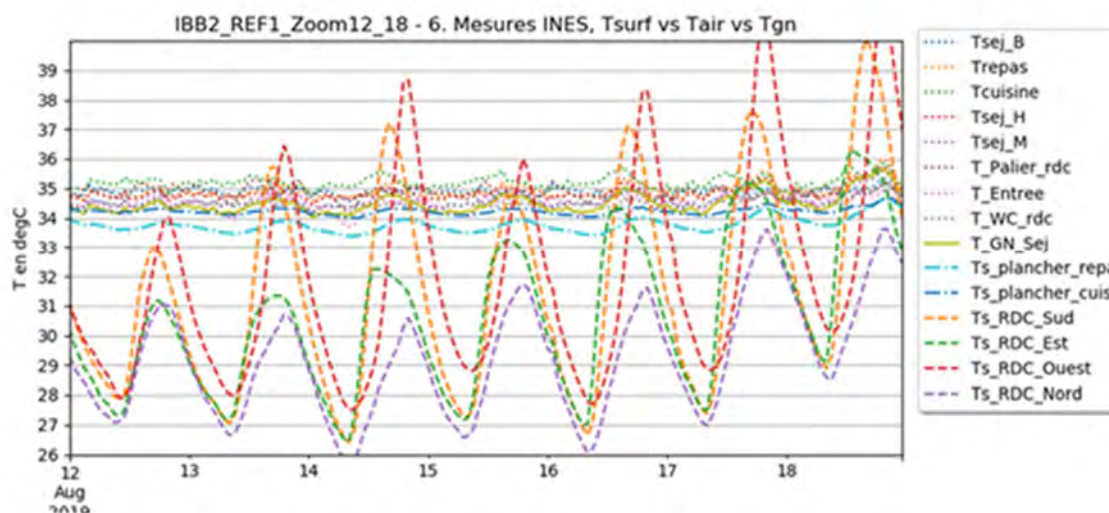


Figure 88 : Projet "SEREINE" – t°C de parois et ambiantes – maison IBB sans isolation – août 2019

La principale conclusion qui ressort de l'analyse de ces travaux (Figure 81 à Figure 88) est que les principaux facteurs qui contribuent à augmenter la température moyenne radiative par rapport à la température ambiante sont l'isolation et l'exposition du volume instrumenté. On peut y ajouter le type de vitrage et le ratio de surface vitrée.

Par ailleurs, les écarts de températures entre les parois et l'air ambiant dans les maisons COMEPOS correctement isolées et dont les ratios de surface vitrée rapporté à la surface habitable sont compris entre 18 et 29 %, devraient rester contenus à +2°C sur les pièces exposées au Sud, ce qui représente un écart inférieur à +1°C entre la température opérative et la température ambiante mesurée. Cet écart qui est du même ordre de grandeur que la précision de mesure des températures nous permet de relativiser l'erreur commise. Pour le bâtiment Hélios, dont le ratio de surface vitrée dans les bureaux exposés Sud et Ouest est probablement près des 30 %, il n'est pas improbable que l'erreur entre la température opérative et la température d'air ambiant puisse être légèrement supérieure à 1°C, notamment compte tenu des occultants peu efficaces sur la partie Ouest.

Enfin, pour renforcer l'idée que l'utilisation de la température d'air sec intérieure θ_{as} plutôt que des températures opératives θ_{op} ne fausse pas totalement l'estimation des indicateurs d'inconfort chaud, on peut aussi souligner que les mesures de températures dans les maisons COMEPOS comme dans le bâtiment Hélios sont réalisées par des capteurs de type mural ou sur pieds. Par conséquent, ces mesures ne peuvent s'affranchir complètement de l'influence de la paroi sur laquelle ils sont fixés ou posés. Si l'on admet que les capteurs n'ont pas été posés sur des parois extérieures ni exposées à une potentielle tâche solaire, il n'est alors pas déraisonnable d'affirmer que la température mesurée se rapproche de la température opérative.

3.4.2. Définition de la période de confort adaptatif

On peut ajouter selon l'arrêté du 04 août 2021 relatif aux exigences de performances énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine que : « En mode Th-D, la saison de confort adaptatif est supposée sans chauffage. ».

Par défaut, les 8 premières semaines de l'année sont considérées comme étant de saison de chauffage. De même, par défaut, 10 semaines durant l'été sont considérées comme n'étant pas de la saison de chauffage. En mode **Th-D**, la saison de confort adaptatif est supposée sans chauffage.

Figure 89 : Extrait de l'arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine – ANNEXE II § 1.4.1

Le mode de calcul Th-D est détaillé dans l'arrêté du 04 août 2021 :

Détermination de la période de confort adaptatif

Dans un premier temps, on calcule $\theta_{rm}(j)$, la moyenne glissante au jour j de la température extérieure. Cette moyenne est calculée au premier pas de temps du jour j (h tel que $IHJ=1$) et reprise pour l'ensemble des autres pas de temps du jour.

Si $IHJ = 1$,

$$\theta_{rm}(j) = 0$$

Sinon,

$$\theta_{ei,moy}(j) = \frac{\sum_{j-1} T_e(h)}{24} \quad (1)$$

$$\theta_{rm}(j) = 0.8 \times \theta_{rm}(j-1) + 0.2 \times \theta_{ei,moy}(j)$$

Le bâtiment est en « période de confort adaptatif » lorsque la température limite d'inconfort chaud est supérieure à la température de consigne de refroidissement, ce qui équivaut aux jours où la $\theta_{rm}(j)$ est supérieure à 16°C. L'algorithme de calcul est le suivant :

Figure 90 : Extrait de l'arrêté du 04 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine... (JO n°189 du 15/08/2021) – ANNEXE III § 3.1.3

```
def MeanDayText(df, air_ext): # ADD THE TEST SPECIFIC TO "MAS PROVENCE" : AIR_EXT_051 VS AIR_EXT_094
# TODO : TO RUN THE CODE WITHOUT THE REBUILT OUTSIDE TEMP SPDEG DATA, CALL THE FUNCTION WITH "NONE" INST
    if df.columns.str.contains(air_ext).any():
        # if df.columns.str.contains('AIR_EXT_SPDEG').any():

            Text = df[df.columns[df.columns.str.contains(air_ext)]]
            # Text = df[df.columns[df.columns.str.contains('AIR_EXT_SPDEG')]]
            #####

    elif df.columns.str.contains('AIR_EXT_051').any() and df.columns.str.contains('AIR_EXT_094').any():

        if df[df.columns[df.columns.str.contains('AIR_EXT_051')]].count().values[0] >= \
            df[df.columns[df.columns.str.contains('AIR_EXT_094')]].count().values[0]:
            Text = df[df.columns[df.columns.str.contains('AIR_EXT_051')]]
        else:
            Text = df[df.columns[df.columns.str.contains('AIR_EXT_094')]]
            #####

    elif df.columns.str.contains('TEM_AIR_EXT').any() and df.columns.str.contains('TEM_FAC_NOR').any():

        if df[df.columns[df.columns.str.contains('TEM_AIR_EXT')]].count().values[0] >= \
            df[df.columns[df.columns.str.contains('TEM_FAC_NOR')]].count().values[0]:
            Text = df[df.columns[df.columns.str.contains('TEM_AIR_EXT')]]
        else:
            Text = df[df.columns[df.columns.str.contains('TEM_FAC_NOR')]]

    elif df.columns.str.contains('FAC_NOR').any():
        Text = df[df.columns[df.columns.str.contains('FAC_NOR')]]

    elif df.columns.str.contains('TEM_AIR_EXT').any():
        Text = df[df.columns[df.columns.str.contains('AIR_EXT')]]

    elif df.columns.str.contains('METEO -T. EXTERIEURE').any():
        Text = df[df.columns[df.columns.str.contains('METEO -T. EXTERIEURE')]]

    else:
        sys.exit('miss outdoor temperture!')

    Text_mean_day = moyenne(Text, 'D').loc[pd.Series(df.index.date).unique()]

    Text_capt = Text.columns[0]

    return Text_mean_day, Text_capt, df
```

```

# Fonction calcul de la t°C extérieure moyenne glissante journalière RE2020
def GlidingMeanText(Text_mean_day, alpha):

    var=Text_mean_day.T.iloc[0] #Text_mean_day['TEM_FAC_NOR_I_001']
    Trm = pd.Series(index=Text_mean_day.index, name='Trm')
    try:
        Trm.iloc[0] = Text_mean_day.iloc[0]
    except:
        Trm[0]= Text_mean_day.iloc[0]

    for i in range(len(Text_mean_day)-1):

        if ~np.isnan(var[i]):
            try:
                Trm.iloc[i+1] = alpha*Trm.iloc[i] + (1-alpha)*Text_mean_day.iloc[i]
            except:
                Trm[i+1] = alpha*Trm.iloc[i] + (1-alpha)*Text_mean_day.iloc[i]

        elif np.isnan(var[i]) and ~np.isnan(var[i+1]):
            try:
                Trm.iloc[i+1] = Text_mean_day.iloc[i+1]
            except:
                Trm[i+1] = Text_mean_day.iloc[i+1]

        else:
            # Trm.iloc[i+1] = np.nan
            Trm[i+1] = np.nan

    return Trm

```

Le code développé par le CEA permet de choisir la température extérieure sur laquelle les calculs seront basés : « TEM_FAC_NO_I_001 » / « TEM_AIR_EXT_I_001 » / « AIR_EXT_SPDEG ». L'étude de la pertinence et de l'influence la mesure de température extérieure considérée est proposée au §3.3.5.

```

#####
##-----CALCULS DE LA MATRICE DE RESULTATS EXPLOITABLES-----##
#####

# ecarts = DiffTemp(df_y_1H)
# TODO: TO RUN THE CODE WITHOUT THE REBUILT OUTSIDE TEMP SPDEG DATA, CALL THE FUNCTION WITH "NONE" INSTEAD '
# CAUTION: THE FILTRATION IS DONE ON THE WHOLE PERIOD NOT YEAR BY YEAR. YOU WOULD RATHER TO WRITE THE SENSOR
T_EXT = input('What's the name of the outside temperature sensor?\n')

Text_mean_day, Text, df_y_1H = MeanDayText(df_y_1H, T_EXT) #'AIR_EXT_SPDEG') #'TEM_AIR_EXT_I_001') #

# Trm = GlidingMeanText(Text_mean_day, 0.8)

Trm = pd.Series()
Trm_a = list(range(len(Years))) #pd.to_datetime(Text_mean_day.index).year.unique()))
for a, an in enumerate(Years): #pd.to_datetime(Text_mean_day.index).year.unique()):
    Trm_a[a] = GlidingMeanText(Text_mean_day[pd.to_datetime(Text_mean_day.index).year==an], 0.8)
    Trm = pd.concat([Trm, Trm_a[a]], axis=0)

df_y_1H = CompilResults(df_y_1H, Text_mean_day, Trm)

# Fonction détection de la période de confort adaptatif Trm_j > 16°C (RE2020 §13.5.3.4)
def PeriodConfAdapt(df):

    df['Is_conf_adapt'] = 0

    fdate16 = df['Trm'].where(df['Trm']>=16).first_valid_index()
    ldate16 = df['Trm'].where(df['Trm']>=16).last_valid_index()

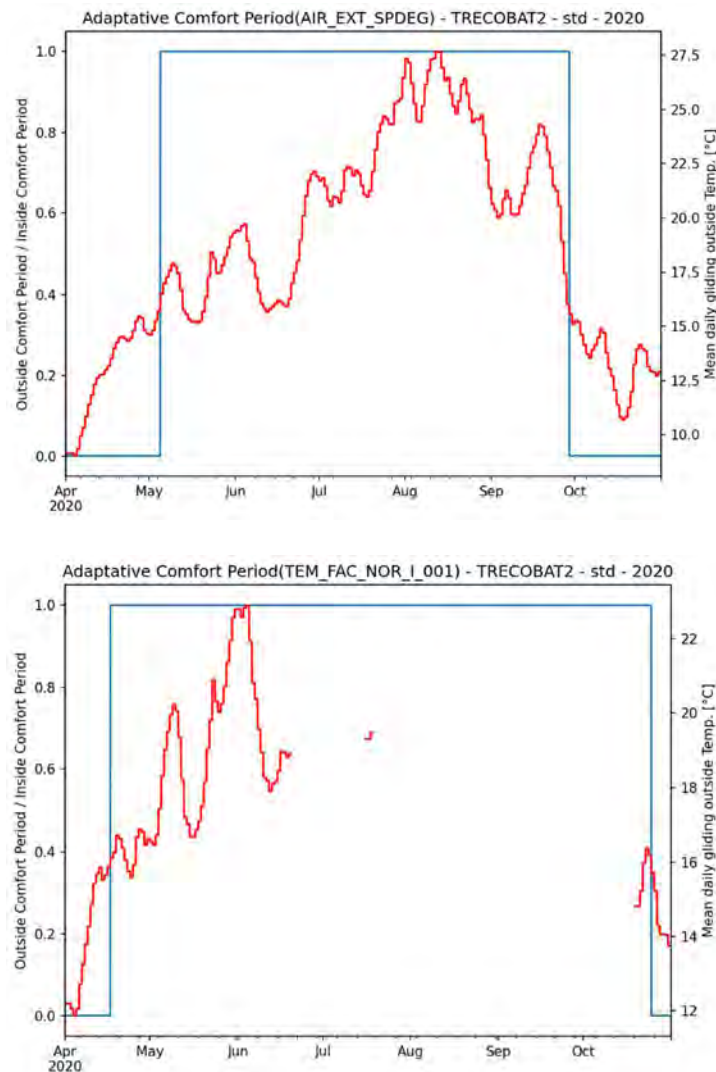
    df['Is_conf_adapt'].loc[fdate16:ldate16] = 1

    Is_conf_adapt = df['Is_conf_adapt']

    return df, Is_conf_adapt

```

Les Figures 91 nous montrent des exemples de périodes de confort adaptatif dessinées en trait bleu répondant à la définition réglementaire. Suivant la température extérieure considérée, la période de confort adaptatif peut être très différente.



Figures 91 : Période de confort adaptatif et $t^{\circ}\text{C}$ ext. reconst. sur MERRA (en h.) et mesurée en façade (en b.) – TRECOBAT2 – 2020

3.4.3. Vérification de la disponibilité des mesures

Dans son approche méthodologique, le CEA a calculé le taux de disponibilité des données pour chacun des capteurs sur les périodes étudiées et a fixé des seuils de limite basse. En dessous de ces seuils, la ressource en mesures du capteur concerné n'est pas jugée suffisante pour calculer un quelconque indicateur d'inconfort d'été.

Les seuils de disponibilité, limites basses ont été fixés arbitrairement :

- Taux de disponibilité des mesures de température intérieure. Seuil sur toute la période et seuil sur les mois de juillet et août : TEM_th = 80 %
- Le taux de disponibilité des températures extérieures qui sont utilisées pour la définition de la période de confort adaptatif et pour le calcul de la température opérative d'inconfort chaud est toujours près de 100 % après reconstruction (cf. §3.3.5.1)
- Taux de disponibilité des mesures de CO₂ pour les calculs avec reconstruction de l'occupation. Seuil sur toute la période et seuil sur les mois de juillet et août : CO₂_th = 70 %

```
# TODO: choose the temperature and CO2 thresholds in order to select the sensors with suffi
TEM_th = 80
CO2_th = 70
```

```
#####
# Added by EFR to select the sensors that have enough data year by year
l_colTy[io][ny] = dfNotNanTemp[io][ny].columns\
    [(dfNotNanTemp[io][ny].loc['mean_year']>=TEM_th) &\
     (dfNotNanTemp[io][ny].loc['Juillet']>=TEM_th) &\
     (dfNotNanTemp[io][ny].loc['Août']>=TEM_th)]

l_colTy[io][ny] = l_colTy[io][ny].drop(l_colTy[io][ny]\
    [l_colTy[io][ny].str.contains('EXT|FAC_NOR')])

l_colCO2y[io][ny] = dfNotNanCO2[io][ny].columns\
    [(dfNotNanCO2[io][ny].loc['mean_year']>=CO2_th) &\
     (dfNotNanCO2[io][ny].loc['Juillet']>=CO2_th) &\
     (dfNotNanCO2[io][ny].loc['Août']>=CO2_th)]
```

Le filtre à partir du seuil de disponibilité des mesures a été appliqué sur chaque année étudiée mais aussi sur les mois de juillet et août qui sont potentiellement les plus à risque des épisodes caniculaires et donc les mois les plus contributeurs au calcul des indicateurs d'inconfort chaud.

Avril	100	99	96	95	95	96	91
Mai	99	98	92	86	55	99	100
Juin	100	98	97	97	96	99	99
Juillet	100	98	95	93	90	56	99
Août	100	93	90	88	59	0	94
Septembre	99	100	96	96	85	0	100
Octobre	100	89	93	91	37	0	99
Novembre	99	0	92	91	88	0	99
mean_year	100	84	94	92	76	44	98

Tableau 4 : Taux de disponibilité des mesures de température pour la maison MAS_PROVENCE – 2018

Les résultats ne sont tracés que pour les capteurs dont la disponibilité des enregistrements respecte ces contraintes.

Dans le cas de la maison MAS_PROVENCE sur l'année 2018, seuls les capteurs de température TEM_CH1_S_091, TEM_CH2_S_092, TEM_CH3_S_090 et TEM_SEJ_SO_099 sont conservés pour le calcul d'indicateur d'inconfort d'été.

Avril	99	98	93	98	95	0	99
Mai	100	97	92	98	93	0	99
Juin	100	0	94	97	93	0	100
Juillet	100	68	92	99	88	0	99
Août	100	44	41	44	95	0	99
Septembre	100	0	0	0	92	0	99
Octobre	100	0	0	0	88	0	99
Novembre	100	0	0	0	12	0	100
mean_year	100	38	52	54	82	0	99

Tableau 5 : Taux de disponibilité des mesures de température pour la maison MAS_PROVENCE – 2019

En 2019, pour la même maison MAS_PROVENCE, seuls les capteur TEM_CH4_S_094 et TEM_SEJ_SO_099 sont retenus pour calculer les indicateurs.

3.4.4. Calcul de la température d'inconfort chaud

DH		Degrés-heures d'inconfort		°C.h					
Variables internes									
Nom		Description		Unité					
$\theta_m(j)$		Température extérieure moyenne journalière glissante valable au jour j.		°C					
$\theta_{op_inc_max}$		Seuil de température opérative d'inconfort chaud		°C					
$\theta_{op_inc_max_C1}$		Seuil de température opérative d'inconfort chaud en catégorie d'ambiance 1, 2 et 3.		°C					
$\theta_{op_inc_max_C2}$									
$\theta_{op_inc_max_C3}$									
$\theta_{op_conf_ch}(h)$		Température limite de confort chaud		°C					
$\theta_{op_conf_ch_corr}(h)$		Température limite de confort chaud corrigée		°C					
$\Delta\theta_{op_inc_C1}$		Paramètres conventionnels intervenant dans la définition de $\theta_{op_inc_max}$, en catégorie d'ambiance 1, 2 et 3.		°C		-∞	+∞	2	
$\Delta\theta_{op_inc_C2}$									3
$\Delta\theta_{op_inc_C3}$									
Cat_amb		Catégorie d'ambiance du groupe considéré au regard des catégories 1, 2 et 3 définies ci-dessous		Entier	1	3			

Figure 92 : Extrait de l'arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine... (JO n°189 du 15/08/2021) – ANNEXE III § 13.5.2

Afin de calculer les indicateurs d'inconfort chaud, il est nécessaire de définir la température d'inconfort chaud. C'est la température opérative $\theta_{op_conf_ch}$ au-dessus de laquelle l'occupant est en situation d'inconfort chaud.

La norme NF EN 16798-1 définit la température de consigne de refroidissement pour chaque catégorie d'ambiance : $\theta_{i_fr}^+$. Les températures de refroidissement retenues pour nos calculs sont les valeurs maximales des plages proposées pour chaque catégorie, en fonction de l'usage du bâtiment et concernant une activité sédentaire : $\theta_{i_fr}^+ = 25,5^\circ\text{C}$ (C1) / 26°C (C2) / 27°C (C3).

Tableau B.5 — Plages de température pour le calcul horaire de l'énergie de chauffage et de refroidissement dans quatre catégories d'ambiance intérieure

Type de bâtiment ou d'espace	Catégorie	Plage de température pour les saisons de chauffage, °C Tenue vestimentaire, environ 1,0 clo	Plage de température pour les saisons de refroidissement, °C Tenue vestimentaire, environ 0,5 clo
Bâtiments résidentiels, pièces de vie (chambres, cuisines, séjours, etc.) Activité sédentaire ~ 1,2 met	I	21,0 - 25,0	23,5 - 25,5
	II	20,0 - 25,0	23,0 - 26,0
	III	18,0 - 25,0	22,0 - 27,0
	IV	17,0 - 25,0	21,0 - 28,0
Bâtiments résidentiels, autres espaces (pièces de service, stockage, etc.) Activité debout-en marchant ~ 1,5 met	I	18,0 - 25,0	
	II	16,0 - 25,0	
	III	14,0 - 25,0	
Bureaux et locaux à activité similaire (bureaux individuels, bureaux paysagés, salles de réunion, auditoriums, cafétérias, restaurants, salles de classe) Activité sédentaire ~ 1,2 met	I	21,0 - 23,0	23,5 - 25,5
	II	20,0 - 24,0	23,0 - 26,0
	III	19,0 - 25,0	22,0 - 27,0
	IV	17,0 - 25,0	21,0 - 28,0
Pendant les saisons intermédiaires de chauffage et de refroidissement (avec θ_{rm} comprise entre 10°C et 15°C), les limites de température se situant entre les valeurs hivernales et estivales peuvent être utilisées. Il est supposé que la vitesse d'air est < 0,1 m/s et que RH~40 % pendant la saison de chauffage et de 60 % pendant la saison de refroidissement.			

Figure 93 : Extrait de la norme NF EN ISO 16798-1 §B2.4 Tableau B.5

La température d'inconfort chaud pour chaque catégorie d'ambiance : $\theta_{op_inc_max_C1}$, $\theta_{op_inc_max_C2}$, $\theta_{op_inc_max_C3}$, est définie par la méthode Th-D RE2020 à partir de la température de consigne de refroidissement θ_{iifrr}^+ , de la température extérieure moyenne journalière glissante θ_{rm} , et de la température opérative pour laquelle l'inconfort est inacceptable dans la catégorie d'ambiance choisie : $\Delta\theta_{op_inc_C1}$, $\Delta\theta_{op_inc_C2}$, $\Delta\theta_{op_inc_C3}$.

13.5.3.3 Calcul de la température d'inconfort chaud

La première étape du calcul consiste à définir quelle est la température à partir de laquelle l'occupant est en situation d'inconfort chaud.

La température d'inconfort chaud est calculée d'après la norme NF EN 16798-1. Elle s'appuie sur la notion de confort adaptatif.

(Note : les calculs ci-dessous sont strictement identiques à ceux de la fiche algorithme C_Ein_Indicateurs de confort).

La température moyenne glissante au jour j de la température extérieure $\theta_{rm}(j)$ est calculée dans la fiche climat extérieur.

On détermine alors les valeurs de $\Delta\theta_{op_inc}$ à utiliser dans le calcul des $\theta_{op_inc_max}$, seuil d'inconfort maximal de température opérative ressentie pour les trois catégories d'ambiance. Les formules de calcul des $\theta_{op_inc_max}$ sont les suivantes :

$$\begin{aligned}\theta_{op_inc_max_C1}(j) &= \text{MAX}(\theta_{iifrr}^+; 0.33 \times \theta_{rm}(j) + 18.8 + \Delta\theta_{op_inc_C1}) \\ \theta_{op_inc_max_C2}(j) &= \text{MAX}(\theta_{iifrr}^+; 0.33 \times \theta_{rm}(j) + 18.8 + \Delta\theta_{op_inc_C2}) \\ \theta_{op_inc_max_C3}(j) &= \text{MAX}(\theta_{iifrr}^+; 0.33 \times \theta_{rm}(j) + 18.8 + \Delta\theta_{op_inc_C3})\end{aligned}\quad (2598)$$

La valeur de catégorie d'ambiance retenue dépend du type d'usage du projet :

USAGE de la zone au sens des scénarios	Valeur de Cat_amb
Bâtiments à usage d'habitation	1
Autres usages	1

Tableau 343: Relation entre les catégories d'ambiance et le type d'usage

Figure 94 : Extrait de l'arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine... (JO n°189 du 15/08/2021) – ANNEXE III § 13.5.3.3

La catégorie d'ambiance = 1 pour le calcul des indicateurs réglementaires. Mais pour nos résultats, nous avons gardé l'appellation degrés-heures et nombres d'heures d'inconfort même s'il s'agissait de résultats obtenus avec d'autres catégories d'ambiance : 1, 2 ou 3. A chaque catégorie d'ambiance, le code adapte automatiquement la valeur de la température limite de confort chaud (cf. Figure 93) et la valeur des paramètres conventionnels (cf. Figure 92).

Valeur maximale

Quel que soit l'usage, nous limiterons la température d'inconfort chaud à 2°C au-dessus de la température de consigne de refroidissement ($\Delta\theta_{op_min_max}=2^\circ\text{C}$)¹³.

Valeur minimale

De plus, l'échange thermique entre l'occupant et l'air ambiant est réduit en période de sommeil. Pour les usages d'habitation, la température d'inconfort chaud aux heures de la nuit est donc supposée égale à la température de consigne de refroidissement en occupation normale, sans effet du confort adaptatif.

De plus, l'échange thermique entre l'occupant et l'air ambiant est réduit en période de sommeil. Pour les usages d'habitation, la température d'inconfort chaud aux heures de la nuit est donc supposée égale à la température de consigne de refroidissement en occupation normale, sans effet du confort adaptatif.

Si le groupe appartient à une zone dont l'usage est de type « habitation » (maison individuelle, logement collectif, établissement sanitaire avec hébergement) :

Si $6 < h_{leg} \leq 22$,

$$\theta_{op_conf_ch}(h) = \min(\theta_{iifr}^+ + \Delta\theta_{op_inc_max_C1_op_min_max}()) \quad (2599)$$

Sinon (période de sommeil),

$$\theta_{op_conf_ch}(h) = \theta_{iifr}^+$$

Pour les autres types d'usage

$$\theta_{op_conf_ch}(h) = \min(\theta_{iifr}^+ + \Delta\theta_{op_inc_max_C1_op_min_max}()) \quad (2600)$$

La température d'inconfort chaud $\theta_{op_conf_ch}(h)$ est calculée à chaque heure et pour chaque groupe. Elle est, par définition, identique pour tous les groupes d'une même zone.

¹³ La norme NF EN 16798-1 précise que la base de données utilisée pour déterminer la température d'inconfort chaud est restreinte pour des $\theta_{m(j)}$ supérieures à 25°C.

1369/1376

Figure 95 : Extrait de l'arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine...(JO n°189 du 15/08/2021) – ANNEXE III § 13.5.3.3

Les équations n°2599 et 2600 proposées dans l'arrêté du 4 août 2021 pour le calcul des températures d'inconfort chaud sont erronées. Elles doivent être réinterprétées à l'aide des formules suivantes issues de l'annexe E+C-_Fiches algorithmes_v3.1 (cf. Figure 96).

Le calcul de la température d'inconfort chaud par catégorie d'ambiance est le suivant :

SI Cat_amb=1

$$\theta_{op_conf_ch}(h) = \min(\theta_{iifr}^+ + \Delta\theta_{op_min_max} ; \theta_{op_inc_max_C1}(j)) \quad (163)$$

SI Cat_amb=2

$$\theta_{op_conf_ch}(h) = \min(\theta_{iifr}^+ + \Delta\theta_{op_min_max} ; \theta_{op_inc_max_C2}(j)) \quad (164)$$

SI Cat_amb=3

SI $6 < h_{leg} \leq 22$,

$$\theta_{op_conf_ch}(h) = \min(\theta_{iifr}^+ + \Delta\theta_{op_min_max} ; \theta_{op_inc_max_C3}(j)) \quad (165)$$

SINON (période de sommeil),

$$\theta_{op_conf_ch}(h) = \theta_{iifr}^+$$

Figure 96 : Extrait de l'annexe E+C-_Fiches algorithmes_v3.1 – § 2.1.3.3

Le code du CEA qui permet de calculer la température d'inconfort chaud avec l'interprétation correcte de la réglementation est le suivant :

```
#####
##-----DEFINITION DES CONDITIONS DE CONFORT-----##
#####
# TODO: choisir la catégorie d'ambiance de la zone de confort étudiée (RE2020)
cat_amb = input('What''s the ambient comfort category of the house/building?\n') #'C1' / 'C2' / 'C3'

TLinf = 26 # TODO: choisir la consigne de température de confort (RE2020)
deltaTminmax = 2 # TODO: choisir l'écart de température en min et max pour la t°C de confort (RE2020)
deltaTcorr_syst = 1 # TODO: choisir la correction sur la t°C de confort correspondant au système util
debNuit = 22 # TODO: choose the hour when the night begins (used in function LimiteConfmin and shoulda
finNuit = 6 # TODO: choose the hour at which the night ends (used in function LimiteConfmin and shoulda

#####

df_y_1H, Top_inc_max_C1, Top_inc_max_C2, Top_inc_max_C3 = SeuilInconfMax(df_y_1H, TLinf)

df_y_1H, Top_conf_ch = LimiteConfmin(df_y_1H, cat_amb, TLinf, deltaTminmax, typo, debNuit, finNuit)

df_y_1H, Top_conf_ch_corr = Inconfcorr(df_y_1H, deltaTcorr_syst)

# Fonction calculs du seuil d'inconfort max températures (EN16798 et RE2020 §13.5.3.3)
def SeuilInconfMax(df, TLinf):

    df['Top_inc_max_C1'] = 0
    df['Top_inc_max_C2'] = 0
    df['Top_inc_max_C3'] = 0

    df['Top_inc_max_C1'] = df.apply(lambda x: max(TLinf,\
                                                0.33*x['Trm']+18.8+2), axis=1)
    df['Top_inc_max_C2'] = df.apply(lambda x: max(TLinf,\
                                                0.33*x['Trm']+18.8+3), axis=1)
    df['Top_inc_max_C3'] = df.apply(lambda x: max(TLinf,\
                                                0.33*x['Trm']+18.8+4), axis=1)

    Top_inc_max_C1 = df['Top_inc_max_C1']
    Top_inc_max_C2 = df['Top_inc_max_C2']
    Top_inc_max_C3 = df['Top_inc_max_C3']

    return df, Top_inc_max_C1, Top_inc_max_C2, Top_inc_max_C3

# Fonction ajout de la valeur minimum d'inconfort chaud (RE2020 §13.5.3.3) - changed on Nov. 4th 2021 EFR
def LimiteConfmin(df, cat_amb, TLinf, deltaTminmax, typo, debNuit, finNuit):

    df['Top_conf_ch'] = 0

    if cat_amb == 'C1':
        df['Top_conf_ch'] = df.apply(lambda x: min(TLinf+deltaTminmax,\
                                                    x['Top_inc_max_C1']), axis=1)

    elif cat_amb == 'C2':
        df['Top_conf_ch'] = df.apply(lambda x: min(TLinf+deltaTminmax,\
                                                    x['Top_inc_max_C2']), axis=1)

    elif cat_amb == 'C3':
        df['Top_conf_ch'] = df.apply(lambda x: min(TLinf+deltaTminmax,\
                                                    x['Top_inc_max_C3']), axis=1)

    # df['Top_conf_ch'].where((df.index.hour<debNuit) & (df.index.hour>finNuit), TLinf, inplace=True)
    if typo == 'habitat':
        df['Top_conf_ch'].where((df.index.hour<=debNuit) & (df.index.hour>finNuit), TLinf, inplace=True)
    elif typo == 'Tertiaire':
        df['Top_conf_ch'] = df['Top_conf_ch']
    else:
        print('typo error')

    Top_conf_ch = df['Top_conf_ch']

    return df, Top_conf_ch
```

Enfin, la température d'inconfort chaud est additionnée au différentiel de température ressentie par les occupants lors du fonctionnement d'un éventuel système de rafraîchissement par convection (brasseurs d'air) ou par évaporation (brumisateurs). Ce différentiel correspond à l'abaissement de température ressentie par les occupants et peut être calculée à l'aide des formules mentionnées dans la norme NF EN ISO7726 relatives à la température moyenne radiative qui dépend entre autres, de la vitesse d'air en situation de convection forcée. Pour l'étude, le CEA s'est appuyé sur les gains de température ressentie proposés par la norme NF EN ISO7726 pour trois vitesses d'air.

Tableau B.4 — Correction de la température de fonctionnement intérieure ($\Delta\theta_o$) applicable aux bâtiments équipés de ventilateurs ou de systèmes individuels permettant aux occupants du bâtiment de réguler individuellement la vitesse d'air au niveau du poste de travail

Vitesse moyenne d'air (V_a) 0,6 m/s	Vitesse moyenne d'air (V_a) 0,9 m/s	Vitesse moyenne d'air (V_a) 1,2 m/s
1,2 °C	1,8 °C	2,2 °C

Figure 97 : Extrait de la norme NF EN ISO 16798-1 – § B.2.3 – Tableau B.4

3.4.5. Calcul réglementaire des indicateurs d'inconfort d'été

Les indicateurs réglementaires d'inconfort d'été ou chaud sont définis par la réglementation énergétique RE2020. Il s'agit :

- Degrés-Heures d'inconfort chaud calculés comme la somme des écarts entre la température opérative (température ambiante dans notre cas) et la température d'inconfort chaud éventuellement corrigé si un appareil de rafraîchissement est en fonctionnement dans le volume considéré. La formule de calcul est définie dans l'arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine :

13.5.3.8 Calcul de l'indicateur de confort d'été

L'indicateur de confort d'été est égal au cumul de l'écart à la température de confort adaptatif de chaque heure. Les calculs sont effectués en période de confort adaptatif et en période d'occupation ($I_{s_conf_adapt}(h)=1$ et $I_{occ_zone}(h)=1$).

$$DH = \sum_{\substack{h \text{ telle que} \\ (I_{s_occ_zone}(h)=1 \text{ et} \\ I_{s_conf_adapt}(h)=1)}} \max(0; \theta_{op}(h) - \theta_{op_conf_ch_corr}(h)) \quad (2606)$$

Figure 98 : Extrait de la méthode de calcul Th-D 2020 – Calcul de l'indicateur d'inconfort d'été

- Le nombre d'heures d'inconfort chaud déterminé par rapport à la température de consigne de chauffage. Leur calcul est défini dans l'arrêté du 4 août 2021 :

13.5.3.7 Calcul des indicateurs pédagogiques

Les calculs sont effectués en période de confort adaptatif et en période d'occupation ($I_{sconf_adapt}(h)=1$ et $I_{occ_zone}(h)=1$).

Initialisation au pas de temps 0 : $Nbh_{inconf} = Nb h_{inconf+1C} = Nb h_{inconf+2C} = 0$

$$\text{Si } \theta_{op}(h) \geq \theta_{op_conf_ch_corr}(h) \quad (2603)$$
$$Nb h_{inconf} += 1$$

$$\text{Si } \theta_{op}(h) \geq \theta_{op_conf_ch_corr}(h) + 1 \quad (2604)$$
$$Nb h_{inconf+1C} += 1$$

$$\text{Si } \theta_{op}(h) \geq \theta_{op_conf_ch_corr}(h) + 2 \quad (2605)$$
$$Nb h_{inconf+2C} += 1$$

Figure 99 : Extrait de la méthode Th-D 2020 - calculs des indicateurs pédagogiques

A noter que l'écart de température aux critères d'inconfort d'été est calculé pour chaque pas horaire et vaut zéro lorsque la température ne dépasse pas le seuil de confort défini.

13.5 C_BAT_Confort_d'été

13.5.1 INTRODUCTION

L'objet de cette fiche est la détermination de l'indicateur de confort d'été conventionnel issu du mode de calcul **Th-D**, relatif au confort d'été. Cet indicateur est exprimé par groupe.

- **DH** (°C.h) :

L'indicateur degrés-heures (DH) permet d'évaluer l'inconfort pour les occupants, et, dans les cas des groupes climatisés, de l'inconfort potentiel des occupants si l'on retire le système de climatisation. Il s'agit de la somme de l'écart entre la température opérative du groupe et la température de confort adaptatif (température calculée heure par heure en fonction des températures des jours précédents).

Les données d'entrée restent identiques à celles d'un calcul Bbio/Cep.

Le taux d'occupation tel que défini dans la méthode de calcul RE2020 :

plus faibles durant la période de sommeil en introduisant également la notion du nombre d'adultes équivalents. En ce qui concerne les autres usages, suivant le type de bâtiments, **le taux d'occupation (nombre de personnes par m²) est déterminé conventionnellement par**

Figure 100 : Extrait de la méthode de calcul RE2020 - § 2.1.1.2

Le taux d'occupation tel qu'utilisé dans la méthode de calcul RE2020 :

4.5.2 NOMENCLATURE

Le **Tableau 7** donne la nomenclature des différentes variables du modèle de calcul.

Dans toute la suite de la fiche, on notera h le pas de temps de simulation, et j le jour de simulation correspondant.

Entrées du composant		
Nom	Description	Uni
IHJ	Heure du jour.	h
$\{\theta_{ei}(h)\}_{j-1}$	Valeurs des températures extérieures sur l'ensemble du jour précédent.	°C
Zone $i_{occ_zone}(h)$	Indicateur traduisant l'occupation au temps h : 1 : en occupation 0 : en inoccupation	Ent
$\theta_{iich}(h)$	Température de consigne de chauffage du groupe au pas de temps h .	°C

Figure 101 : Extrait de la méthode de calcul RE2020 - §4.5.2

Et le calcul des écarts de température aux critères d'inconfort été :

4.5.3.3 Calcul des écarts aux critères d'inconfort

Les écarts aux critères d'inconfort ne sont non-nuls que lorsque les conditions d'inconfort chaudes ou froides sont remplies. Ces écarts servent de base à la définition des périodes d'autorisation de chauffage et de refroidissement.

$$\Delta\theta_{op_inc_cons, ch}(h) = i_{inconf_cons, ch} \times \frac{i_{inconf_cons, ch} + 1}{2} \times |\theta_{iich}(h) - \theta_{op, moy(0;0)}(h)| \quad (60)$$

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{op_inc_cons, fr}(h) &= i_{inconf_cons, fr} \times \frac{i_{inconf_cons, fr} + 1}{2} \times |\theta_{iifr}(h) - \theta_{op, moy(0;0)}(h)| \\ \Delta\theta_{op_inc_C1, fr}(h) &= i_{inconf_C1, fr} \times \frac{i_{inconf_cons, ch} + 1}{2} \\ &\times |\theta_{op_inc_max_C1}(h) - \theta_{op, moy(0;0)}(h)| \\ \Delta\theta_{op_inc_C2, fr}(h) &= i_{inconf_C2, fr} \times \frac{i_{inconf_cons, ch} + 1}{2} \\ &\times |\theta_{op_inc_max_C2}(h) - \theta_{op, moy(0;0)}(h)| \\ \Delta\theta_{op_inc_C3, fr}(h) &= i_{inconf_C3, fr} \times \frac{i_{inconf_cons, ch} + 1}{2} \times |\theta_{op_inc_max_C3}(h) - \theta_{op, moy(0;0)}(h)| \end{aligned} \quad (61)$$

Figure 102 : Extrait de la méthode de calcul RE2020 - §4.5.3.3

Comme le calcul des indicateurs d'inconfort d'été tels que les degrés-heures et le nombre d'heures d'inconfort dépendent directement de la température ambiante opérative, soit par le calcul de l'écart de températures avec les seuils de confort prédéfinis, soit par la comparaison de cette température avec les mêmes seuils, il apparaît nécessaire de préciser ce qu'est la température opérative du groupe d'habitation si l'on s'intéresse au logement entier.

Cette température devrait être la moyenne des températures des différentes pièces constituant le logement individuel, calculée au prorata des volumes unitaires. Mais il nous apparaît préférable de

considérer la température ambiante de chaque pièce et d'effectuer le calcul des indicateurs pour chacun des volumes instrumentés afin d'éviter d'induire une dilution des pics de chaleur en calculant la moyenne pondérée.

3.5. Définition de la période d'occupation

3.5.1. Occupation - scénarios conventionnels

La réglementation énergétique RE2020 définit également les scénarios conventionnels d'occupation des bâtiments pour le calcul des indicateurs d'inconfort chaud.

RT 2012 Description des scénarios - maisons individuelles

ZONE

nom de la zone	maison individuelle		voir typologie
températures de consigne	ch	fr	
normal	19	26	
arrêt moins de 48 h	16	30	
arrêt plus de 48 h	16	30	

occupation

scenario horaire occupation = 1 : inoccupation = 0

jour V / heure >	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

vacances > 1 : tableau ci dessus ; inoccupation = 0

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
5			1		1			1			1	

Ce calendrier est basé sur une année commençant un Lundi

Figure 103 : Extrait des scénarios d'usage conventionnels définis dans le projet de réglementation RE2020
<http://www.batiment-energiecarbone.fr/projet-de-documents-methode-pour-la-reglementation-a126.html>

Ce tableau définit l'indice réglementaire du taux d'occupation d'un logement individuel. Il est défini pour l'ensemble du logement, et est identique quelle que soit la pièce considérée.

3.5.2. Occupation séparée en zone jour et zone nuit

Les périodes Jour-Nuit sont délimitées par les horaires suivants :

```
debNuit = 22 # TODO: choose the hour when the night begins (used in function LimiteConfmin and s
finNuit = 6 # TODO: choose the hour at which the night ends (used in function LimiteConfmin and
```

Nous proposons de distribuer l'indice du taux d'occupation du logement en zones jour et zones nuit.

Zone nuit						Zone jour																		Nuit	
occupation	scenario horaire occupation = 1 : inoccupation = 0																								
jour V / heure >	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Figure 104 : répartition des zones nuit et jour sur le calendrier des scénarii d'usage RE2020

Afin de construire un scénario d'occupation différencié Jour-Nuit, le CEA propose de conserver les indices d'occupation du scénario conventionnel mais uniquement durant la période de temps Jour ou Nuit définie ci-dessus, affectée à la zone correspondant à l'usage principal de la pièce considérée.

L'indice du taux d'occupation $i_{occup,nuit} = 1$ en zone nuit est affecté aux chambres constituant la zone nuit du logement tandis que l'indice du taux d'occupation de la zone jour est nul $i_{occup,jour} = 0$.

De même, un indice du taux d'occupation $i_{occup,jour} = 1$ en zone jour est affecté aux pièces de vie (séjour/salon/cuisine...) alors que les chambres sont considérées inoccupées $i_{occup,nuit} = 0$.

		scénario d'occupation horaire jour : occupation=1 ; inoccupation=0																							
jour / heure>		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1		0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
2		0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
3		0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
4		0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
5		0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
6		0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
7		0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

		scénario d'occupation horaire nuit : occupation=1 ; inoccupation=0																							
jour / heure>		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1		1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2		1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3		1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4		1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5		1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
6		1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
7		1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

		vacances : occupation =1 (cf. tableau dessus) ; inoccupation=0											
semaine / mois>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
5			1		1		1		1		1		1

Tableau 6 : Scénarii des indices de taux d'occupation pour la zone nuit et la zone jour

Comme pour le calcul réglementaire, les indicateurs de confort d'été sont évalués pour chacune des pièces du logement, affectées à l'indice de taux d'occupation en zone nuit ou en zone jour.

Le scénario d'occupation Jour-Nuit permet d'estimer l'inconfort d'été en additionnant les degrés-heures des zones Jour et Nuit en choisissant les pièces les plus représentatives par exemple une chambre et un séjour, salon ou une cuisine. Cette approche du calcul des indicateurs d'inconfort chaud différenciée en zone Jour et zone Nuit apporte une solution au traitement des indicateurs calculés pour chaque pièce instrumentée dans le logement. Il suffirait d'attribuer les créneaux horaires à l'occupation probable de chacune des pièces de façon à reconstruire un indicateur global pour l'ensemble du logement. Chaque pièce verrait ainsi ses degrés-heures calculés en fonction de sa température opérative par rapport à la température d'inconfort chaud et des créneaux horaires durant lesquels la pièce considérée est susceptible d'être occupée.

3.5.3. Occupation des bâtiments tertiaires

Le même travail a été effectué avec les bâtiments tertiaires, bureaux à HELIOS et maison Pierre2. Le scénario d'occupation appliqué par le CEA au calcul des indicateurs d'inconfort chaud pour les bâtiments tertiaires ne diffère des scénarii d'occupation conventionnels que sur la première heure d'occupation de la journée : 08H au lieu de 09H00 et par le fait que nous considérons deux périodes de fermeture réparties en août et en décembre, synonymes d'inoccupation des locaux.

		scénario d'occupation horaire - usage tertiaire : occupation=1 ; inoccupation=0																							
jour / heure>		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
2		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
3		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
4		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
5		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
6		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

		vacances : occupation =1 (cf. tableau dessus) ; inoccupation=0											
semaine / mois>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3		1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
4		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
5			1		1		1		1		1		1

Tableau 7 : Scénario d'occupation pour un bâtiment tertiaire – horaires de bureaux habituels

3.5.4. Et si on construisait l'occupation ?

Le calcul des indicateurs d'inconfort d'été s'appuie cette fois-ci sur des scénarios d'occupation reconstruits à partir des mesures du taux de CO₂ ambiant. L'objectif était d'acquérir une meilleure connaissance de l'occupation réelle du bâtiment afin d'améliorer l'évaluation du confort d'été ressenti par ses occupants en situation de présence.

Au travers du brevet déposé en le 27/04/2017 (réf. EP 3 239 791 B1 [1]), Jean-Michel DAIGNAN et Arnaud JAY avaient déjà théorisé la reconstruction de l'occupation à partir de mesures CO₂.

Une première reconstruction de l'occupation dérivée de ce brevet a été tentée sur les logements et les bureaux étudiés à partir des données COMEPOS. L'identification des périodes où le volume est considéré comme laissé vacant par les occupants, a été déterminée par les deux conditions simultanées suivantes :

- Détection d'une évolution des mesures de CO₂ suivant une courbe monotone décroissante sur une séquence temporelle suffisamment longue définie par le paramètre « inoccup_hours » et avec une amplitude suffisamment importante « seuilCO2_inocc ».
- La mesure du taux de CO₂ à la fin de la séquence temporelle décroissante est inférieure à un seuil bas « seuilCO2haut » défini par rapport au taux de CO₂ extérieur (bruit de fond ambiant). Ce seuil bas a été déterminé par le CEA en fonction de la répartition des mesures de CO₂ dans le temps (gaussienne), en testant différents quantiles. Ainsi, cette méthode originale permet d'adapter les calculs pour la reconstruction de l'occupation en tenant compte de la qualité d'air extérieur spécifique à chaque site.

Toutefois, les premiers résultats n'étant pas jugés satisfaisants, il nous a fallu croiser les détections des occupation / inoccupation avec une seconde méthode originale.

Comme pour le calcul des degrés-heures d'inconfort chaud, l'absence de données CO₂ en nombre suffisant est susceptible de générer des erreurs grossières et surtout de rendre impossible la reconstruction de l'occupation réelle. Le CEA a alors défini la quantité minimale de données disponibles en CO₂ sur la période étudiée pour chacune des pièces instrumentées dans le bâtiment étudié, afin de reconstruire de façon plus réaliste son occupation. Nous avons fixé le taux minimum de disponibilité des mesures CO₂ à 70 % sur la période considérée.

```
seuilCO2bas = dict()
seuilCO2haut = dict()

for an, annee in enumerate(df_CO2full.index.year.unique()):
    seuilCO2bas.update({annee: df_CO2full[df_CO2full.index.year==annee].quantile(0.45)}) # TODO: choose the quantil
    seuilCO2haut.update({annee: df_CO2full[df_CO2full.index.year==annee].quantile(0.5)}) # TODO: choose the quantil

seuildiffCO2_inocc = 130 #100 # TODO: fill in the minimal CO2 differential to detect the inoccupancy
seuildiffCO2_occ = 130 #100 # TODO: fill in the minimal CO2 differential to detect the occupancy
inoccup_hours = 3 #5 # TODO: choose the number of hours from which the inoccupancy is detected
occup_hours = 3 #5 # TODO: choose the number of hours from which the occupancy is detected
```

La méthodologie développée intègre également une détection du retour à l'occupation pour les différentes pièces et bâtiments instrumentés. En particulier, cela a nécessité l'adjonction de paramètres spécifiques et d'hystérésis pour les différents seuils de détection utilisés : « occup_hours », « seuilCO2bas » et « seuildiffCO2_occ ».

```
for nb in range(len(dfCO2)):
    # if nb == 15407: print(nb, i_occup_0.index[nb])

    #Inoccupation détectée#
    if i_occup_0.notna()[nb] and dfCO2[capt].iloc[nb]<seuilCO2haut[i_occup_0.index[nb].year][capt] and\
        np.abs(dfCO2[capt].iloc[nb-df_0[nb]+1]-dfCO2[capt].iloc[nb])>=seuildiffCO2_inocc:
        i_occup_0[nb-df_0[nb]+1:nb+1] = 0

    # Occupation détectée#
    if i_occup_1.notna()[nb] and dfCO2[capt].iloc[nb]>seuilCO2bas[i_occup_1.index[nb].year][capt] and\
        np.abs(dfCO2[capt].iloc[nb-df_1[nb]+1]-dfCO2[capt].iloc[nb])>=seuildiffCO2_occ:
        i_occup_1[nb-df_1[nb]+1:nb+1] = 1
```

L'association des vecteurs détection inoccupation « i_occup_0 » et détection occupation « i_occup_1 » pour chaque pièce a permis d'obtenir un vecteur temporel de présence « i_occup ».

```
i_occup = i_occup_0.fillna(i_occup_1)
```

Enfin, une compilation des résultats d'occupation a pu être testée à l'échelle du bâtiment. Le CEA a effectué la synthèse de l'occupation des différentes pièces jugées représentatives : Chambres / Cuisine / Séjour / Salon / Salles de Bains.

```
df_y_1H, df_C02occup, df_C02jour = OccDuo_C02_reconst(df_y_1H, df_C02full,\
    seuilC02bas, seuilC02haut, seuilDiffC02_inocc, seuilDiffC02_occ,\
    inoccup_hours, occup_hours)
```

```
Is_occup_C02 = df_C02occup[df_C02occup.columns[df_C02occup.columns.str.contains('_full_occup')]]
Is_occup_C02[zone_occup[0]] = np.nan

room_occup = 'CH|CU|SEJ|SAL|SDB' # 'CH|CU|SAL|SDB' #TODO: choose the rooms that should be counted to rebuild

for an, annee in enumerate(Is_occup_C02.index.year.unique()):
    if l_colC02y[io][an].notnull().any():
        if l_colC02y[io][an].shape[0]==1:
            Is_occup_C02[zone_occup[0]].loc[Is_occup_C02.index.year==annee] = \
            Is_occup_C02[Is_occup_C02.columns[Is_occup_C02.columns.isin(l_colC02y[io][an]+'_full_occup')]]\
            .loc[Is_occup_C02.index.year==annee].any(axis=1, skipna=True).astype(int)

            Is_occup_C02[zone_occup[0]][Is_occup_C02[Is_occup_C02.columns[list(\
                Is_occup_C02.columns.isin(l_colC02y[io][an]+'_full_occup'))]].isna().all(axis=1)] = np.nan

        else:
            Is_occup_C02[zone_occup[0]].loc[Is_occup_C02.index.year==annee] = \
            Is_occup_C02[Is_occup_C02.columns[(Is_occup_C02.columns.str.contains(room_occup))\
            & (Is_occup_C02.columns.isin(l_colC02y[io][an]+'_full_occup'))]]\
            .loc[Is_occup_C02.index.year==annee].any(axis=1, skipna=True).astype(int)

            Is_occup_C02[zone_occup[0]][Is_occup_C02[Is_occup_C02.columns[list(\
                Is_occup_C02.columns.str.contains(room_occup))]].isna().all(axis=1)] = np.nan
```

Généralement, nous ne disposons que d'une seule sinon de deux mesures du taux de CO₂ ambiant à l'intérieur de chaque logement. L'une des maisons COMEPOS fait exception à cette règle car elle est équipée d'autant de capteurs de CO₂ que de mesures de température. Pour chaque maison ou bâtiment, les mesures ont été réparties pour couvrir la zone nuit et la zone jour.

Lorsqu'il n'existe qu'un seul volume dont les mesures en CO₂ sont exploitables, c'est celui-ci qui est utilisé pour reconstruire l'occupation du logement mais la qualité du scénario d'occupation s'en trouve très altérée.

C'est le cas de la maison MAS_PROVENCE pour laquelle les seules données CO₂ ayant permis de reconstruire une occupation sont celles du séjour, ce qui explique pourquoi autant de séquences d'inoccupation sont détectées en périodes nocturnes.

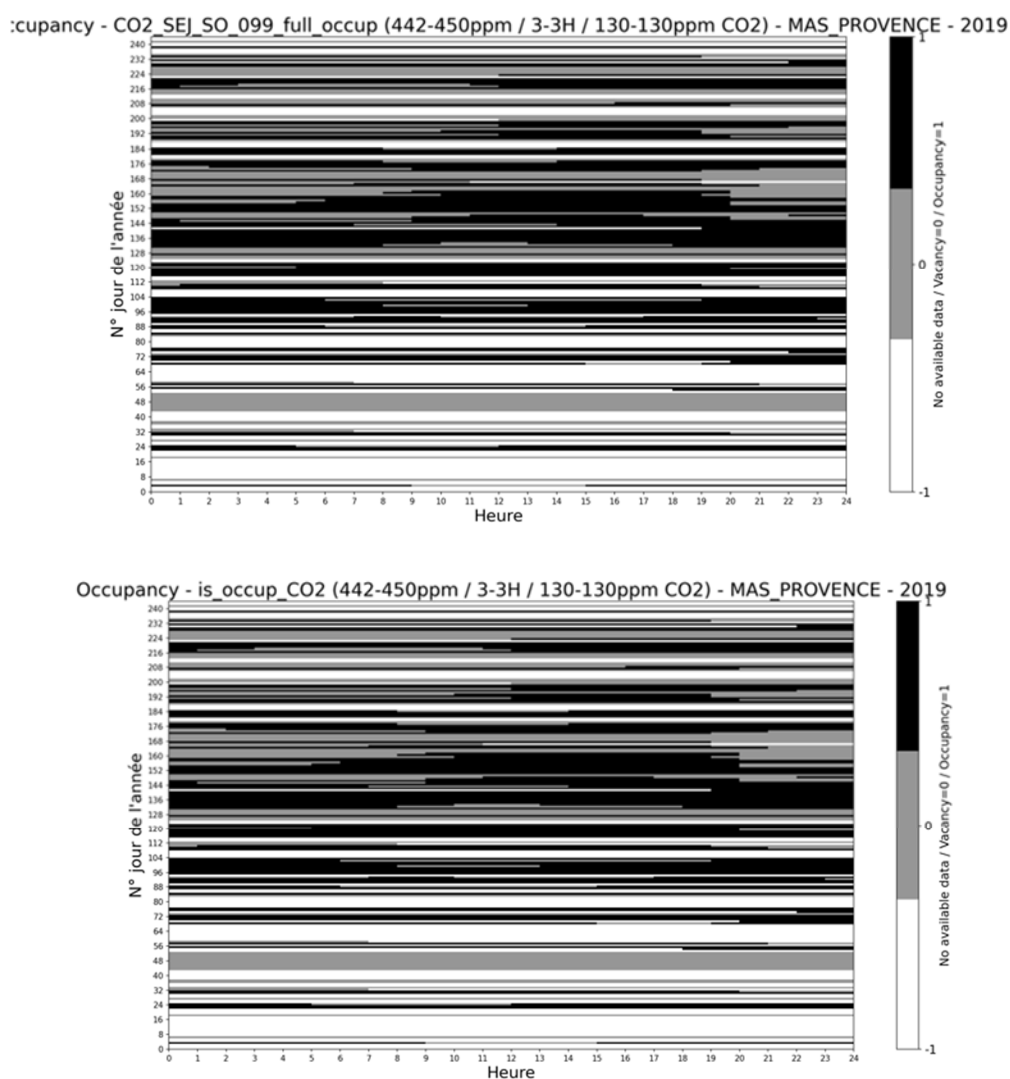


Figure 105 : Scénario d'occupation reconstruit pour la maison MAS_PROVENCE – 2019

Les abaques d'occupation obtenus font ressortir les périodes de vacances du logement cohérentes. Lorsque la quantité de données est satisfaisante, les périodes de villégiatures ressortent clairement et les scénarii d'occupation reconstruits paraissent probants.

Les maisons Tradimaisons1, TRECOBAT2, Pierre2, Pierre5 et le bureau HELIOS_B3105 n'ont pas pu faire l'objet d'un calcul de degrés-heures avec un scénario d'occupation reconstruite en l'absence de données suffisantes sur les périodes étudiées.

Un calcul des indicateurs d'inconfort d'été a pu être réalisé séparément pour chacune des pièces instrumentées en capteur CO₂ lorsque les données enregistrées sont suffisantes avec un scénario d'occupation reconstruit dans les logements Hanau1, IGC2, MAS_PROVENCE, Pierre1.

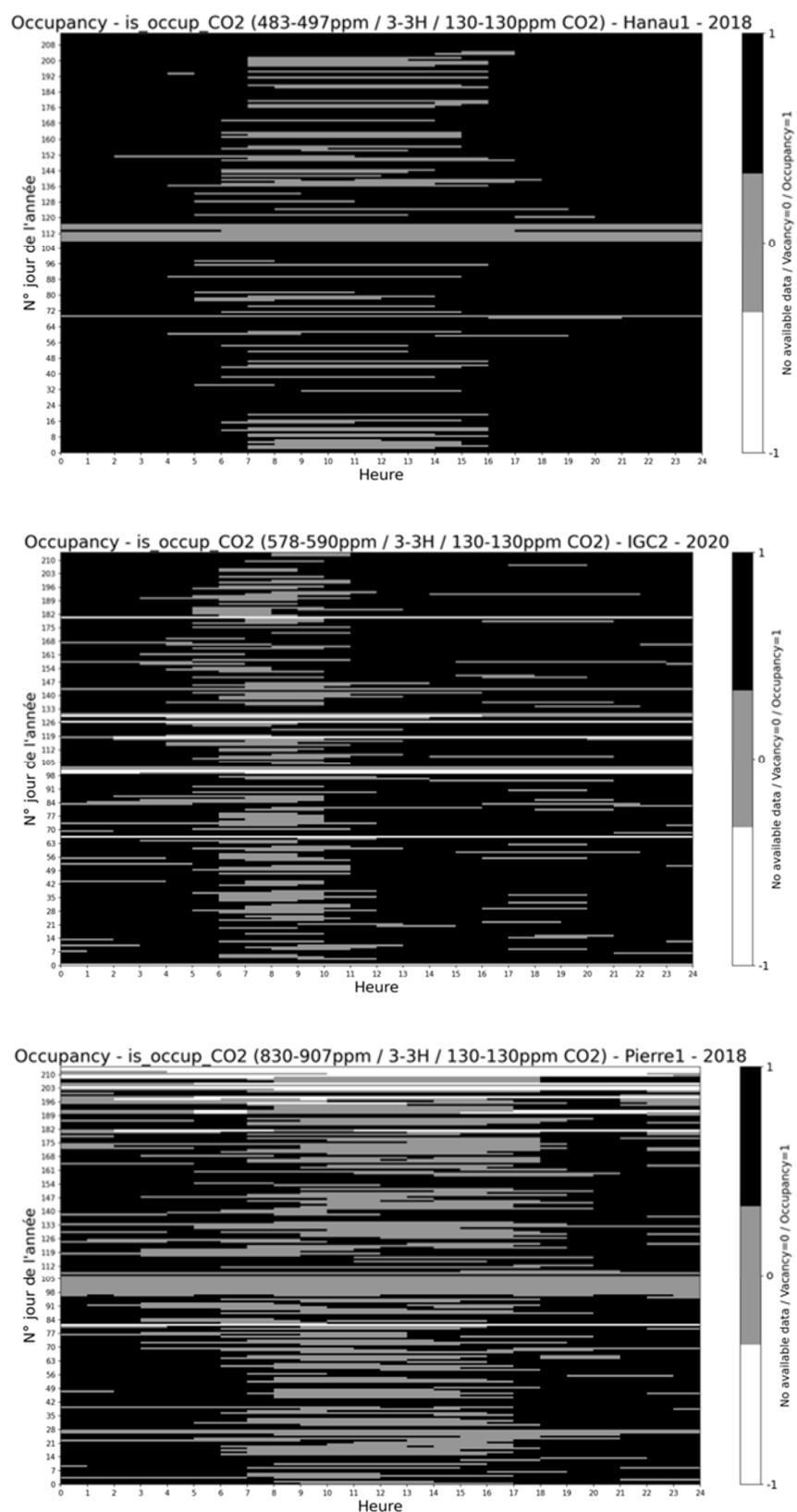


Figure 106 : Scénarii d'occupation reconstruits - Hanau1 2018 (en h.) - IGC2 2020 (au m.) - Pierre1 2018 (en b.)

3.6. Résultats et analyses

Des calculs ont été effectués sur les trois modes d'usage/occupation.

```
if maison.find('Helios')==1 and maison.find('Pierre2')==1:
    typo = 'habitat'
else:
    typo = 'tertiaire'

# TODO: choix du modèle d'occupation
# Occup_CO2 = reconstruction / Standard = normatif / tableau... = 2 zones / Tertiaire = work
# onglet = ['Occup_CO2', 'Standard', 'tabJourNuit', 'Tertiaire']
onglet = input('Which is the occupancy model?\n')
if onglet != 'tabJourNuit':
    onglet = [onglet]
else:
    onglet = ['tableau Jour', 'tableau Nuit']

if typo == 'habitat':

    if onglet==['Standard'] or onglet=='Standard':
        Modele_occup = 'std'
        folder = 'Std_Occup'
        zone_occup = ['is_occup_st']
    elif onglet==['tableau Jour', 'tableau Nuit']:
        Modele_occup = 'jr_nt'
        folder = 'Jr_Nt_Occup'
        zone_occup = ['is_occup_jr', 'is_occup_nt']
    elif onglet==['Occup_CO2']:
        Modele_occup = 'CO2'
        folder = 'CO2_Occup'
        zone_occup = ['is_occup_CO2']
    else:
        sys.exit('occupancy model error')
```

Ces calculs ont permis de déclarer si les bâtiments et maisons étudiées étaient réglementaires en ce qui concerne le confort d'été, au sens de l'arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine (cf. méthode de calcul Th-D 2020).

L'indicateur degrés-heures DH est défini dans la méthode de calcul Th-D 2020. Il ne s'applique qu'aux bâtiments et/ou locaux non climatisés.

L'indicateur degrés-heures (DH) permet d'évaluer, pour les groupes non climatisés, l'inconfort pour les occupants (température opérative du groupe située au-dessus de la température de confort adaptatif).

1.2 Architecture des fiches algorithmes

La valeur de DH doit rester inférieure à un seuil haut DH_maxcat qui dépend de la catégorie de contraintes extérieures du logement (ou de la zone thermiquement homogène) définie par le décret 2021-1004 du 29 juillet 2021.

Partie II

Définition des catégories de contraintes extérieures

La catégorie de contraintes extérieures d'une partie de bâtiment thermiquement homogène et d'une zone est définie par la catégorie de contraintes extérieures des locaux qui la constitue.

Une partie de bâtiment thermiquement homogène ou une zone est de catégorie 2 si tous les locaux autres qu'à occupation passagère qu'elle contient sont de catégorie 2. Elle est de catégorie 1 dans les autres cas.

Un local est de catégorie 2 s'il est muni d'un système de climatisation et si, simultanément, le local est situé dans une zone à usage d'habitation, ses baies sont exposées au bruit BR2 ou BR3, et le bâtiment est construit en zone climatique H2d ou H3 à une altitude inférieure à 400 m.

Un local est de catégorie 1 dans les autres cas.

Le Décret no 2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine fixe les valeurs limites en degrés-heures.

IV. – La valeur maximale DH_max de chaque partie de bâtiment thermiquement homogène est déterminée comme suit :

$DH_{max} = DH_{maxcat}$

Avec :

DH_maxcat : valeur de l'exigence DH_max définie par catégories de contraintes extérieures

Les valeurs de DH_maxcat sont définies au chapitre III de la présente annexe.

Figure 107 : Extrait du décret n°2021-1004 du 29/07/2021 relatif aux exigences de performance énergétique... – Chap II §IV

IV. – Valeurs de DH_maxcat

1. Maisons individuelles ou accolées

La valeur DHmaxcat prend les valeurs suivantes, en fonction de la catégorie de contraintes extérieures de la partie de bâtiment (les catégories de contraintes sont définies au chapitre V) :

	Catégorie 1	Catégorie 2
DH_maxcat	1250	1850

2. Logements collectifs

La valeur DHmaxcat prend les valeurs suivantes, en fonction de la catégorie de contraintes extérieures, de la zone climatique et du caractère climatisé ou non, et de la surface moyenne des logements de la partie de bâtiment (les zones climatiques sont définies au chapitre IV et les catégories de contraintes sont définies au chapitre V) :

DH_maxcat	Catégorie 1, sauf parties de bâtiments climatisées en zones H2d et H3	Catégorie 1 climatisé, en zone H2d et H3	Catégorie 2
$S_{moy_{log}} \leq 20 \text{ m}^2$	1250	1600	2600
$20 \text{ m}^2 < S_{moy_{log}} \leq 60 \text{ m}^2$	1250	$1700 - 5 * S_{moy_{log}}$	$2850 - 12,5 * S_{moy_{log}}$
$S_{moy_{log}} > 60 \text{ m}^2$	1250	1400	2100

Figure 108 : Extrait décret N°2021-1004 du 29/07/2021 relatif aux exigences de performance énergétique... - Chap. III § IV

La Figure 108 précise les valeurs de seuil_haut en degrés-heures DH-RE2020 pour les différentes maisons et bâtiments en fonction de leur catégorie de contraintes extérieures. Comme le stipule l'arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R-172-6 du code de la construction et de l'habitation, il s'agit du seuil qui détermine si le bâtiment est ou n'est pas réglementaire.

13.3.1 INTRODUCTION

Ce document a pour but de décrire les modalités de prise en compte d'un forfait de consommation de refroidissement en cas d'inconfort d'été ponctuel dans le calcul énergie.

Rappel du contexte :

Il est mis en place deux seuils d'inconfort, basés sur un indicateur Degrés-Heures (ou DH en °C.h) calculé au niveau groupe, avec les règles suivantes :

- DH > Seuil haut : bâtiment non-règlementaire, inconfort excessif,
- DH < Seuil bas : bâtiment jugé suffisamment confortable,
- Seuil bas < DH < Seuil haut : le critère confort est respecté, mais de l'inconfort ponctuel peut apparaître. Le calcul des consommations Th-C est fait en introduisant un forfait de consommation de refroidissement en conséquence. Ce forfait de consommation de refroidissement est calculé conventionnellement sur la base du nombre de degrés-heures d'inconfort du groupe. Il est ensuite ajouté aux consommation de refroidissement et d'électricité du groupe, de la zone correspondante et du bâtiment correspondant.

Figure 109 : Extrait de la méthode de calcul Th-D 2020 – § 13.3.1

Nous avons vu que le seuil_haut de l'indicateur d'inconfort chaud DH-RE2020 est fixé par le décret N°2021-1004 du 29/07/2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale pour la construction de bâtiments en France métropolitaine – Chap. III § IV (cf. Figure 108 : Extrait décret N°2021-1004 du 29/07/2021 relatif aux exigences de performance énergétique... - Chap. III § IV

).

La valeur de seuil_bas du DH-RE2020 est fixée par l'arrêté du 4 août 2021 de la même application, au §13.3.2, pour déterminer les éventuels besoins en refroidissement complémentaire du bâtiment.

Constantes			
Nom	Description	Unité	Conv.
Seuil bas	Seuil bas de degrés-heures d'inconfort	°C.h	350

Figure 110 : Extrait de la méthode de calcul Th-D 2020 – §13.3.2

L'ensemble des résultats est présenté sous forme de tableaux chiffrés, d'histogrammes et de nuages de points représentant l'étalement des températures par mois et par année. Ces résultats sont joints en annexes du présent livrable sous un format numérique (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Une synthèse est proposée au paragraphe suivant (cf. §3.6.1).

3.6.1. Principaux résultats de degrés-heures

Les trois tableaux suivants (Tableau 8 à Tableau 10) indiquent respectivement les indicateurs degrés-heures calculés pour les différents bâtiments étudiés sur les années 2018, 2019 et 2020. Les calculs ayant été menés sur l'ensemble des locaux instrumentés pour chaque logement ou bureau, nous précisons systématiquement qu'elle est la pièce représentative pour laquelle les valeurs sont affichées et son orientation.

C'est à partir de ces résultats numériques et indépendamment des retours sur le ressenti des occupants, que nous nous formulons un premier avis sur le caractère réglementaire ou non des bâtiments. Tous les indicateurs sont des degrés-heures exprimés en °C.h.

2018	DH_RE2020		DH +1,2°C		DH +1,8°C		DH +2,2°C
Cat. d'ambiance	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1
HELIOS_B3033 (E)	419,2	245,8	117	53,3	43,7	-	-
HELIOS_B3071 (AT)	272,9	-	-	-	-	-	-
HELIOS_B3072 (S)	503,9	-	147,7	-	-	-	-
HELIOS_B3105 (O)	876,6	606,9	-	265	248,4	-	-
Hanau (SAL_NO)	140,3	69,7	17,9	1,2	-	-	-
IGC2 (SEJ_E)	93,6	-	8,5	-	1,5	-	-
MAS_PROVENCE (SEJ_SO)	4941,5	4069,1	2989,3	2403,4	2257,6	1817,4	1867,2
Pierre1 (SEJ_S)	761,1	-	281,9	-	152,4	-	-
Pierre2 (SEJ_S)	331,5	212,8	132,7	86,4	82	-	-
Pierre5 (CU_SE)	2412,6	1822,4	1221,4	-	811,8	540	590,1
Tradimaisons1 (SAL_S_2)	428,3	-	160,4	-	87,9	-	-

Tableau 8 : Degrés-Heures DH par bâtiment en fonction de la cat. d'amb. C1/C2, syst. rafraîchiss. 1,2/1,8/2,2°C – 2018

2019	DH_RE2020		DH +1,2°C		DH +1,8°C		DH +2,2°C
Cat. d'ambiance	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1
HELIOS_B3033 (E)	601,9	436,3	290	211,7	199	-	-
HELIOS_B3071 (AT)	389,9	-	-	-	-	-	-
HELIOS_B3072 (S)	589,5	-	262	-	-	-	-
HELIOS_B3105 (O)	455,1	328,5	-	143,2	133	-	-
Hanau (SAL_NO)	-	-	-	-	-	-	-
IGC2 (SEJ_E)	74,5	-	1,8	-	0,1	-	-
MAS_PROVENCE (SEJ_SO)	4456,3	3620,1	2685,6	2102,5	2007,8	1530,5	1623,6
Pierre1 (SEJ_S)	653,8	-	279,7	-	181,2	-	-
Pierre2 (SEJ_S)	-	-	-	-	-	-	-
Pierre5 (CU_SE)	2286,9	1648,5	1124,2	-	758,5	502,2	562,2
Tradimaisons1 (SAL_S_2)	670,2	-	233,8	-	125,5	-	-

Tableau 9 : Degrés-Heures DH par bâtiment en fonction de la cat. d'amb. C1/C2, syst. rafraîchiss. 1,2/1,8/2,2°C – 2019

DH_RE2020 < 350°C.h : Bâtiment réglementaire d'un point de vue confort d'été (Th-D / arrêté du 4 août 2021)

350°C.h ≤ DH_RE2020 < 600°C.h : Bâtiment quasi réglementaire qui nécessite peu d'adaptation pour devenir confortable

600°C.h $\leq$ DH_RE2020 < 1250°C.h : Bâtiment nécessitant un système de rafraîchissement actif pour réduire l'inconfort d'été

DH_RE2020 $\geq$ 1250°C.h (cf. Figure 48): Bâtiment non réglementaire au sens de l'arrêté du 4 août 2021 (méthode Th-D)

2020	DH_RE2020		DH +1,2°C		DH +1,8°C		DH +2,2°C
Cat. d'ambiance	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1
HELIOS_B3033 (E)	-	-	-	-	-	-	-
HELIOS_B3071 (AT)	-	-	-	-	-	-	-
HELIOS_B3072 (S)	-	-	-	-	-	-	-
HELIOS_B3105 (O)	-	-	-	-	-	-	-
Hanau (SAL_NO)	72,5	32,5	7,8	1,6	-	-	-
IGC2 (SEJ_E)	165,4		53,4		26,8		-
MAS_PROVENCE (SEJ_SO)	-	-	-	-	-	-	-
Pierre1 (SEJ_S)	508,4	-	186	-	107,4	-	-
Pierre2 (SEJ_S)	359,6	275,2	206,3	151,8	148,7	-	-
Pierre5 (CU_SE)	2682	1918,6	1274,9	-	846,2	582,7	636,1
Tradimaisons1 (SAL_S_2)	267,6	-	45,7	-	13,1	-	-

Tableau 10 : Degrés-Heures DH par bâtiment en fonction de la cat. d'amb. C1/C2, syst. rafraîchiss. 1,2/1,8/2,2°C – 2020

Il résulte de ces calculs que seules les maisons Hanau1 et IGC2 peuvent être considérées comme confortables au sens du calcul Th-D, sous les derniers étés chauds enregistrés quelle que soit la région étudiée. Toutefois, le cas IGC2 utilise un système de climatisation complémentaire par compression.

3.6.2. Position ou précision des capteurs

Les résultats obtenus sur la maison Tradimaisons1 montrent l'importance de la position et de la précision des capteurs de température. Cette maison est équipée de deux capteurs dans une même pièce, le salon. Les résultats sont sensiblement différents d'un capteur à l'autre, ce qui tend à complexifier encore le choix du capteur représentatif de l'inconfort pour une même zone ou même logement.

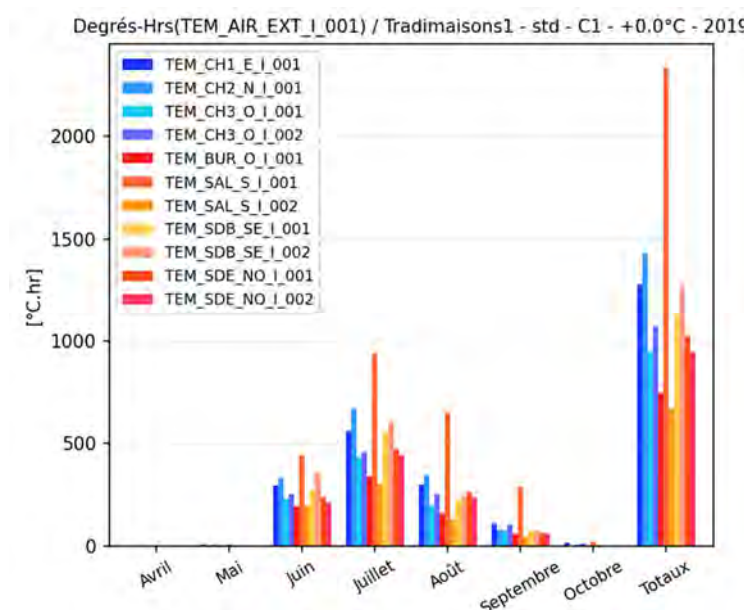


Figure 111 : Différence en fonction du capteur TEM_SAL_S_I_001 ou 002 – Tradimaisons1 – 2018

Ce que montre la Figure 111, c'est que le capteur TEM_SAL_S_I_001 est probablement situé près d'une surface vitrée exposée au Sud et vraisemblablement dans la tâche solaire à certaines heures de la journée. Le calcul de l'indicateur d'inconfort d'été avec ce capteur n'est donc pas significatif du ressenti des occupants. Le capteur TEM_SAL_S_I_001 peut donc être écarté de l'évaluation pour ce logement.

3.6.3. Ce que le jour doit à la nuit

Le calcul des indicateurs d'inconfort chaud suivant les scénarii différenciés Jour-Nuit apporte une information supplémentaire. Il devient possible de détecter sur quelle période de la journée, diurne ou nocturne, les degrés-heures et les nombres d'heures d'inconfort s'accumulent.

Ceci a pu être observé en particulier, sur les résultats des maisons Hanau1, Pierre1, Pierre5, Tradimaisons1. Par exemple, sur la maison Pierre5, on relève que l'indicateur d'inconfort d'été degrés-heures DH-RE2020 calculé sur les années 2019 et 2020 est plus que divisé par deux lorsqu'il est calculé avec les scénarii d'occupation Jour-Nuit par rapport au scénario d'usage conventionnel.

Cette approche nous paraît intéressante parce que les différentes pièces sont associées à un indicateur calculé en fonction de leur usage principal. L'évaluation de l'inconfort d'été s'en trouverait donc améliorée.

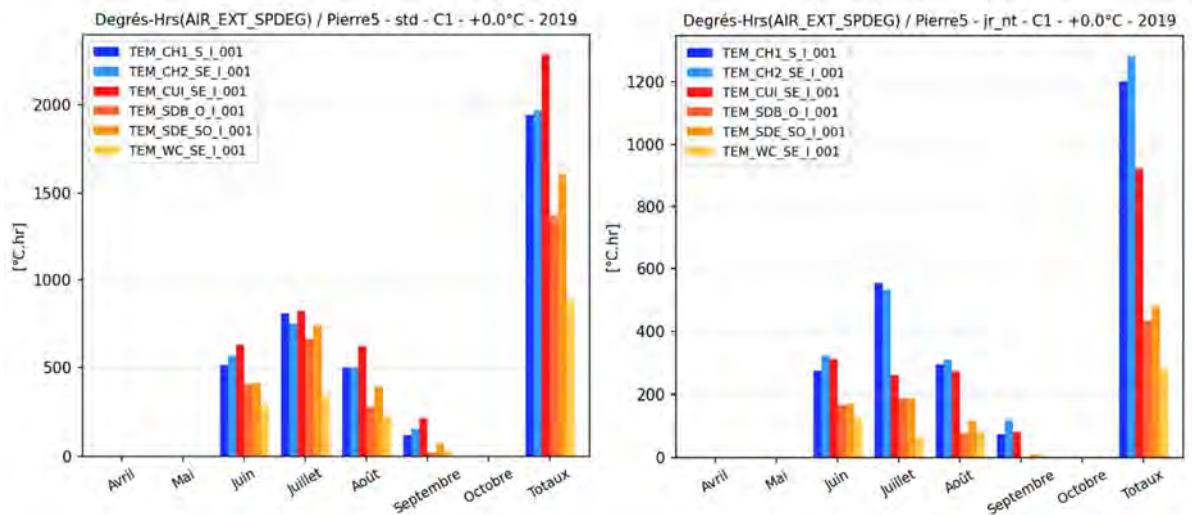


Figure 112 : Comparaison DH_RE2020 scénarii d'occupation conventionnel VS Jour-Nuit – Pierre5 – 2019

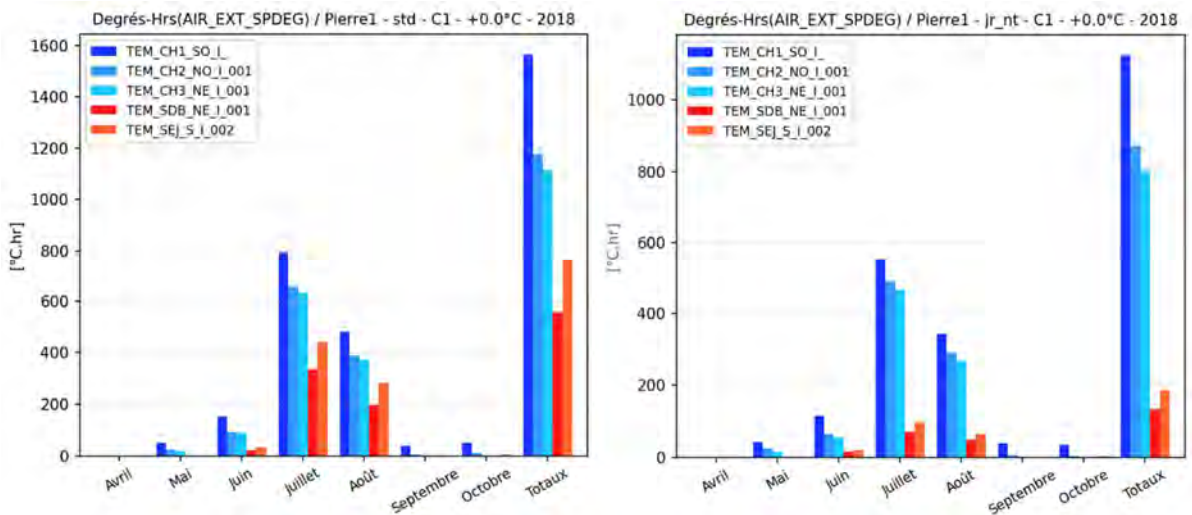


Figure 113: Comparaison DH_RE2020 scénarii d'occupation conventionnel VS Jour-Nuit – Pierre1 – 2018

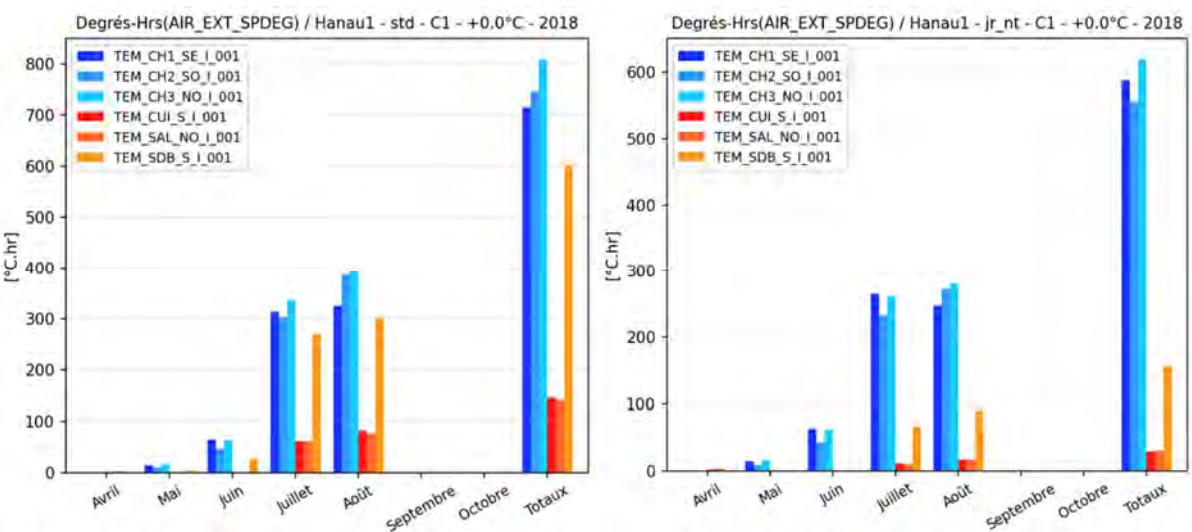


Figure 114 : Comparaison DH_RE2020 scénarii d'occupation conventionnel VS Jour-Nuit – Hanau1 – 2018

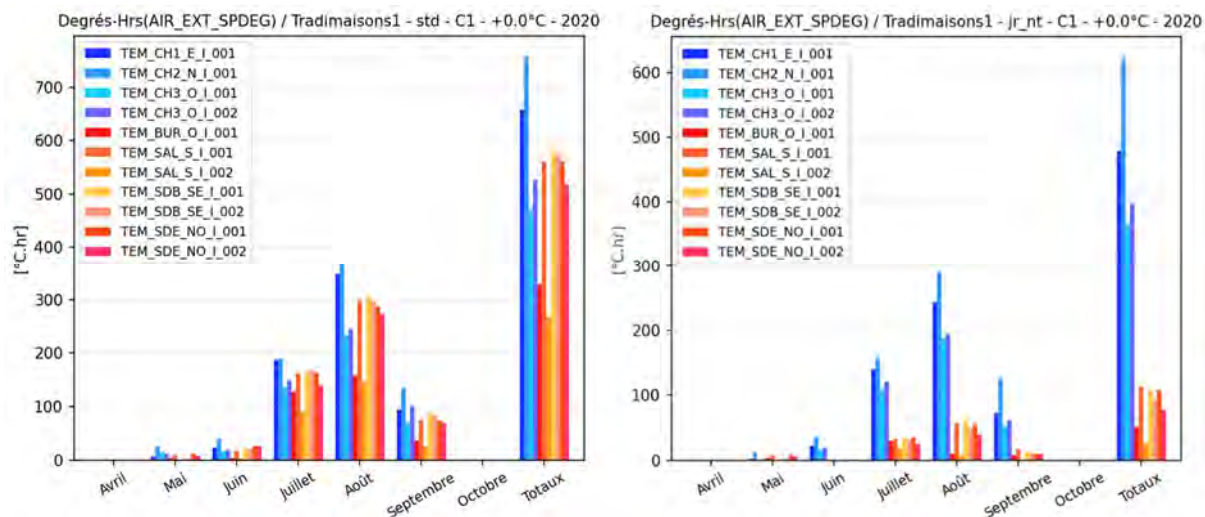


Figure 115 : Comparaison DH_RE2020 scénarii d'occupation conventionnel VS Jour-Nuit – Tradimaisons1 – 2020

Ces dernières comparaisons sur les histogrammes des Figure 114 et Figure 115 montrent que le problème d'inconfort thermique est surtout présent en période nocturne.

Une ventilation traversante pourrait résoudre au moins en partie le problème de surchauffe estivale et améliorer significativement le confort nocturne des occupants.

On notera sur la Figure 114, que la seule pièce souffrant d'un inconfort chaud anormal est la Salle De Bain, ce que l'on peut interpréter comme un besoin des occupants dans cette pièce à usage spécifique.

3.6.4. Il faut sauver la maison MAS_PROVENCE

La maison MAS_PROVENCE souffre de températures intérieures particulièrement hautes, jusqu'à 35°C dans le séjour et certaines chambres, sur l'ensemble des mois d'étés 2018 et 2019. Les données sont manquantes pour l'année 2020.

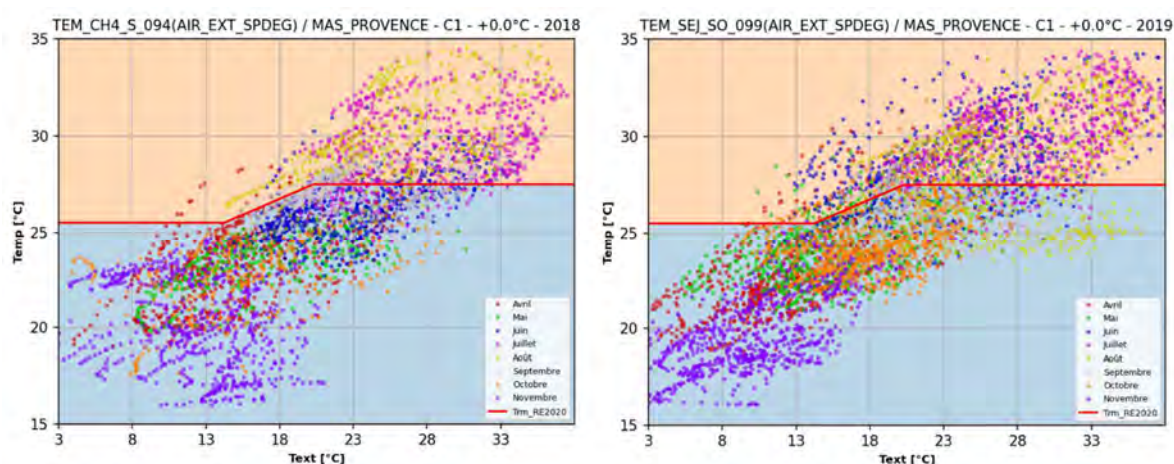


Figure 116 : T°C int. air sec mesurées dans une chambre en 2018 (à g.) et le séjour en 2019 (à dr.) – MAS_PROVENCE

Les degrés-heures DH calculés sont à l'image des dépassements de températures et atteignent des niveaux extrêmement élevés (4941°C.h en 2018 et 4456°C.h en 2019) qui rendent cette maison non réglementaire au sens de la RE2020.

Les données sont malheureusement insuffisantes en 2018 pour la chambre CH4 et en 2019 pour les chambres CH1 à CH3.

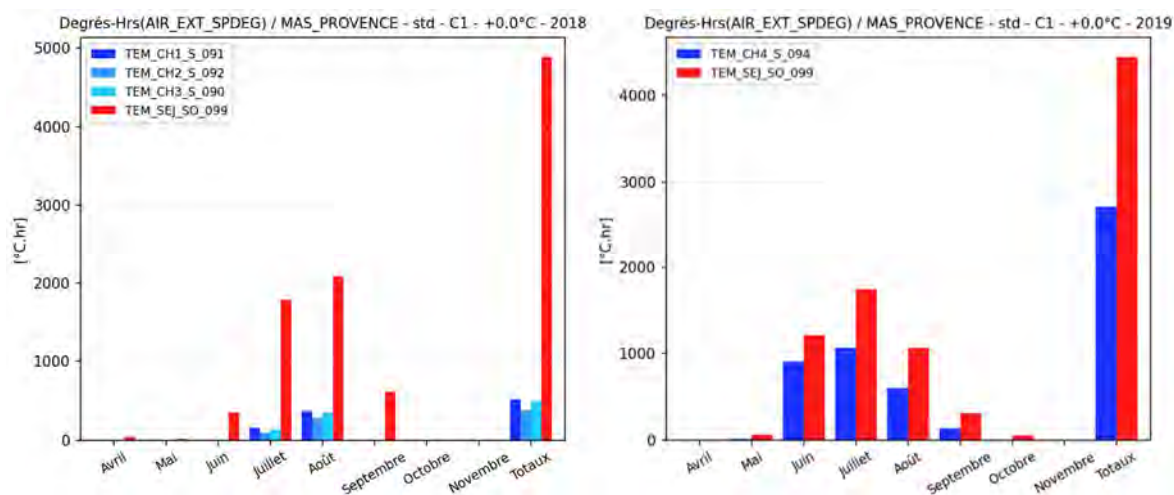


Figure 117 : Degrés-Heures calculés réglementaires RE2020 – maison MAS_PROVENCE – 2018 et 2019

A noter cependant, qu'il est possible que l'occupation des pièces telles que les chambres, influence fortement les températures intérieures par la tenue ou l'absence d'une gestion rationnelle des ouvrants et des protections solaires. Cela semble le cas dans la chambre CH3 entre les années 2018 (occupée) et 2019 (inoccupée). Sachant que l'été 2018 est aussi chaud que celui de 2019 dans le Sud de la France.

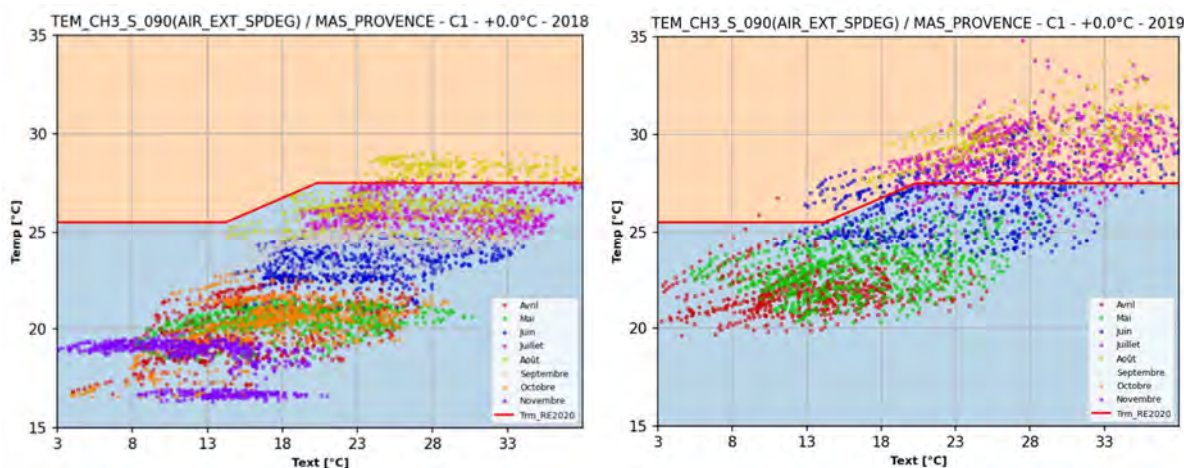


Figure 118 : Températures intérieures mesurées dans la chambre CH3 – maison MAS_PROVENCE – 2018 (à g.) et 2019 (à dr.)

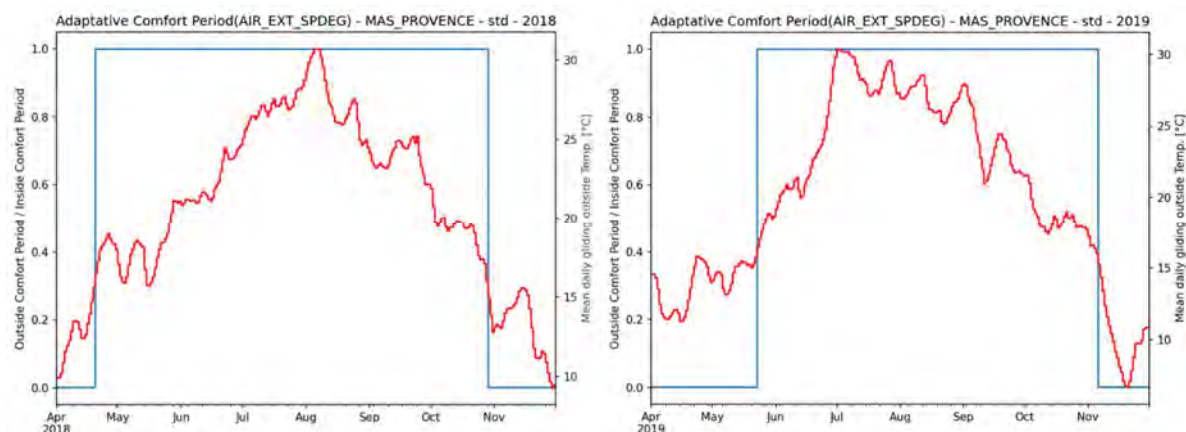


Figure 119 : Températures extérieures reconstruites – maison MAS_PROVENCE – 2018 (à g.) et 2019 (à dr.)

Il existe un capteur de CO₂ qui mesure le taux dans la chambre CH4. Celui-ci nous apprend que cette pièce n'est sans doute occupée que ponctuellement en période de villégiature (mi-août 2019 et sur un week-end au printemps par exemple). Ceci tend à confirmer que les pièces ne sont pas toujours occupées et que les niveaux de température atteints peuvent être liés à l'absence d'une gestion des ouvrants et des protections solaires sur une partie de l'été.

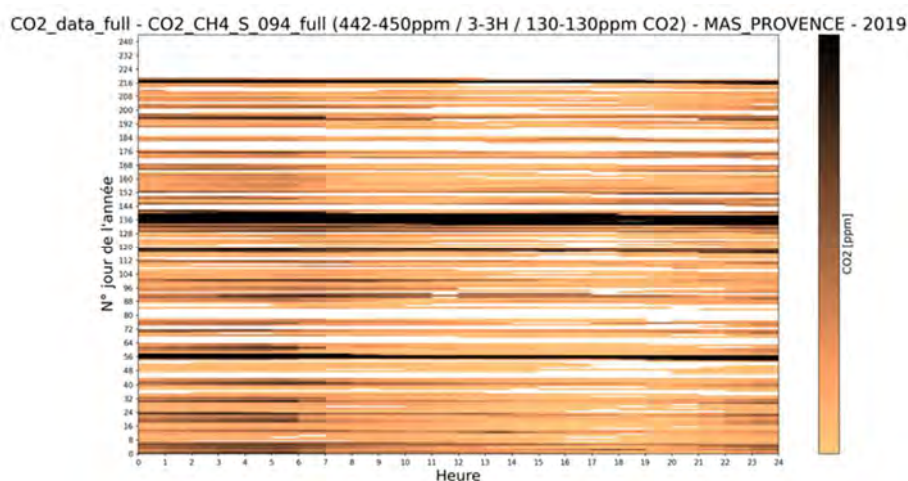


Figure 120 : Taux de CO₂ mesurés dans la chambre CH4 – barre d'éch. : 390 à 690 ppm – maison MAS_PROVENCE – 2019

```
ylim_min = 390 #250 # TODO: Choose the CO2 minimum threshold to be traced
ylim_max = 690 #600 # TODO: Choose the CO2 maximum threshold to be traced
```

Une autre explication des degrés-heures DH aussi élevés dans la maison MAS_PROVENCE pourrait provenir du fait que le pic de chaleur n'intervient pas au même moment en 2018 (début août) et 2019 (début juillet). Suivant la date, la course du soleil et l'occupation sont également susceptibles de varier.

Afin de pallier à l'inconfort d'été dans la maison MAS_PROVENCE, le CEA a réalisé d'autres calculs de degrés-heures corrigés en simulant l'ajout d'un système de rafraîchissement évapo-convectif tel que des brasseurs d'air. En s'appuyant sur les gains de température ressentie avec différentes vitesses d'air, les résultats restent insuffisants à rendre confortable le séjour et ce, même avec une vitesse d'air intérieure aussi élevée que 1,2 m/s (-2,2°C de gain ressenti) et une catégorie d'ambiance C2 ou C3.

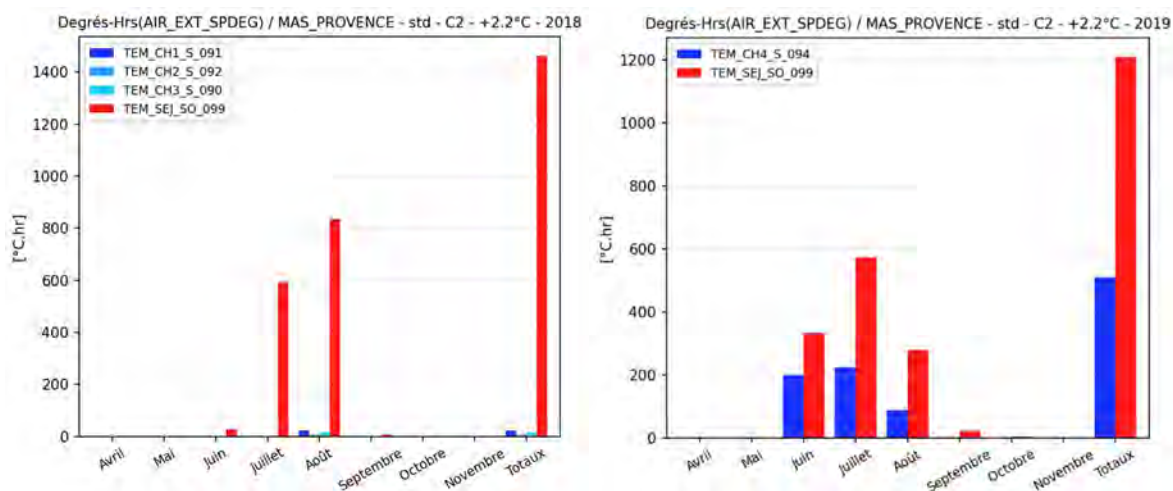


Figure 121 : DH calculés avec catég. amb. C2 et un syst. rafraîch. : -2,2°C – MAS_PROVENCE – 2018 (à g.) et 2019 (à dr.)

3.6.5. Exposition : pour vivre heureux, vivons cachés

Sur l'ensemble de nos simulations et de nos calculs pour chacune des pièces instrumentées, les résultats ne mettent pas systématiquement en évidence que les expositions Nord supportent mieux les surchauffes estivales que le reste du logement. C'est notamment le cas pour la maison Pierre5 et la chambre CH4(N), la maison Hanau et la chambre CH3 (NO), la maison Tradimaçons1 et la chambre CH2 (N).

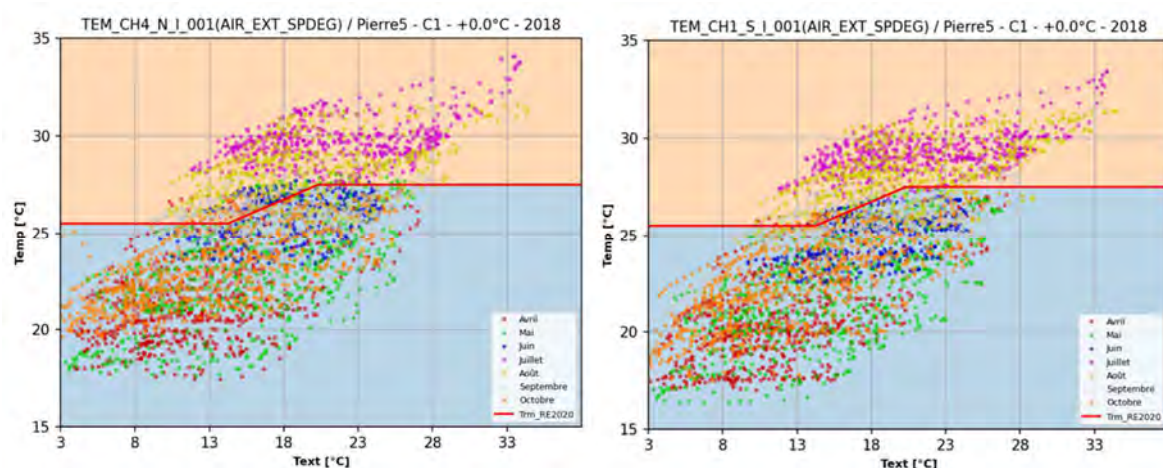


Figure 122 : Répartition de la $t^{\circ}\text{C}$ intérieure mesurée dans les chambres CH4 (à g.) et CH1 (à dr.) – Pierre5 – 2018

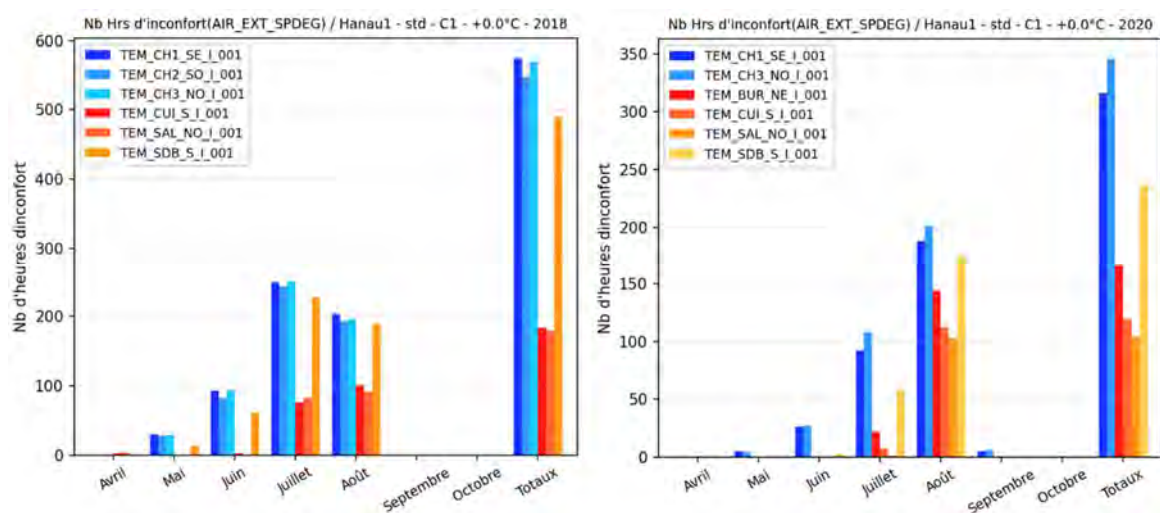


Figure 123 : Degrés-heures calculés pour la chambre CH3 exposée Nord - Hanau1 - 2018 (à g.) et 2020 (à dr.)

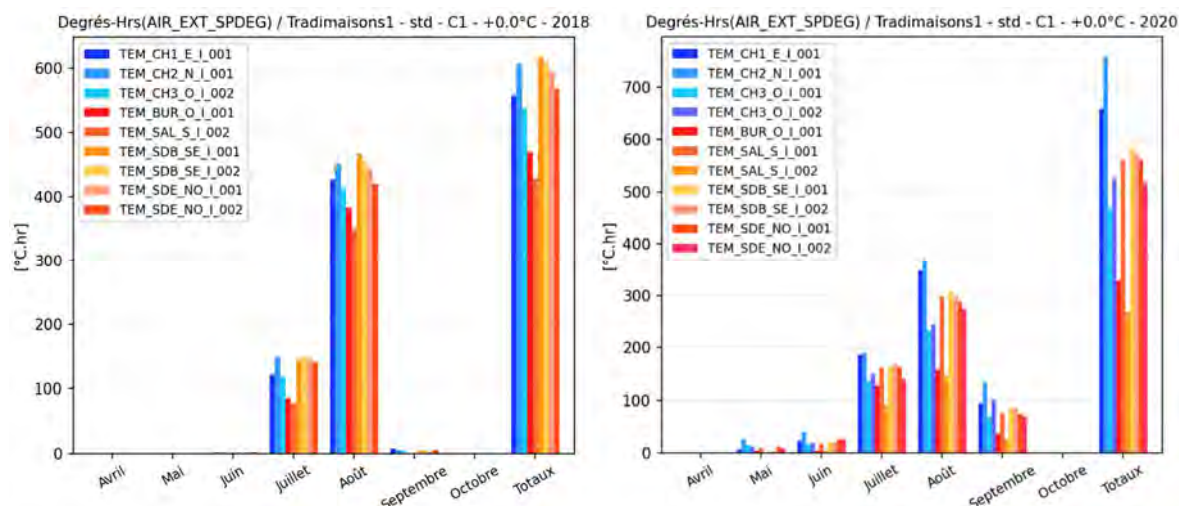


Figure 124 : Degrés-Heures calculés pour la chambre CH2 exposée Nord – Tradimaisons1 – 2018 (à g.) et 2020 (à dr.)

S'agit-il de pièces inoccupées, peu ou mal ventilées ? Nous n'avons pas les réponses à ces questions. La maison Pierre1 offre une forme plus logique de l'étalement des degrés-heures par pièce : par ordre décroissant des degrés-heures calculés : SO → NO → NE. Le séjour exposé Sud fait exception mais il est sans doute mieux protégé par les choix des constructeurs comme étant la pièce de vie principale.

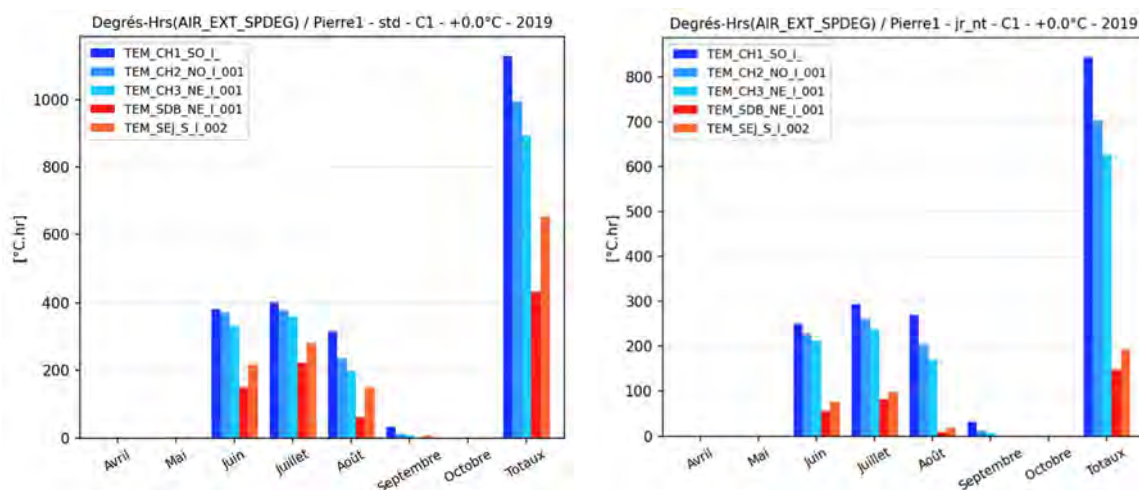


Figure 125 : Degrés-Heures calculés / pièces instr. – Occupation RE2020 (à g.) et zonage Jour-Nuit (à dr.) – Pierre1 – 2019

C'est peut-être aussi une indication que la pièce de vie principale doit être retenue comme étant la température mesurée représentative du ressenti de confort estival et donc utilisée pour le calcul des indicateurs d'inconfort, au moins en zone jour.

Un autre enseignement est qu'il ne faut pas préjuger du confort estival d'un logement au travers des pièces constituant la zone nuit. Elles sont probablement moins souvent occupées et leurs degrés-heures élevés reflètent probablement le fait que l'inoccupation en journée n'est jamais synonyme d'une bonne gestion des ouvrants et des protections solaires. Les occupants ne sont peut-être pas suffisamment disciplinés ou n'ont pas les moyens nécessaires pour une gestion efficace des apports solaires à partir du matin pour toute la journée.

L'inconfort chaud évalué en période nocturne peut être lié à une faible ventilation des chambres, vraisemblablement dû aux contraintes de pollution ou de bruit.

3.6.6. Maison à ventiler : Tradimaisons1

Si l'on fait abstraction de la mesure de température dans le salon TEM_SAL_S_I_001, et même des températures des pièces humides à usage spécifique, l'inconfort d'été observé avec le calcul des

indicateurs réglementaires sur l'année 2019 peut être réduit sous le seuil bas de 350°C.h dans le cas de la maison Tradimaçons1 avec une ventilation de 0,9 m/s.

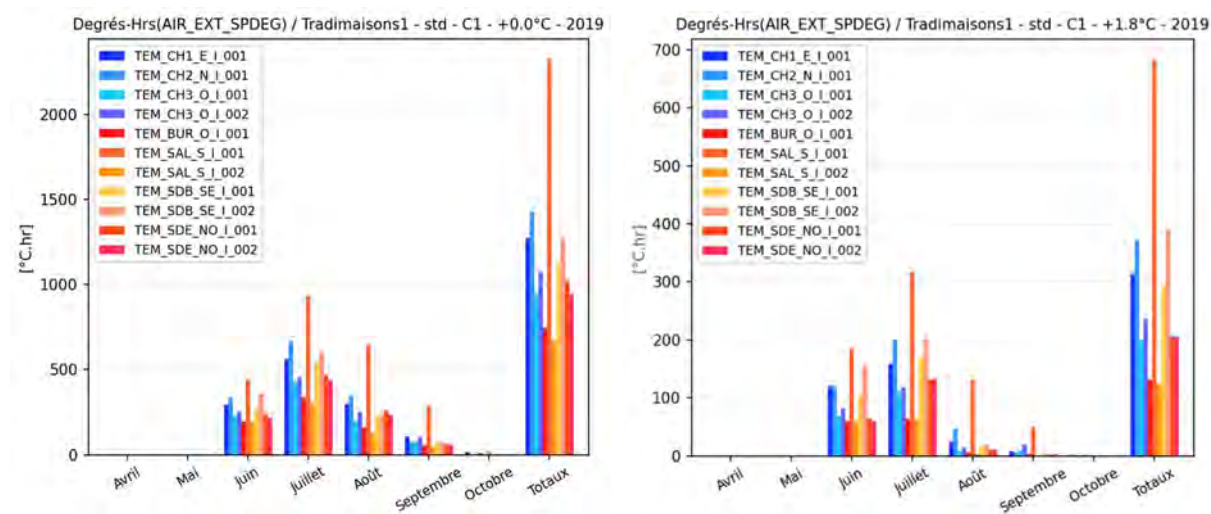


Figure 126 : Degrés-Heures calculés suivant RE2020 (à g.) et avec syst. rafraîch. 0,9 m/s (à dr.) – Tradimaçons1 – 2019

3.6.7. IGC2 : un monde par « frais » ?

Les indicateurs d'inconfort d'été calculés pour la maison IGC2 montrent clairement que le logement est équipé d'une climatisation. Tous les degrés-heures calculés pour ce logement sont inférieurs à 200°C.h alors qu'elle se situe dans une région particulièrement chaude (31).

On peut souligner également que le sas d'entrée de la maison IGC2 présente des degrés-heures plus élevés qui semblent principalement liés aux périodes nocturnes. Ce problème a été en partie résolu par l'occupant après 2018. On note aussi que la chambre CH3 orientée Ouest, était probablement inoccupée en 2018 et 2019, compte tenu du fait que ses degrés-heures sont très supérieurs à ceux des autres chambres durant ces deux années (cf. Figure 127).

Ces résultats semblent rejoindre les simulations réalisées par le partenaire du projet ARMINES ParisTech (cf. Livrable4 « Indicateurs de confort adaptatif des mesures d'adaptation ») qui laisse apparaître la difficulté à atteindre le confort chaud y compris dans les bâtiments récents sans avoir recours à des systèmes de rafraîchissement actifs consommateurs d'énergie.

La question est encore posée de l'amélioration du confort d'été dans les maisons actuelles et futures avec des systèmes de rafraîchissement actifs plus économes en consommation électrique comme les puits provençaux, le géocooling ou le rafraîchissement radiatif. Une autre piste à explorer d'un point de vue et qui n'est pas encore suffisamment prise en compte dans la conception des maisons et des bâtiments et le zonage thermique avec la création de volumes sas.

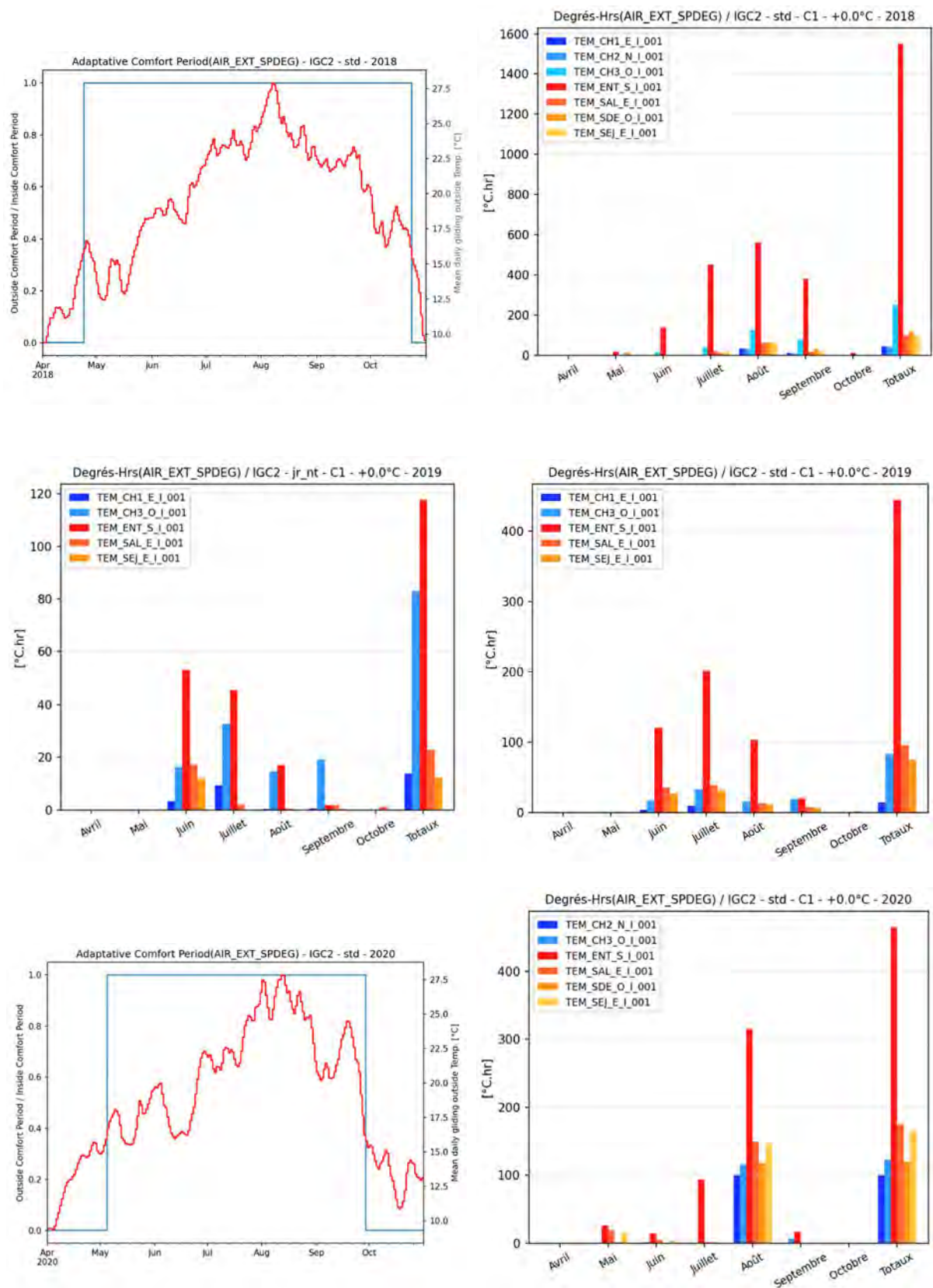


Figure 127 : T°C extérieure reconst. (à g. 2018 et 2020) et DH calculés occupation conv. (à dr.) et zones Jour/Nuit (à g. 2019) – IGC2

3.6.8. Résilience sous occupation

Les résultats de calcul des indicateurs d'inconfort d'été réglementaires à partir des scénarii d'occupation reconstruits sur les données de mesure CO₂ sont assez variables. Bien sûr, ils dépendent fortement de la disponibilité des données de CO₂ enregistrées.

A titre d'exemple, la reconstruction du scénario d'occupation sur l'année 2018 pour la maison Pierre1 montre des résultats probants, laissant apparaître des absences en journée mais surtout les périodes de villégiature.

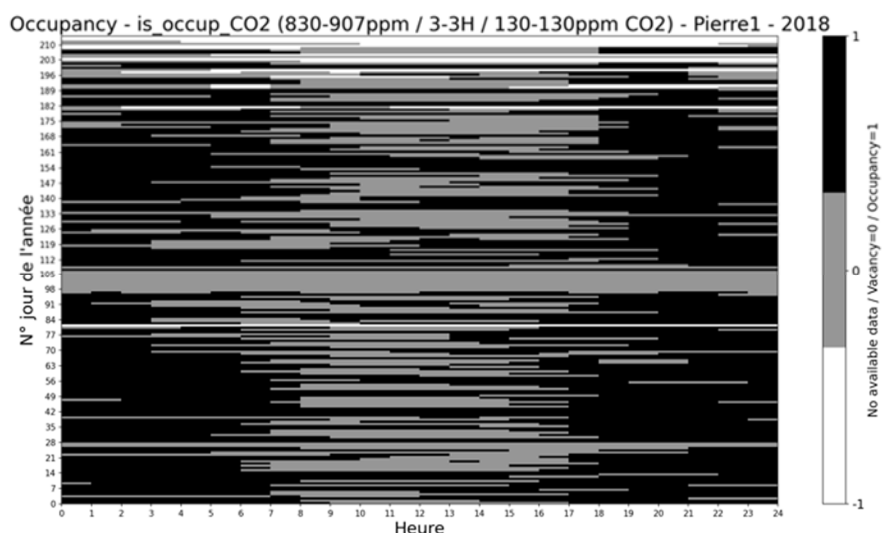


Figure 128 : Scénario d'occupation reconstruit – maison Pierre1 – 2018 (cf. §3.5.4)

L'indicateur d'inconfort chaud correspondant a pu être estimé pour l'année 2018. Il diffère d'environ - 20 % par rapport au même indicateur degrés-heures 2018 calculé avec le scénario d'occupation conventionnel. Cela permet de souligner que l'occupation influence le confort d'été ressenti.

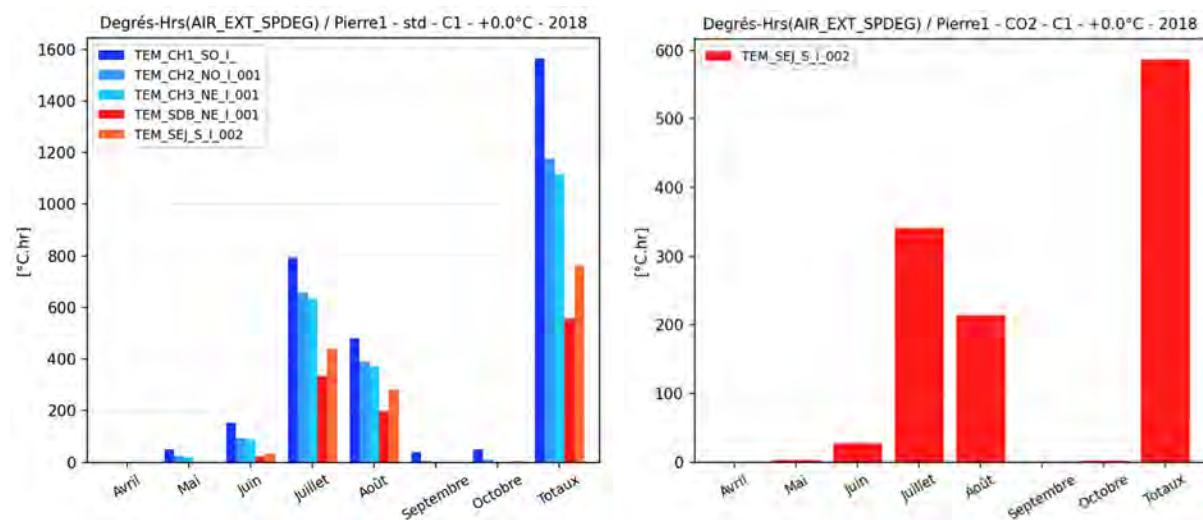


Figure 129 : Degrés-Heures calculés suivant RE2020 (à g.) et avec occupation reconstruire (à dr.) – Pierre1 – 2018

C'est également le cas pour la maison Hanau1 sur l'année 2020, le scénario d'occupation reconstruit semble tout aussi réaliste (cf. Figure 130).

Les résultats sont tout aussi intéressants puisque l'erreur d'évaluation des degrés-heures entre le calcul sur le scénario d'occupation conventionnel et le scénario d'occupation reconstruit reste faible (cf. Figure 131) :

- Chambre CH1 exposée SE : 336,1 – 338,3 = -2,2°C.h soit moins de -1 %

- Salon SAL exposé NO : $79,8 - 72,5 = +7,3^{\circ}\text{C.h}$ soit +10 %

On ne peut cependant rien conclure quant à la précision des calculs avec les nouveaux scénarii d'occupation car ceux-ci sont effectivement reconstruits afin d'améliorer l'évaluation du confort d'été ressenti par les occupants en situation de présence réelle.

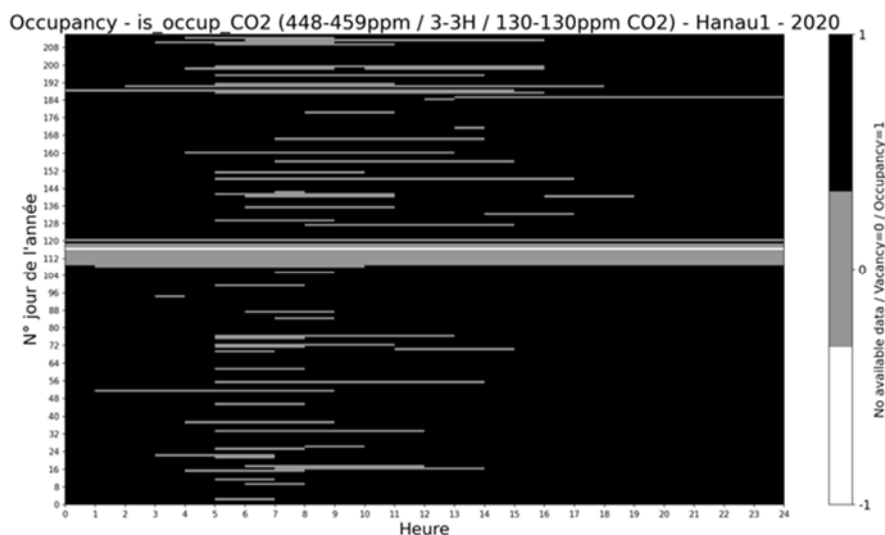


Figure 130 : Scénario d'occupation reconstruit – maison Hanau1 – 2020 (cf. §6.4)

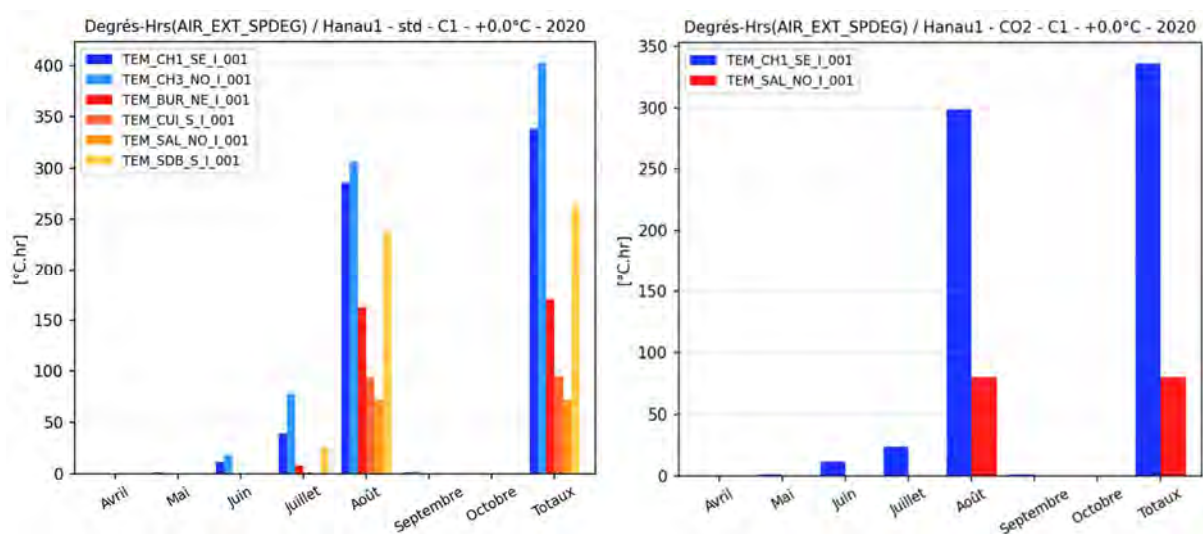


Figure 131 : Degrés-Heures calculés suivant RE2020 (à g.) et avec occupation reconstruire (à dr.) – Hanau1 – 2020

Le calcul des indicateurs d'inconfort réglementaires est fortement impacté par la qualité et la quantité des données de CO₂ mesurées. L'exemple de la maison IGC2 montre deux situations totalement différentes entre les années 2019 et 2020.

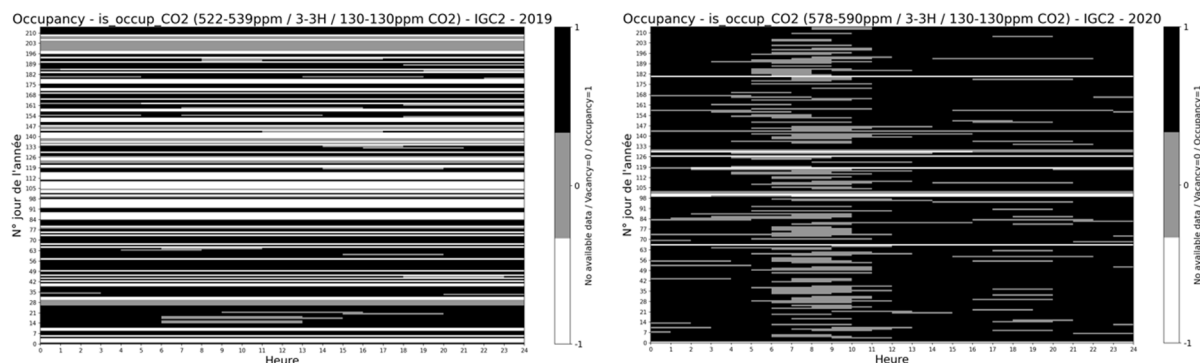


Figure 132 : Reconstruction de l'occupation avec la mesure CO_2 – IGC2 – 2019 (à g.) et 2020 (à dr.)

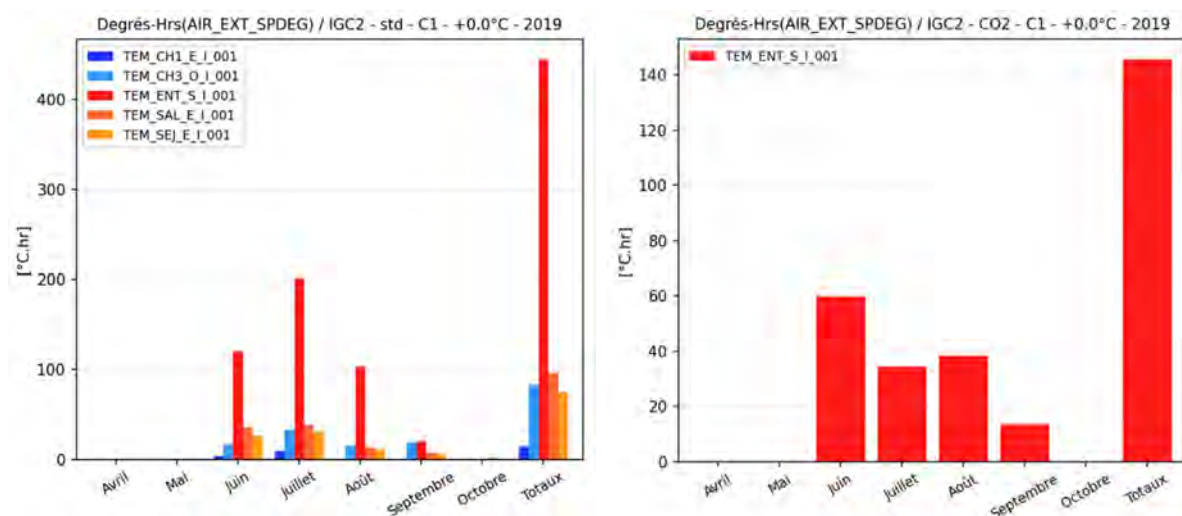


Figure 133 : Degrés-Heures calculés / scénarii d'occupation conventionnel (à g.) et reconst. sur CO_2 (à dr.) – maison IGC2 – 2019

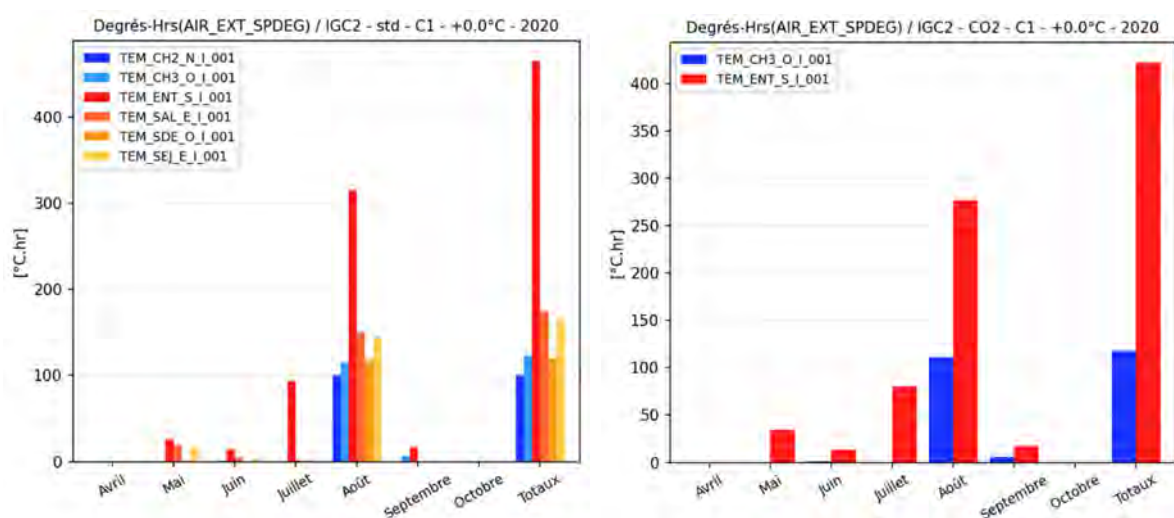


Figure 134 : Degrés-Heures calculés / scénarii d'occupation conventionnel (à g.) et reconst. sur CO_2 (à dr.) – maison IGC2 – 2020

Le calcul de l'indicateur d'inconfort chaud DH sur 2020 est comparable à celui du même indicateur calculé sur le scénario d'occupation conventionnel en 2020. Mais la reconstruction de l'occupation à partir des mesures de CO_2 sur 2020 fournit une meilleure estimation des DH d'inconfort chaud car a priori, plus représentative du confort en situation d'occupation réelle.

Ce n'est pas le cas des résultats obtenus sur 2019 qui souffre de données manquantes ou inexploitable pour reconstruire l'occupation.

3.7. Ressenti des occupants

3.7.1. Extrait du rapport Enquête sociologique

Il s'agit d'une synthèse du retour d'expériences des MEPOS (projet COMEPOS – Tâche 5.2)

2.1. Les points de vigilance en phase de conception

« Certains habitants regrettent que des solutions techniques parfois complexes soient privilégiées, quelques fois de façon contreproductive, alors qu'un travail de conception plus approfondi sur les agencements des espaces internes et externes aurait pu éviter le surcout technique (vitrage triple épaisseur...). A noter sur ce point, le faible recours à des architectes dans la moitié des maisons visitées, ce qui aurait pu améliorer le confort d'été, en prévoyant des débords de toits plus importants, ce qui évite de baisser totalement les volets roulants l'été, par exemple, et permet de garder des vues. »

3. Les conditions d'usage, le confort ressenti et les attentes des habitants

Synthèse

3.1. Concevoir l'agencement des espaces habités selon les confort ressentis et l'évolution des pratiques de vie : favoriser la luminosité (puits de lumière, vélux), les vues, l'organisation spatiale pour tous les âges de la vie qui s'adapte à de nouvelles pratiques renvoyant à des valeurs de vie (manger mieux, prendre soin de son milieu...): attention au confort d'été « *on est obligé de fermer nos volets l'été pour garder un confort thermique* »

3.7.2. Extrait de la thèse d'Eric VORGER¹

La thèse d'Eric VORGER¹ s'intitule « Étude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment ». ¹ CES - Centre Efficacité Énergétique des Systèmes

« 2.5.2.2 Probabilité de présence sur les plateaux du profil

Les durées des plateaux de présence du matin et de l'après-midi sont fixées par la typologie. Les heures moyennes d'arrivée et de départ pondérées par le poids respectif de chaque type sont respectivement 8h47 et 17h44. En considérant une absence d'une heure correspondant à une pause déjeuner (au centre de la période), la plage de présence totale dure 8 heures. D'après les résultats des campagnes de mesures évoquées, la durée moyenne de présence cumulée au cours d'une journée de travail est comprise entre 5h30 et 6 h. Précisons qu'il s'agit du temps passé par l'occupant à son poste de travail et non de la durée séparant la dernière arrivée du dernier départ (cf. § 2.5.1). Pour le calibrage, la durée moyenne de présence cumulée est arrondie à la valeur haute de 6 h pour compenser le fait que le modèle néglige la présence d'un occupant dans toute zone de bureau autre que celle qui accueille son poste de travail. Afin de répliquer une durée moyenne de présence cumulée de 6 h, la probabilité de présence sur les plateaux du profil est fixée à 0,75 (=6 h/8 h). L'heure moyenne de première arrivée et l'heure moyenne de dernier départ d'après le modèle sont respectivement 8h47 et 17h44 (Tableau 3, en pondérant les heures d'une catégorie d'horaire par sa représentativité donnée dans le Tableau 2). En considérant un taux de présence de 75 % sur les plateaux de chaque type d'horaire, le taux de présence moyen entre 8h47 et 17h44 s'élève à 61 %. Il s'agit d'une valeur conforme avec plusieurs résultats de la littérature. Rubinstein et al. (2003) et Mahdavi et al. (2008) par exemple, font état de taux d'occupation moyens compris entre 40 et 70 % durant une journée de travail. »

« 2.1 Introduction : diversité et évolution des horaires de travail

Au-delà de la présence au travail, les horaires de travail dictent évidemment les horaires d'occupation des logements pour l'ensemble des actifs occupés. Les scénarios déterministes conventionnels (règles Th BCE, 2012)²² apparaissent alors éloignés de la réalité dans le cas des bâtiments de bureaux²³ mais également dans le cas des logements²⁴, pour lesquels les habitants sont considérés absents sur des horaires journaliers très classiques, ce qui ne correspond à la réalité ni pour les personnes qui ne travaillent pas, ni même pour une large partie des travailleurs. Les modèles existants de présence dans les bureaux et dans les logements sont totalement indépendants, mais l'intérêt croissant porté à la modélisation des ensemble urbains ouvre la perspective de modèles dans lesquels les individus sont suivis de leur logement à leur lieu de travail et inversement.

²²http://www.bulletin-officiel.developpementdurable.gouv.fr/fiches/BO201114/met_20110014_0100_0007%20annexe.pdf

²³ Taux de présence égal à 100 % de 8h à midi, 50 % de midi à 14h et 100 % de 14h à 18h du lundi au vendredi et égal à 0 % le reste du temps

²⁴ Taux de présence de 100 % entre 5h et 9h et entre 17h et 21h du lundi au vendredi plus le mercredi après-midi ainsi que le week-end, de 70 % toutes les nuits de 21h à 5h pour diminuer les apports métaboliques en phase de sommeil et de 0 % le reste du temps correspondant aux périodes de travail. »

3.7.3. Enquête sociologique des habitants

L'enquête sociologique réalisée par le CSTB durant le projet COMEPOS a permis de mettre en évidence les appréciations suivantes.

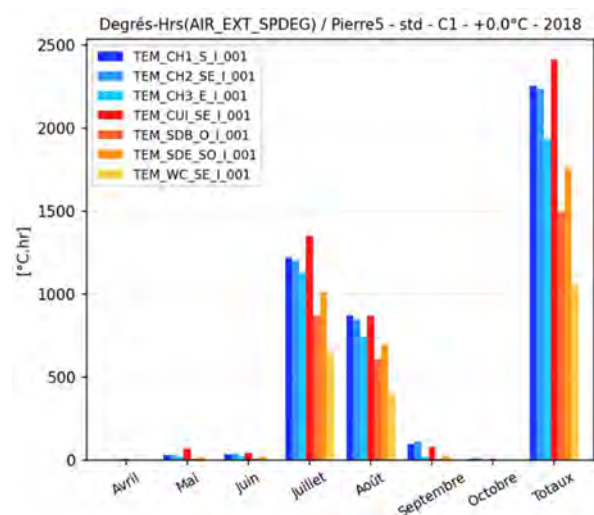
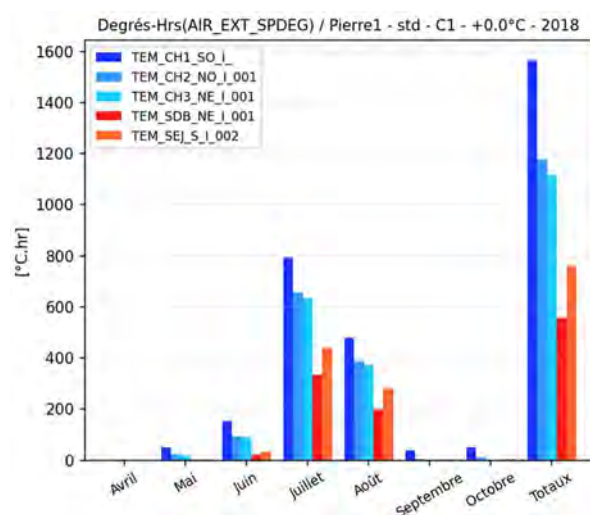
La gestion des ouvrants et des occultants pour le confort d'été est souvent antinomique avec l'usage fonctionnel de l'habitat et le comportement des occupants. Ceux-ci veulent profiter des extérieurs et donc laisser des espaces de circulation libres pour leurs allers-et-venues entre l'intérieur et les extérieurs.

Les protections fixes sont généralement jugées insatisfaisantes. Elles ne couvrent pas assez les vitrages et les ouvertures et ne sont donc pas en mesure de protéger du rayonnement solaire les espaces laissés ouverts pour la libre circulation des occupants entre les pièces à vivre et les extérieurs.

D'une façon générale, la ventilation naturelle apporte un meilleur confort mais la plupart des occupants se plaignent des contraintes de bruit et éventuellement de la pollution à supporter avec l'ouverture des fenêtres.

Les occupants souhaiteraient davantage d'espaces ombragés autour de leur maison. Le ressenti par les occupants est un phénomène complexe qui résulte de plusieurs facteurs et notamment de l'environnement extérieur du bâti et même au-delà du jardin.

D'ailleurs, il ressort de l'enquête que les maisons en région parisienne sont vécues comme étant plus confortables thermiquement. D'après le CSTB, cet avis peut être influencé par la satisfaction personnelle de jouir d'une maison individuelle comparativement à l'habitat environnant principalement collectif. Ceci apparaît en contradiction avec les indicateurs d'inconfort calculés sur la maison Pierre5 et dans une moindre mesure sur Pierre1. Pour cette dernière, les occupants ne se plaignent pas des températures atteintes car ils profitent d'extérieurs très agréables.



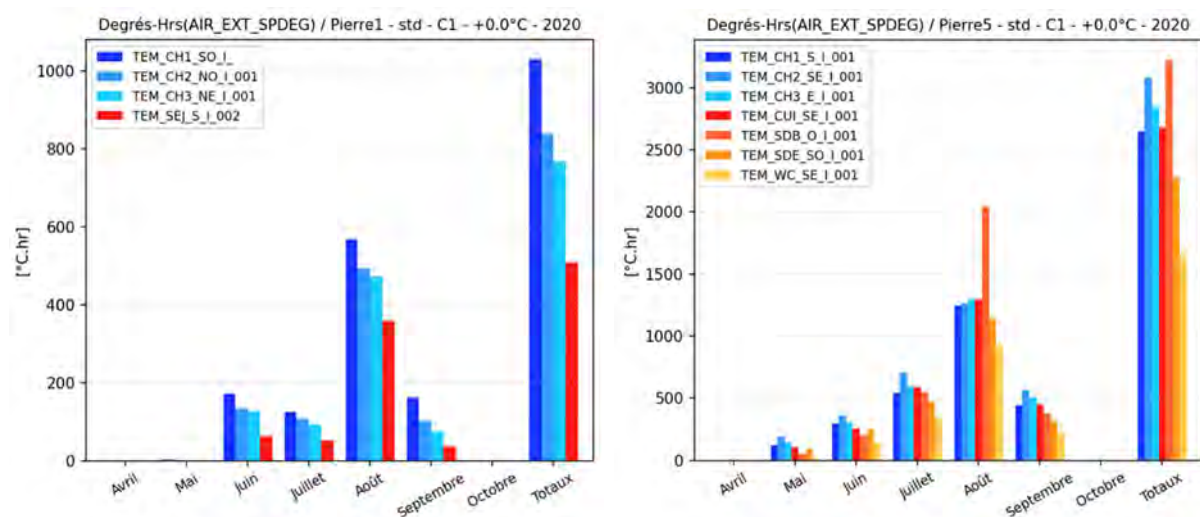


Figure 135 : Indicateurs DH / par pièce instrumentée – Pierre1 (à g.) et Pierre5 (à dr.) – 2018 (en h.) et 2019 (en bas)

Cependant, nous rappelons que la température considérée pour estimer les indicateurs réglementaires d'inconfort chaud est la température d'air sec dans chaque pièce à défaut de disposer des données permettant de calculer la température opérative : température de parois ou d'une température de globe noir (cf. §3.4.1).

Compte tenu de nos précédentes discussions sur les différences entre température d'air sec, température moyenne radiative, température de globe noir ou température opérative, il n'est pas sûr que ces indicateurs DH seraient plus favorables en considérant la température opérative telle que définie par la méthode Th-D 2020 (cf. §3.4.1). Ce point devra être étudié pour comprendre comment rapprocher le ressenti des occupants des indicateurs calculés.

Pour la maison Pierre5, les indicateurs DH calculés pour les pièces cuisine, salle de bains ou salle d'eau ou même les sanitaires sont aussi à relativiser du fait de leur usage spécifique et du temps réel d'occupation.

Les occupants de la maison Hanau1 ont fait part de leur inconfort d'été en périodes nocturnes. Ces impressions sont confirmées par les estimations des indicateurs DH réglementaire (méthode de calcul Th-D 2020) et calculé avec le scénario d'occupation Jour-Nuit.

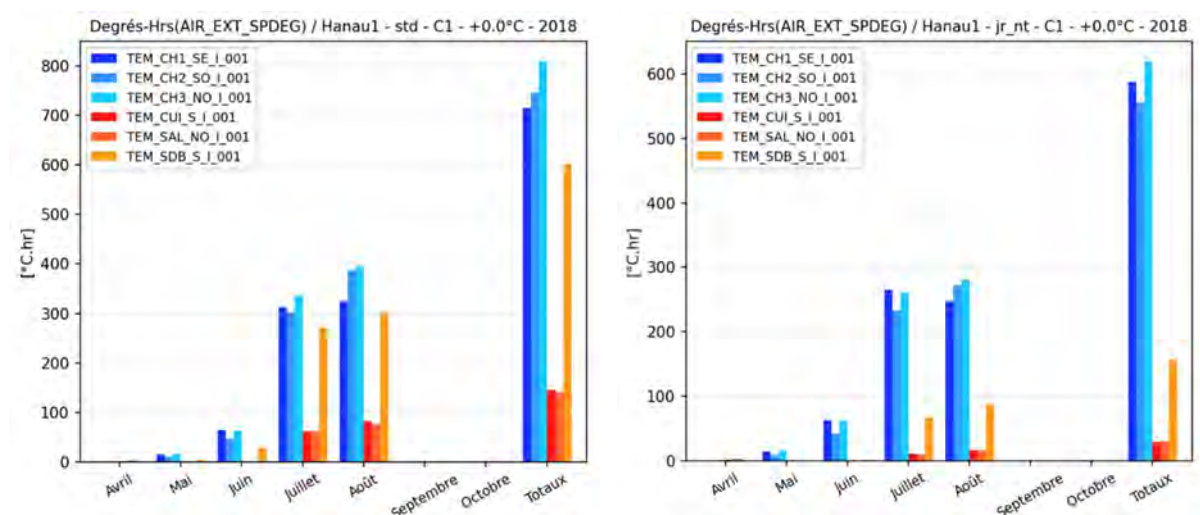


Figure 136 : Indicateurs DH / pièce instrumentée – calcul RE2020 (à g.) et avec zone Jour-Nuit (à dr.) – maison Hanau – 2018

Pour une telle maison (Hanau) qui dépasse le seuil bas des degrés-heures DH RE2020 et donc, nécessitant la prise en compte d'une consommation supplémentaire pour les besoins de refroidissement en cas d'inconfort d'été ponctuel, il nous semblerait judicieux de mettre en place un système de ventilation

naturelle traversante, soit par des fenêtres pilotées telles que celles proposées par K-Line (FPI), soit manuellement.

La salle de bains étant une pièce à usage spécifique, la maison Hanau pourrait alors bénéficier d'un statut « réglementaire ».

3.7.4. Occupants du bâtiment HELIOS

Le CEA a réalisé une étude de confort thermique ciblée sur le bâtiment HELIOS. Cette étude associait une campagne de mesures de température et une enquête de satisfaction du confort à chaque poste de travail dans les bureaux de l'aile Ouest situés au deuxième étage. Le bureau B3105 fait partie de cette aile. Ce bureau a été instrumenté et ses occupants ont exprimé en continu leur ressenti de confort d'été, en précisant si les ouvrants étaient ouverts/fermés et si le ventilateur de bureau fonctionnait ou pas.

Les résultats du calcul des DH font apparaître un inconfort estival légèrement supérieur au seuil bas de 350°C.h fixé par l'arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique pour la construction de bâtiment en France métropolitaine.

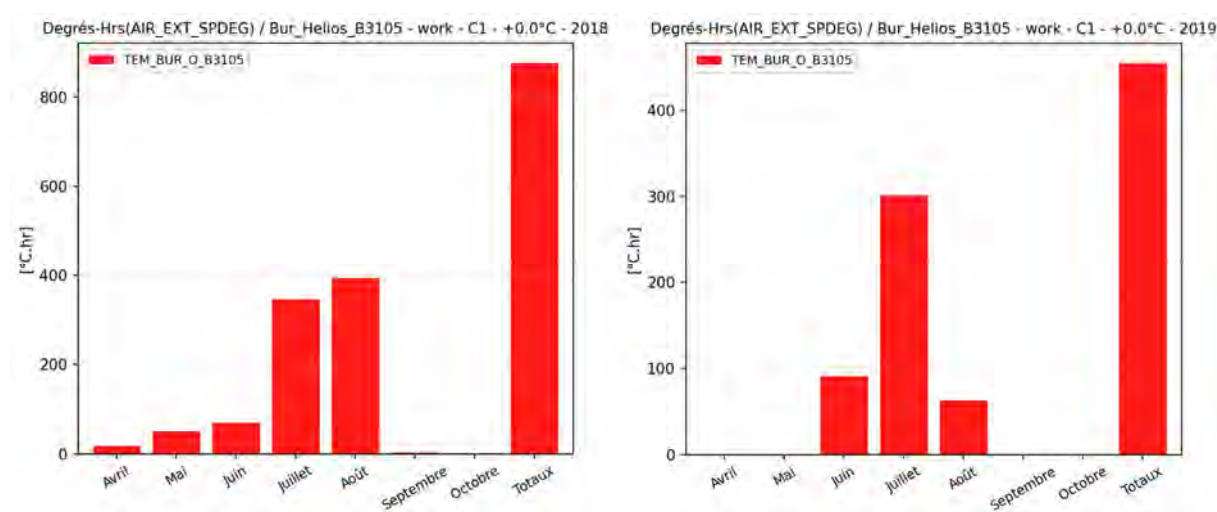
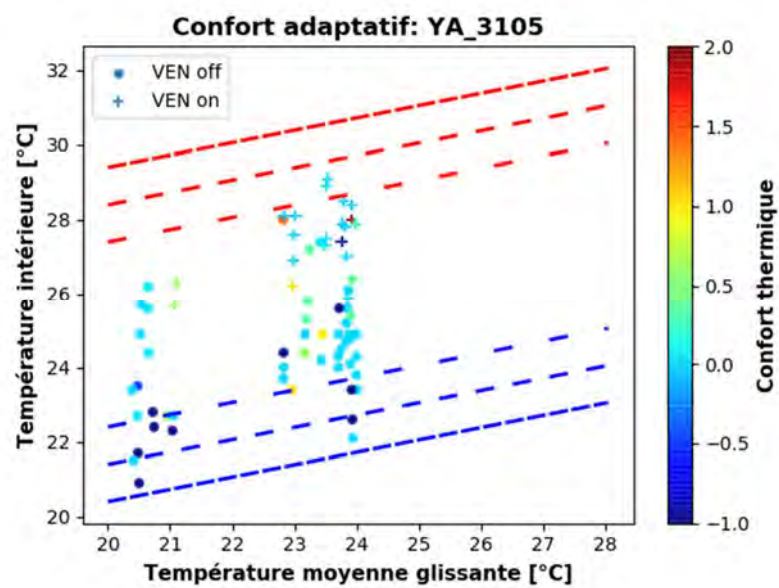
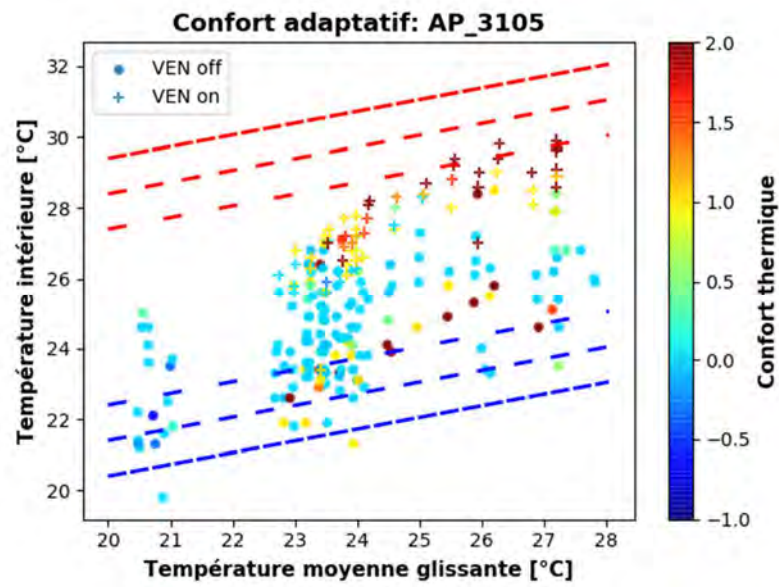
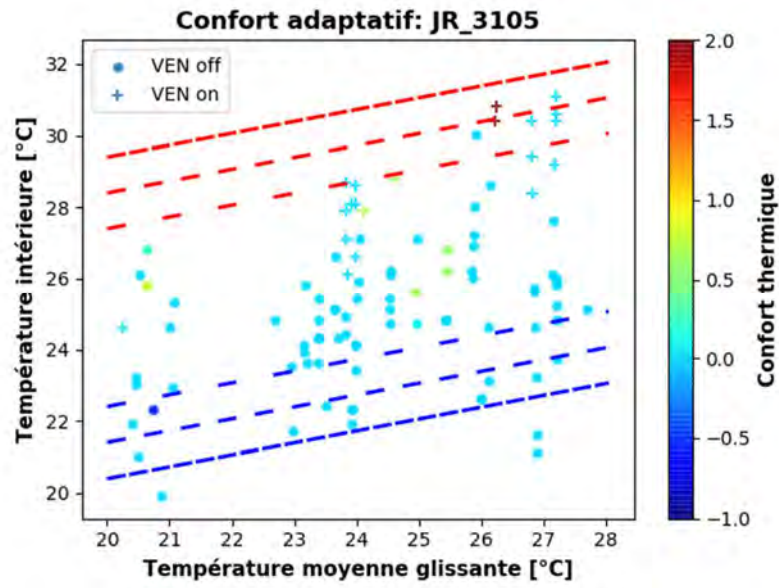


Figure 137 : Degrés-Heures calculés – HELIOS Bureau B3105 – 2018 (à g.) et 2019 (à dr.)

Les Figures 138 donnent le ressenti au cours de l'été 2018 de chacun des trois occupants du bureau B3105 (bât. HELIOS), de classe sociologique et culturelle différentes. Chaque occupant était interrogé automatiquement à son propre poste de travail, orienté et situé différemment dans la pièce.

L'expression du ressenti des occupants semble correspondre au calcul de l'indicateur d'inconfort chaud calculé.

Mais il faut noter que l'expression par un code couleur du ressenti des occupants ne correspond pas forcément à une appréciation de confort : « est-ce que j'ai plutôt chaud ou plutôt froid / un peu chaud ou un peu froid ? ». Ce n'est pas antinomique avec la notion de confortable si j'ai envie, respectivement, d'avoir chaud ou d'avoir froid. Les termes des questionnaires ont leur importance et l'interprétation serait sans doute différente avec un autre style de questions : « est-ce que j'ai trop chaud ou trop froid ? ».



Les nuages de points sur les Figures 138 peuvent apparaître peu fournis en fonction de la disponibilité des occupants pour répondre au questionnaire automatique.

3.8. Conclusions et perspectives

L'application de la méthode de calcul réglementaire Th-D 2020 pour déterminer les indicateurs d'inconfort chaud est possible dès lors que les données enregistrées sont disponibles en quantité suffisante. Le CEA a pu calculer les degrés-heures DH des huit maisons COMEPOS et de quatre bureaux situés dans le bâtiment HELIOS (73).

Seuls deux logements occupés parmi les douze étudiés apparaissent confortables au sens du confort d'été 2018, 2019 et 2020, conformément au calcul Th-D 2020 de l'arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine.

Si la maison IGC2 est équipée d'une climatisation qui fournit la fraîcheur durant tous les étés, même les plus chauds, on relève toutefois un inconfort d'été marqué en période nocturne dans la maison Hanau1. Cette dernière serait la seule que l'on pourrait qualifier de réglementaire si l'on ne s'intéresse qu'aux pièces de vie principale de la zone jour.

D'autres logements Pierre1, Pierre5 et Tradimaïsons1 montrent également des situations d'inconfort plus ou moins important en période nocturne. Cela peut être dû simplement au mode de calcul des degrés-heures qui dépend principalement des écarts entre la température mesurée et la température limite d'inconfort chaud qui est fixée à sa valeur basse entre 22H et 6H (autour de 26°C en fonction de la catégorie d'ambiance du bâtiment). Mais le manque de ventilation nocturne est probablement en cause. Les occupants ont exprimé d'une façon unanime leur difficulté à gérer correctement les ouvrants en période nocturne du fait de contraintes de bruit et/ou de sécurité.

En répartissant les scénarii d'occupation conventionnels entre les zones Jour et Nuit pour calculer les indicateurs degrés-heures, le CEA a pu souligner le cas échéant, la prépondérance de l'inconfort d'été en période nocturne. Cette approche contribue à orienter le choix des adaptations à prévoir pour mieux contrer les surchauffes estivales. Et cela renforce la nécessité de trouver les moyens de faciliter l'utilisation de la ventilation naturelle traversante.

Pour un même logement ou bâtiment, la disparité des degrés-heures calculés d'une pièce à l'autre ou dans les différents bureaux est parfois importante. Si ces écarts peuvent être liés à la position des capteurs de température exposés au rayonnement solaire direct (cf. maison Tradimaïsons1 (SAL)), il est également possible qu'une gestion binaire : constamment ouverts ou fermés des ouvrants et des protections solaires dans les pièces inoccupées soit en cause (cf. les maisons Pierre2 (CH3), MAS_PROVENCE(CH)). Par ailleurs, les pièces à usages spécifiques telles que la cuisine ou d'une manière générale, les pièces d'eau sont régulièrement plus soumises à des degrés-heures d'inconfort chaud élevés que le reste des logements (cf. Hanau1). Enfin, il se peut que des pièces soient climatisées et d'autres non lorsqu'un zonage thermique est organisé (cf. maison IGC2 (ENT)).

Ces premiers constats dressent un bilan peu optimiste vis-à-vis de la résilience des bâtiments soumis aux climats caniculaires actuels et futurs. Et les étés risquent d'être particulièrement insupportables thermiquement dans nos constructions, même aux meilleurs standards actuels, sous les climats futurs à l'horizon de la fin du XXI^{ème} siècle.

D'ores et déjà, il convient d'étudier l'intégration de systèmes actifs plus économes en énergie électrique que la très plébiscitée climatisation par compression, comme les puits provençaux, le géocooling, les systèmes de rafraîchissement radiatif ou évaporatif ou encore les climatisations solaires en plus des systèmes déjà largement déployés tels que les brasseurs d'air.

Au vu de l'enquête d'opinion réalisée jusqu'à l'été 2018 auprès des habitants par le CSTB dans le cadre du projet COMEPOS, les indicateurs calculés corroborent les avis des occupants sur l'inconfort chaud en particulier mais avec un degré qui semble supérieur aux ressentis exprimés. On relève que les indicateurs

réglementaires ont tendance à surévaluer l'inconfort chaud. Par ailleurs, les degrés-heures d'inconfort chaud calculés suivant la RE2020 ne sont pas capables d'expliquer le ressenti des occupants lorsque les situations d'inconfort sont concentrées sur un créneau spécifique en journée ou en période nocturne.

Le CEA a également travaillé sur la manière de reconstruire l'agenda d'occupation des maisons à partir des mesures de CO₂ enregistrées. Une méthode originale a été mise au point et permet d'apporter des premiers résultats intéressants sur les maisons disposant de suffisamment de données CO₂ sur les périodes étudiées. Cette approche cherche à améliorer l'évaluation de l'inconfort d'été dans les logements et bâtiments existants et occupés et pourrait être utilisée dans le cadre de la garantie de performance énergétique.

Ainsi, notre étude suggère de construire et d'utiliser d'autres indicateurs tels que les DH_{jr_nt} calculés en différenciant la zone jour de la zone nuit, ainsi qu'en reconstruisant une occupation plus réaliste (DH_{occup_reel}) sur ces différentes périodes ($DH_{occup_reel_jr}$ et $DH_{occup_reel_nt}$). Ces nouveaux indicateurs permettraient de détecter plus efficacement les heures les plus chaudes, de comprendre les défauts du bâtiment à corriger (comportement, inefficacité des systèmes passifs ou actifs) et pour améliorer l'évaluation du confort thermique du cas étudié.

4. Données climatiques

4.1. Objectifs

L'étude de l'adaptation des bâtiments dans un contexte de changement climatique requiert l'utilisation de données météorologiques appropriées pour contraindre les modèles de simulation thermique dynamique.

Dans le cadre du projet RESILIANCE le choix a été fait d'utiliser une approche combinant différentes simulations climatiques à haute résolution pour créer des fichiers de forçages climatiques, à savoir utiliser un modèle numérique de climat régional pour produire une année type en climat futur à partir de longues séries temporelles.

La méthodologie présentée ici a pour but de recréer une année considérée comme typique du climat futur moyen pour un horizon temporel donné (milieu et fin de siècle). De plus, pour évaluer la réponse des bâtiments à des événements thermiques extrêmes, des vagues de chaleur d'intensités variables sont également ajoutées aux forçages moyens.

La méthode repose sur deux axes distincts :

- les conditions climatiques « typiques » en climat futur sont fournies par analyse statistique d'un ensemble de projections climatiques produites par les modèles climatiques régionaux de l'ensemble EURO-CORDEX (Jacobs et al., 2014) ;
- les données météorologiques horaires en climat futur sont produites à partir du modèle de climat régional à haute résolution AROME, version climatique du modèle de prévision numérique du temps développé par Météo-France et le CNRM (Seity et al. 2011).

Deux zones climatiques distinctes ont été sélectionnées pour cette étude : la région parisienne pour représenter un climat plutôt « moyen » et la région de Nîmes pour représenter un climat plus extrême (en températures). Pour chacune de ces zones, les points de grille des modèles les plus proches des stations RADOME (réseau Météo-France opérationnel) servant de référence rurale pour chacune des régions d'étude sont choisis :

- station de Chartres pour Paris (48,46°N ; 1,50°E) sur la base d'études antérieures (Daniel et al., 2019)
- station de Pujaut pour Nîmes (43,99°N ; 4,76°E)

En plus de ces points ruraux, les points les plus proches des villes étudiées sont également utilisés pour produire les forçages contenant l'influence de la ville.

4.2. Présentation des données climatiques régionales EURO-CORDEX

L'analyse des données climatiques régionales s'appuie sur les projections climatiques EURO-CORDEX (Jacobs et al., 2014) à 0.11° de résolution horizontale (soit environ 12,5 km), disponibles pour le scénario de très fortes émissions de gaz à effet de serre RCP8.5. Ces projections climatiques ont été produites par descente d'échelle dynamique des modèles globaux (GCM pour General Circulation Model ou Global Climate Model) du projet d'inter-comparaison CMIP5 (Taylor et al., 2012).

Plusieurs dizaines de couples de modèles climatiques globaux/modèles climatiques régionaux (RCM pour Regional Climate Model) sont disponibles dans l'ensemble EURO-CORDEX. On utilise ici les données d'un sous-ensemble de 10 GCM/RCM, qui ont été préalablement corrigées par Météo-France par méthode statistique et qui sont maintenant fournies sur le portail DRIAS (<http://www.drias-climat.fr/>). La méthode de correction nommée ADAMONT repose sur une approche sur des corrections statistiques par quantiles et par types de temps (Déqué 2007 ; Verfaillie 2017 ; <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/218>), et utilise l'analyse de données d'observation SAFRAN comme référence (Quintana-Segui et al., 2008 ; Soubeyroux et al., 2008 ; Vidal et al., 2010 ; <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/137>). Différents critères de sélection ont été définis pour choisir ces couples GCM/RCM (<http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/240>) (Tableau 1) : notamment la sélection de GCM jugés réalistes sur l'Europe (McSweeney et al., 2015), la réjection de couples concernés

par des erreurs connues, la représentation de la dispersion du changement climatique simulé par l'ensemble d'origine ou encore la prise en compte de la cohérence physique entre GCM et RCM.

Table 1: Matrice GCM/RCM EURO-CORDEX DRIAS adjust ADAMOT-SAFRAN RCP8.

RCM \ GCM	CNRM-CM5-LR	EC-EARTH	HadGEM2-ES	IPSL-CM5A-MR	MPI-ESM-LR	NOESM1-M
ALADIN63	X					
CCLM4-8-17			X		X	
HIRHAM5						X
RACMO22E	X	X				
RCA4		X		X		
REMO2009					X	
WRF381P				X		

4.3. Données météorologiques horaires à haute résolution

La nécessité pour les modèles de simulation thermique dynamique d'être contraints par des données météorologiques horaires ainsi que la volonté de prendre en compte le signal urbain nous empêche d'utiliser les données EURO-CORDEX directement. En effet, les données corrigées EURO-CORDEX DRIAS ne sont disponibles qu'au pas de temps journalier et les RCM qui les produisent ne représentent pas le milieu urbain de manière détaillée (Langendijk et al., 2019).

4.3.1. Modèle climatique à haute résolution AROME

Pour obtenir ces deux informations (résolution temporelle horaire et représentation du climat urbain), on utilise des simulations climatiques à très haute résolution (2,5 km) réalisées avec le modèle climatique AROME (Daniel, 2017 ; Fumière et al., 2020 ; Caillaud et al., 2021). Les surfaces continentales sont traitées par la plateforme de modélisation SURFEX (Masson et al., 2013) qui combine plusieurs modèles dont le schéma urbain TEB (Town Energy Balance ; Masson, 2000).

A l'instar des simulations climatiques régionales EURO-CORDEX, les simulations AROME sont également produites par descente d'échelle dynamique depuis le GCM CNRM-CM5 (Voldoire et al., 2013) vers le RCM CNRM-ALADIN (Daniel et al., 2019) et dernièrement vers le RCM plus fin AROME. Trois périodes temporelles sont simulées : une période dite historique allant de 1986 à 2005 (20 ans) et deux périodes en climat futur proche (2041-2050, 10 ans) et lointain (2080-2099, 20 ans).

4.3.2. Correction des simulations climatiques AROME

Les simulations climatiques AROME étant produites par descente d'échelle dynamique de simulations climatiques globales puis régionales, elles héritent des mêmes éventuels biais et erreurs que leurs simulations parentes (tout comme les simulations EURO-CORDEX avant correction).

Il est donc nécessaire de les débiaiser. La méthode de correction choisie se rapproche le plus possible de celle appliquée aux données CORDEX dans le cadre du projet DRIAS : la même méthode quantile-quantile (Déqué, 2007 ; <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/63>) est appliquée, mais cette fois sans classification par type de temps. La même analyse d'observations SAFRAN est utilisée comme référence (Le Moigne, 2002 ; Quintana-Segui et al., 2016).

La méthode consiste à comparer la distribution de la variable à corriger des observations à la distribution de la même variable au même endroit mais cette fois simulée par le modèle AROME. Une fonction de correction est alors définie quantile par quantile au pas de 1 % entre 1 % et 99 %, et raffinée au pas de 0,001 % sur les queues de distributions pour mieux corriger les extrêmes. La fonction de correction s'exprime comme une différence entre le quantile issu des données modèle et le quantile équivalent issu des observations pour toutes les variables à l'exception des précipitations où un ratio est utilisé.

Une fonction de correction est donc calculée par variable, par point et séparément pour les heures de nuit (18 UTC à 05 UTC) et de jour (06 UTC à 17 UTC) pour la température de l'air sur la période 1986–2005 (période contrainte par la disponibilité des données AROME). Cette correction, définie sur la période historique, est alors appliquée pour modifier les distributions des variables en futur proche (2041–2050) et en futur lointain (2080–2099) par hypothèse de stationnarité de la fonction de correction.

Toutes les variables atmosphériques communes aux simulations AROME et la réanalyse SAFRAN sont corrigées :

- L'humidité spécifique de l'air
- Le cumul des précipitations solides et liquides
- La pression atmosphérique
- Le rayonnement longues longueurs d'onde
- Le rayonnement courtes longueurs d'onde (sans distinction entre rayonnement direct et rayonnement diffus)
- La température de l'air

Une fois corrigée, les températures de l'air au pas de temps horaire sont utilisées pour calculer les températures minimales (TN) et maximale (TX) journalières (minimum et maximum entre 00 UTC et 23 UTC).

4.3.3. Comparaison des températures journalières AROME corrigées à l'ensemble EURO-CORDEX

L'évolution au cours de la période des TN et TX AROME corrigées est comparée aux séries corrigées EURO-CORDEX (BD DRIAS) (Figure 1). On observe une bonne variabilité inter-annuelle simulée par AROME mais une légère sous-estimation des TN AROME en comparaison de l'ensemble EURO-CORDEX. Sur la période historique, cette différence pourrait être liée au choix de la période de référence pour la définition de la fonction de correction. La même sous-estimation apparaît encore plus en milieu de siècle mais pourrait être dû à la variabilité naturelle du climat et n'est pas forcément statistiquement robuste car la simulation ne couvre que 10 années. En fin de siècle, AROME est encore légèrement en dessous de la moyenne EURO-CORDEX mais rattrape l'ensemble en fin de période.

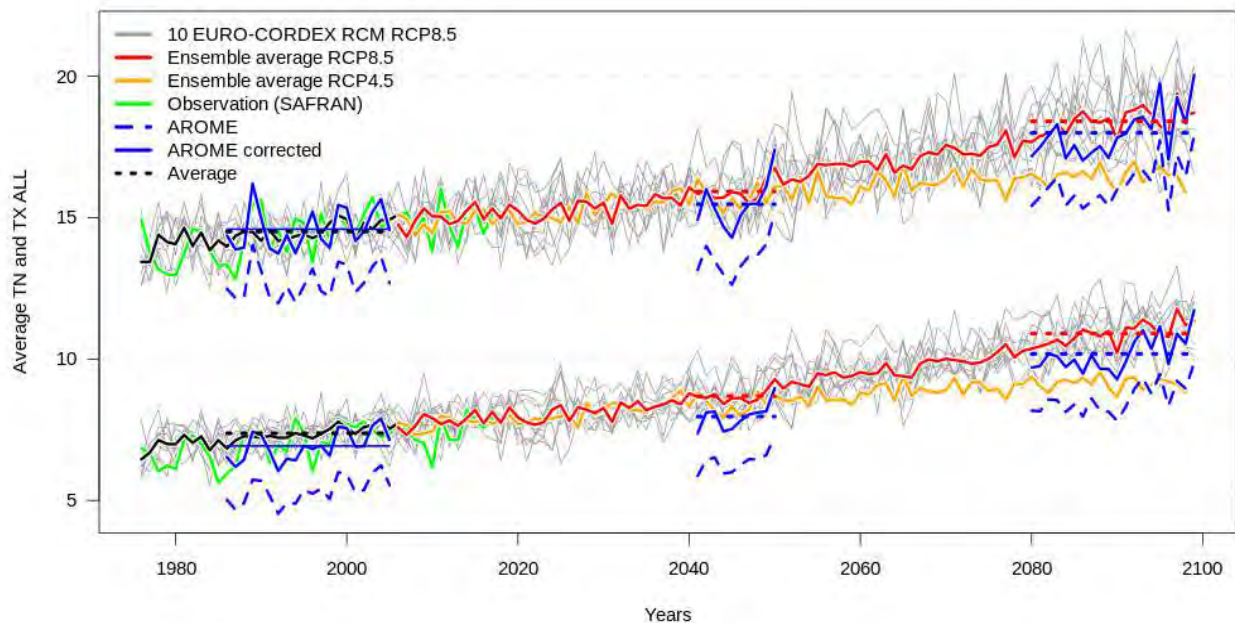


Figure 139: Moyennes annuelles des TN et TX de l'ensemble EURO-CORDEX DRIAS pour le scénario RCP8.5, de la réanalyse d'observations SAFRAN et d'AROME sur le point Chartres. AROME corrected correspond à une correction quantile-quantile de la température de l'air horaire par saison et différenciée entre le jour et la nuit.

4.4. Reconstruction d'une année typique en climat futur

L'approche d'un « Typical Meteorological Year » est choisie pour recréer une année considérée comme typique du climat futur (Hall et al., 1978). Le principe de l'approche consiste à extraire, pour un mois donné, l'année la plus « typique » pour ce mois particulier. Par exemple, à partir d'observations sur la période 1991–2020, le mois de janvier 1999 est le plus proche de la moyenne de tous les mois de janvier de la période, le mois de février 2004 le plus proche de la moyenne de tous les mois de février, etc. En concaténant les douze mois extraits, on obtient alors une série d'un an dont les moyennes mensuelles sont au plus proche des moyennes de la période.

Pour s'affranchir dans la mesure du possible des incertitudes liées à l'utilisation d'un seul modèle climatique (incertitude liée à la paramétrisation du modèle ou encore à la variabilité naturelle de la simulation sur des périodes de 10 et 20 ans) l'ensemble EURO-CORDEX est utilisé ici pour définir les conditions typiques en climat futur. Les mois AROME sont alors comparés à la moyenne de l'ensemble EURO-CORDEX.

La comparaison entre un mois AROME et la moyenne EURO-CORDEX est faite sur les données communes aux deux bases de données, à savoir les températures minimale (TN) et maximale (TX) journalières. Pour ne pas donner plus de poids aux TX qu'aux TN les températures sont préalablement normalisées par minimum-maximum :

$$T'_{yAvyC}(m) = \frac{T_{yAvyC}(m) - \text{MIN}(T_A(m), T_C(m))}{\text{MAX}(T_A(m), T_C(m)) - \text{MIN}(T_A(m), T_C(m))}$$

avec $T'_{yAvyC}(m)$ la moyenne normalisée de la température (T') pour le mois (m) et l'année (y) pour AROME (A) ou (v) EURO-CORDEX (C) et $T_A(m)$ et $T_C(m)$ les moyennes des températures non normalisées (T) de toute la période pour le même mois (m). Après normalisation toutes les moyennes des températures sont comprises entre 0 et 1.

L'année la plus proche de la moyenne EURO-CORDEX pour un mois (m) est alors déterminée par distance euclidienne (DE) :

$$DE_{mA,\bar{C}} = \sqrt{\left[\left(TN'_{mA} - \overline{TN'_C} \right)^2 + \left(TX'_{mA} - \overline{TX'_C} \right)^2 \right]}$$

avec mA un mois m pour AROME et C la moyenne de l'ensemble EURO-CORDEX (cf Figure 2 pour les 12 mois de l'année).

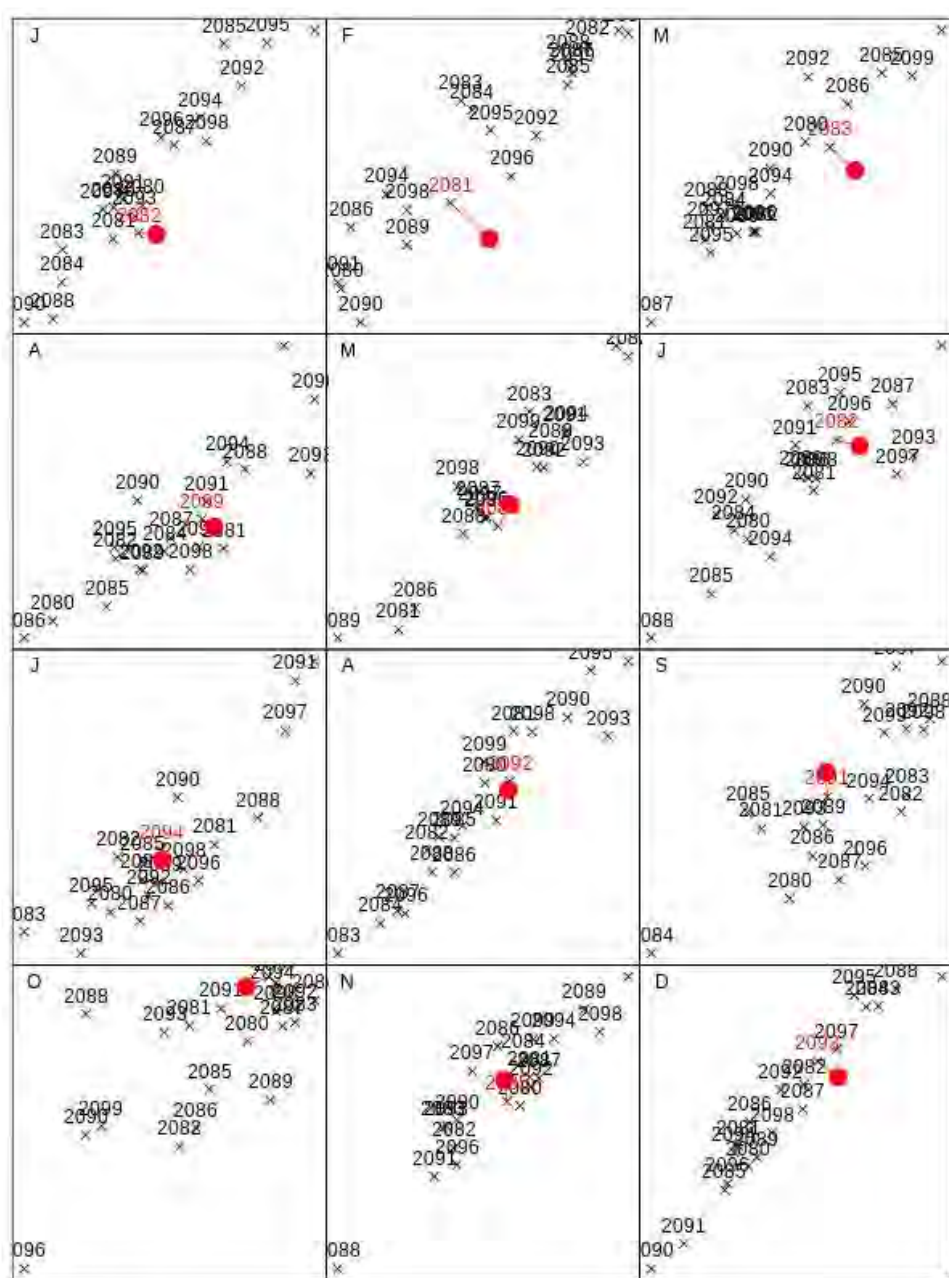


Figure 140: Comparaison des moyennes mensuelles normalisées en TN (abscisses) et TX (ordonnées) simulées par AROME (croix) sur la période 2080-2099 à la moyenne de l'ensemble EURO-CORDEX de la période 2070-2099 (point rouge). L'année AROME la plus proche est écrite en rouge.

Une fois que les douze mois les plus typiques sont sélectionnés et concaténés, on obtient une série temporelle horaire s'étendant sur toute une année et pour toutes les variables souhaitées (Figure 3). La transition entre les mois provenant d'années différentes pouvant faire apparaître des sauts importants, une moyenne glissante sur 5 jours est appliquée à chaque variable.

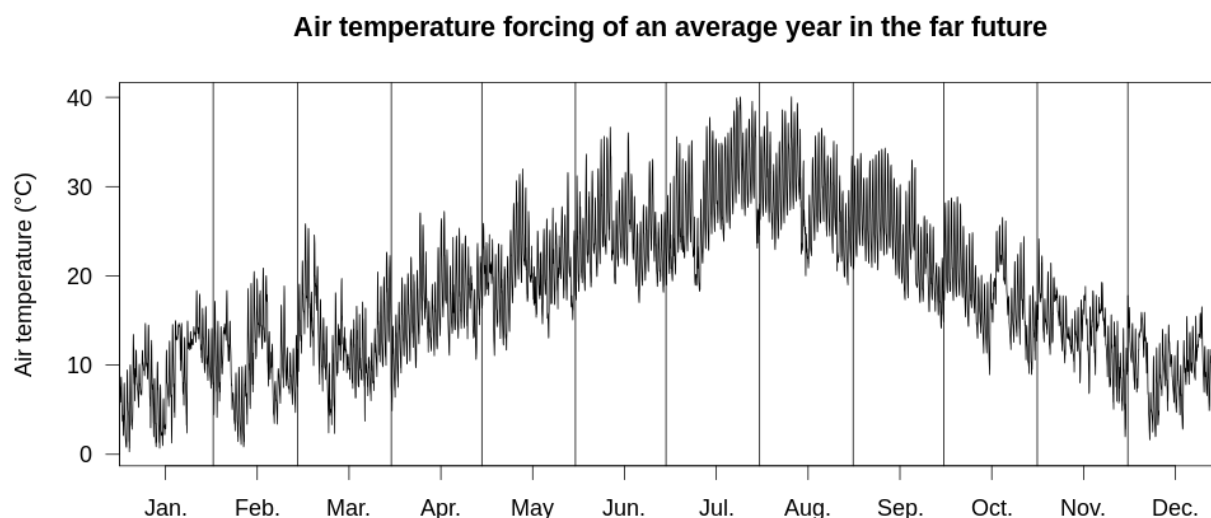


Figure 141: Série temporelle de la température de l'air reconstruite pour une année typique en climat futur lointain pour la station de Chartres.

4.5.Prise en compte d'évènements thermiques extrêmes : les vagues de chaleur

L'année moyenne reconstruite par la méthode « Typical Meteorological Year » permet de représenter les conditions climatiques futures moyennes tout en prenant en compte la variabilité inter-journalière. Cependant elle ne permet pas de prendre en compte des évènements extrêmes comme les vagues de chaleur, ou alors de manière très partielle, si par exemple des conditions de vagues de chaleur constantes en été deviendraient la norme en climat futur lointain.

Pour « rajouter » le signal d'une vague de chaleur sur l'année moyenne, une approche similaire à la méthode « Typical Meteorological Year » est proposée selon les étapes suivantes :

- le choix d'une définition de vague de chaleur ;
- l'extraction des vagues de chaleurs simulées par l'ensemble EURO-CORDEX ;
- l'extraction des vagues de chaleurs simulées par AROME ;
- la discrimination des types de vagues de chaleurs en fonction de leurs caractéristiques
- l'identification de la vague de chaleur simulée par AROME la plus proche de la vague de chaleur EURO-CORDEX d'intérêt

4.5.1. Définition d'une vague de chaleur

La définition et la méthode d'extraction des vagues de chaleur sont basées sur l'approche adoptée dans le projet VURCA (Lemonsu et al., 2014) : deux indices biométéorologiques (IB) sont définis comme étant la moyenne glissante sur 3 jours des températures quotidiennes maximales (TX) et moyennes (TM).

Une vague de chaleur est tout d'abord définie par un pic en température correspondant, pour un jour donné, à un dépassement de seuil des indices IBX et IBM. Les valeurs de ces seuils sont définies par département en fonction de données épidémiologiques. La durée de la canicule est définie ensuite en agrégeant les jours avant et après le pic, sous la condition que les séries temporelles d'IBX et IBM ne descendent pas durablement (c.-à-d. pendant plus de 2 jours consécutifs) en deçà du seuil en IBX et IBM

moins 2°C. Pour qu'un évènement soit considéré comme une vague de chaleur, la durée ainsi définie doit être de 3 jours minimum.

4.5.2. Caractéristiques des vagues de chaleur

La méthode d'extraction des vagues de chaleur permet de définir plusieurs caractéristiques en plus de la fréquence d'occurrence des évènements :

- le nombre de vagues de chaleur par an (-),
- la durée cumulée des vagues de chaleur par an (nombre de jours),
- la durée moyenne de chaque vague de chaleur par an (nombre de jours),
- l'intensité maximale de chaque vague de chaleur c.-à-d. TX maximale atteinte au cours de l'évènement (°C),
- l'intensité moyenne de chaque vague de chaleur.

Pour cette étude, deux indicateurs ont été choisis pour caractériser les vagues de chaleur : la durée de l'évènement et sa sévérité. La sévérité d'une vague de chaleur est définie comme étant le cumul des degrés passés au dessus du seuil moyen (IBM) multiplié par le nombre de jours de l'évènement.

A partir de ces deux indicateurs, deux types de vagues de chaleur sont définis :

- une vague de chaleur médiane qui correspond à la vague de chaleur simulée par AROME dont la durée (en nombre de jours) est la plus proche de la médiane des durées des évènements simulés par l'ensemble EURO-CORDEX et dont la sévérité est la plus proche de la médiane des sévérités des vagues de chaleur simulées par l'ensemble ;
- une vague de chaleur extrême qui correspond cette fois à la vague de chaleur la plus proche du quantile 95 de l'ensemble EURO-CORDEX.

4.5.3. Sélection d'un évènement AROME par comparaison à l'ensemble EURO-CORDEX

La Figure 4 représente les vagues de chaleurs simulées par AROME (en noir) et les vagues de chaleur simulées par l'ensemble EURO-CORDEX (en couleur). La durée des évènements est représentée en abscisses et leur sévérité en ordonnées. Les grands traits continus et pointillés représentent respectivement la médiane et le quantile 95 de l'ensemble EURO-CORDEX.

Pour pouvoir comparer les évènements AROME aux quantiles EURO-CORDEX choisis, les durées et sévérités de toutes les vagues de chaleur sont normalisées par minimum-maximum (comme au point 3). La distance entre un évènement AROME et le quantile EURO-CORDEX est ensuite mesurée encore une fois par distance euclidienne (Figure 5). Les tableaux 2 et 3 listent les dates de début et de fin et les durées des vagues de chaleur AROME extraites par la méthode en futur proche et lointain.

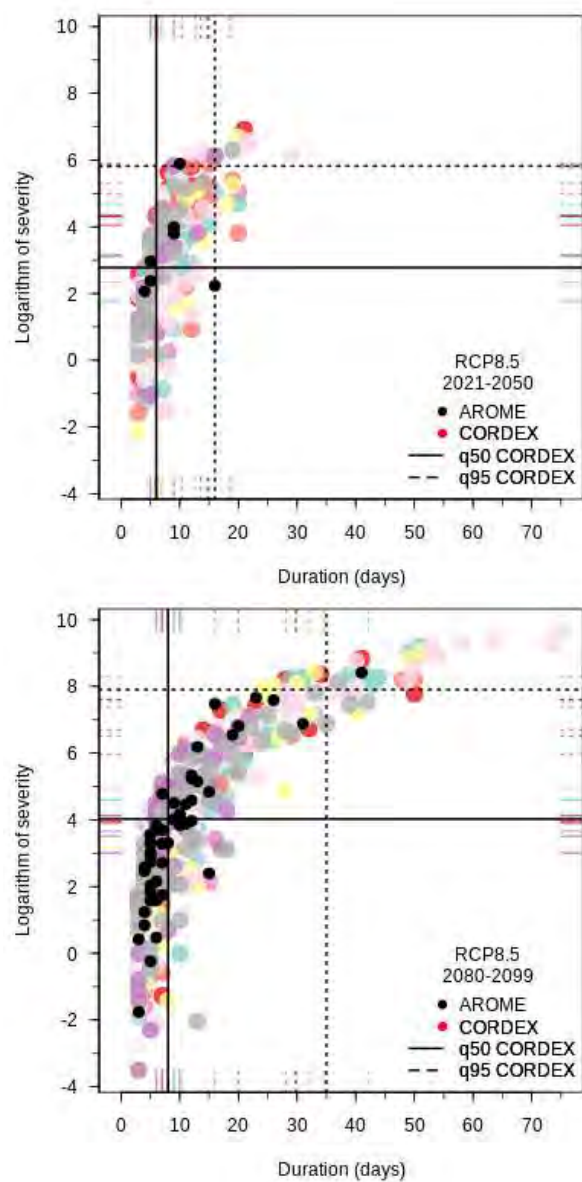


Figure 142 : Comparaison des vagues de chaleur simulées par AROME aux vagues de chaleur simulées par l'ensemble EURO-CORDEX (voir texte pour détails)

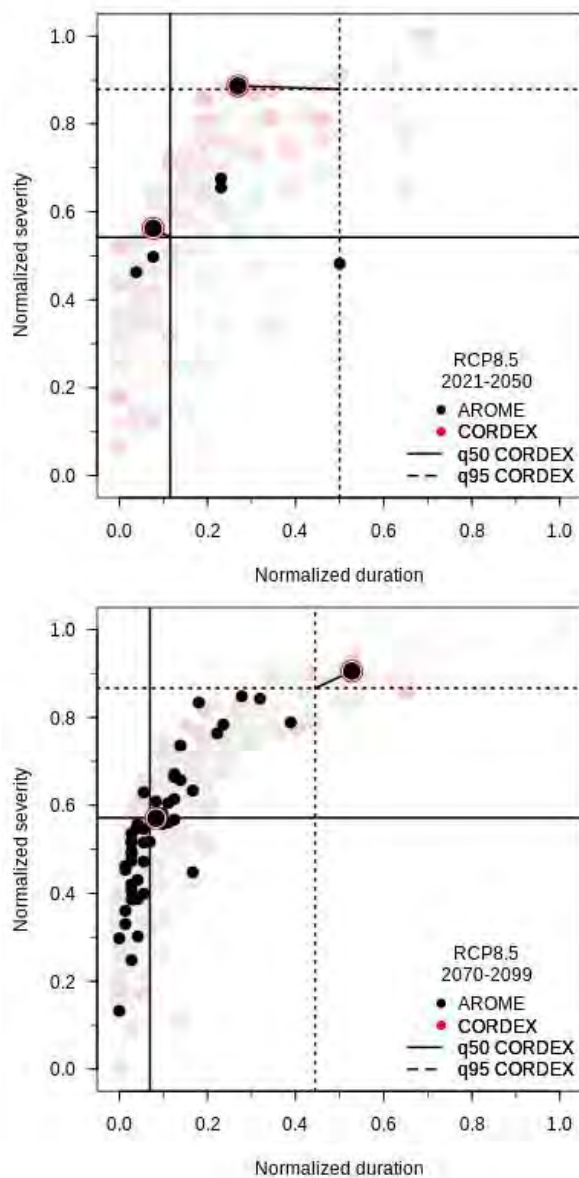


Figure 143: Même figure mais avec les axes normalisés

Table 2: Dates de début et de fin et durée des vagues de chaleur reconstruites pour la ville de Paris en futur proche et lointain

	Futur proche			Futur lointain		
	Début	Fin	Durée	Début	Fin	Durée
Médiane	28/08	01/09	5 jours	04/07	12/07	9 jours
Extrême	10/07	19/07	10 jours	16/07	25/08	41 jours

Table 3: Dates de début et de fin et durée des vagues de chaleur reconstruites pour la ville de Nîmes en futur proche et lointain. Les 10 années de simulation AROME en futur proche ne permettent pas de sélectionner une vague de chaleur considérée comme réellement extrême en comparaison de l'ensemble EURO-CORDEX, la vague de chaleur la plus extrême est quand même représentée.

	Futur proche			Futur lointain		
	Début	Fin	Durée	Début	Fin	Durée
Médiane	02/08	11/08	10 jours	28/07	11/08	15 jours
Extrême	29/07	06/08	9 jours	19/06	26/08	38 jours

4.5.4. Combinaison du signal de la vague de chaleur et de l'année typique

On souhaite maintenant « rajouter » la vague de chaleur aux séries horaires « moyennes » calculées précédemment. La méthode retenue pour combiner ces deux informations consiste à extraire les trois mois entourant la vague de chaleur d'intérêt et à les intégrer directement dans l'année « moyenne », et ce pour toutes les variables listées précédemment. Cette méthode permet de prendre en compte les conditions météorologiques précédant la vague de chaleur (et pouvant donc avoir une influence) et également celles qui la suivent, et semble plus robuste qu'une simple extraction de l'évènement. Les éventuels sauts entre les mois entourant la vague de chaleur sont lissés par moyenne glissante de 5 jours.

Les forçages météorologiques sont fournis au pas de temps horaire avec le mois, le jour et l'heure spécifiés. L'année est également indiquée mais n'a pas de réel sens. Elle correspond soit à l'année d'extraction du mois « moyen » considéré, soit à l'année d'extraction de la vague de chaleur. Cette information sur l'année est uniquement utilisée pour définir d'autres variables nécessaires aux simulations thermiques dynamiques (comme des variables astronomiques).

La figure 6 représente 4 séries temporelles de température de l'air reconstruites sur la ville de Paris (Chartres) pour deux horizons temporels (futur proche, première ligne ; futur lointain, deuxième ligne) et selon deux types de vagues de chaleur (médiane, première colonne ; extrême, deuxième colonne). Les zones colorées rouges en fond représentent les jours considérés comme étant en vague de chaleur : la méthode d'extraction et de reconstruction permet de rajouter plusieurs évènements dans une année, le rationnel derrière cette méthode est que ces évènements font partie des conditions météo-climatiques de l'année considérée et doivent être pris en compte pour assurer la robustesse de la vague de chaleur que l'on extrait.

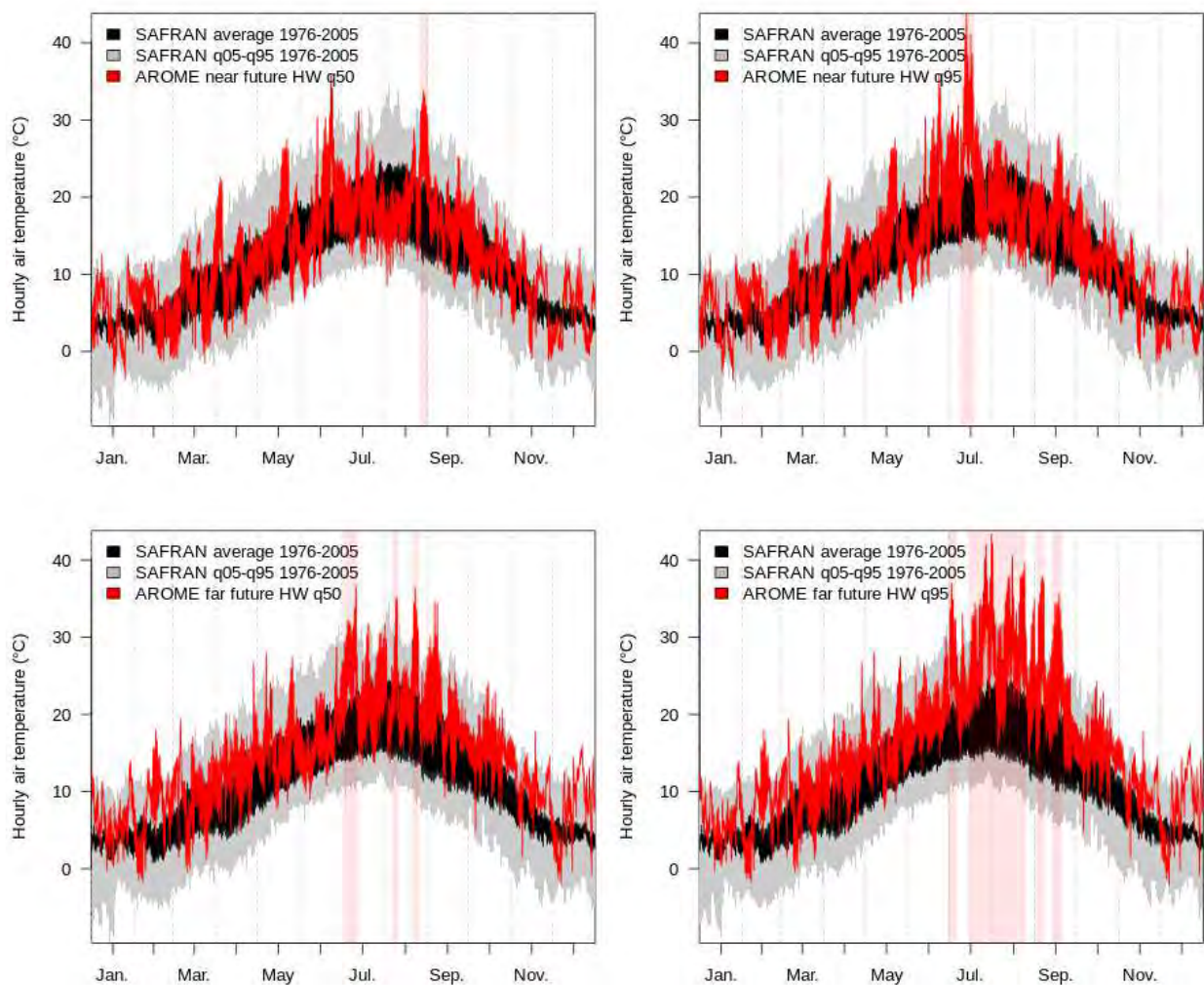


Figure 144: Séries temporelles des température de l'air reconstruites en futur proche et lointain et selon deux types de vagues de chaleur sur Paris. Comparaison à la moyenne des observations SAFRAN sur la période 1976

4.6. Données extraites et statistiques moyennes des années reconstruites

Toute la méthode d'extraction décrite précédemment est appliquée à toutes les variables atmosphériques disponibles dans la simulation AROME et qui sont nécessaires aux simulations dynamiques thermiques :

- l'humidité spécifique (huss)
- les précipitations solides et liquides (pr)
- la pression atmosphérique (ps)
- le rayonnement longues longueurs d'onde (rls)
- le rayonnement courtes longueurs d'ondes (rlds)
- la température de l'air (tas)
- les composantes zonale et méridienne du vent (uas et vas)
- l'intensité du vent (ff)
- la direction du vent (dd)
- l'humidité relative (hurs)

Sont également calculées des variables atmosphériques d'intérêt fournies par AROME :

- la composante directe du rayonnement courtes longueurs d'onde (rsdsdir)
- la composante diffuse du rayonnement courtes longueurs d'onde (rsdssca)

Ces variables sont calculées en suivant la méthode développée par Erbs et al. (1982) à partir du rayonnement solaire total incident (tsi) attendu en haut de l'atmosphère, de l'angle zénithal (sza) et du rayonnement courtes longueurs d'onde (rsds). L'angle zénithal (sza) est calculé à partir des fonctions *zenith* et *solar* du package R GeoLight (<https://cran.r-project.org/web/packages/GeoLight/GeoLight.pdf>) ; ces fonctions utilisent les mêmes méthodes que le calculateur de la NOAA (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>).

Les moyennes saisonnières (hiver et été) des différentes variables atmosphériques fournies sont présentées dans les tableaux suivants, pour les différentes années reconstruites :

- OBS2003 : Données de la réanalyse d'observations SAFRAN pour l'année 2003 à titre de comparaison
- FPHWM : Futur proche (2020-2049), vague de chaleur médiane
- FPHWE : Futur proche (2020-2049), vague de chaleur extrême
- FLHWM : Futur lointain (2070-2099), vague de chaleur médiane
- FLHWE : Futur lointain (2070-2099), vague de chaleur extrême

Table 4: Moyennes saisonnières des différentes variables atmosphériques pour le point de Paris centre (urbain) pour l'année 2003 (OBS2003), l'année en futur proche avec vague de chaleur médiane (FPHWM) ou extrême (FPHWE) et en futur lointain avec vague de chaleur médiane (FLHWM) ou extrême (FLHWE)

Saison	Variable	Unité	OBS2003	FPHWM	FPHWE	FLHWM	FLHWE
Hiver	huss	g/kg	4,42	5,11	5,11	5,82	5,82
	pr	mm/j	1,46	1,58	1,58	2,7	2,7
	rlds	W/m2	302,49	327,76	327,76	337,96	337,96
	rsds	W/m2	50,75	40,87	40,87	40,18	40,18
	rsdsdir	W/m2	16,5	32,75	32,75	30,23	30,23
	rsdssca	W/m2	34,26	14,68	14,68	16,26	16,26
	ff	m/s	3,6	3,16	3,16	3,37	3,37
	tas	°C	4,82	6,46	6,46	8,52	8,52
	tasmin	°C	2,67	4,2	4,2	6,1	6,1
	tasmx	°C	7,26	8,76	8,76	10,76	10,76
Été	huss	g/kg	9,84	9,8	9,41	10,8	12,42
	pr	mm/j	1,5	1,71	1,26	1,54	1,23
	rlds	W/m2	358,3	358,93	361,67	376,82	394,76
	rsds	W/m2	214,46	223,91	228,54	219,29	219,57
	rsdsdir	W/m2	67,52	111,73	108,68	108,52	106,06
	rsdssca	W/m2	146,94	128,13	135,08	125,4	127,91
	ff	m/s	2,74	3,01	2,98	2,72	2,75
	tas	°C	22,62	20,42	21,62	22,64	25,41
	tasmin	°C	18,22	16,35	17,1	18,61	21,23
	tasmx	°C	26,58	24,41	26,05	26,77	29,73

Table 5: Moyennes saisonnières des différentes variables atmosphériques pour le point de Paris Chartres (rural) pour l'année 2003 (OBS2003), l'année en futur proche avec vague de chaleur médiane (FPHWM) ou extrême (FPHWE) et en futur lointain avec vague de chaleur médiane (FLHWM) ou extrême (FLHWE)

Saison	Variable	Unité	OBS2003	FPHWM	FPHWE	FLHWM	FLHWE
Hiver	huss	g/kg	4,34	5,05	5,05	5,82	5,82
	pr	mm/j	1,58	1,46	1,46	2,32	2,32
	rlds	W/m2	298,79	323,49	323,49	335,37	335,37
	rsds	W/m2	51,64	40,99	40,99	40,5	40,5
	rsdsdir	W/m2	17,76	32,94	32,94	31,75	31,75
	rsdssca	W/m2	33,88	17	17	17,69	17,69
	ff	m/s	3,48	4,08	4,08	4,46	4,46
	tas	°C	3,21	4,98	4,98	7,16	7,16
	tasmin	°C	0,82	2,52	2,52	4,5	4,5
	tasmx	°C	5,77	7,56	7,56	9,71	9,71
Été	huss	g/kg	9,71	9,93	9,53	10,99	12,05
	pr	mm/j	1,37	1,72	1,44	1,69	0,86
	rlds	W/m2	355	357,45	358,71	374,09	390,94
	rsds	W/m2	227,91	224,62	233,32	217,02	221,09
	rsdsdir	W/m2	68,12	111,76	107,23	111,05	107,86
	rsdssca	W/m2	159,79	129,51	141,99	122,02	128,91
	ff	m/s	2,61	3,41	3,4	2,99	3,23
	tas	°C	21,08	18,8	20,06	20,67	24,51
	tasmin	°C	15,68	13,97	14,76	16,19	19,32
	tasmx	°C	26,14	23,33	25,39	25,19	29,73

Table 6: Moyennes saisonnières des différentes variables atmosphériques pour le point de Nîmes centre (urbain) pour l'année 2003 (OBS2003), l'année en futur proche avec vague de chaleur médiane (FPHWM) ou extrême (FPHWE) et en futur lointain avec vague de chaleur médiane (FLHWM) ou extrême (FLHWE)

Saison	Variable	Unité	OBS2003	FPHWM	FPHWE	FLHWM	FLHWE
Hiver	huss	g/kg	4,19	5,04	5,04	5,68	5,68
	pr	mm/j	2,86	2,04	2,04	1,42	1,42
	rlds	W/m2	285,14	306,46	306,46	315,9	315,9
	rsds	W/m2	71,2	77,05	77,05	77,77	77,77
	rsdsdir	W/m2	19,68	32,34	32,34	33,87	33,87
	rsdssca	W/m2	51,53	59,84	59,84	59,67	59,67
	ff	m/s	3,4	4,29	4,29	4,66	4,66
	tas	°C	5,93	7,51	7,51	9,63	9,63
	tasmin	°C	2,71	4,29	4,29	6,25	6,25
	tasmax	°C	9,88	11,18	11,18	13,45	13,45
Été	huss	g/kg	11,33	10,47	11,02	11,9	11,51
	pr	mm/j	0,39	0,55	1,23	1,22	0,57
	rlds	W/m2	374,95	370,06	370,68	382,43	399,44
	rsds	W/m2	270,12	269,64	270,25	273,13	279,14
	rsdsdir	W/m2	59,97	94,41	93,8	89,41	90,25
	rsdssca	W/m2	210,14	198,01	200,21	206,5	212
	ff	m/s	2,57	4,42	4	4,86	4,8
	tas	°C	26,2	24,7	24,49	26,52	29,54
	tasmin	°C	20,99	19,98	19,93	22,05	24,46
	tasmax	°C	32,31	30,1	29,74	31,79	35,43

Table 7: Moyennes saisonnières des différentes variables atmosphériques pour le point de Nîmes Pujaut (rural) pour l'année 2003 (OBS2003), l'année en futur proche avec vague de chaleur médiane (FPHWM) ou extrême (FPHWE) et en futur lointain avec vague de chaleur médiane (FLHWM) ou extrême (FLHWE)

Saison	Variable	Unité	OBS2003	FPHWM	FPHWE	FLHWM	FLHWE
Hiver	huss	g/kg	4,16	5,04	5,04	5,68	5,68
	pr	mm/j	3,34	2,04	2,04	1,42	1,42
	rlds	W/m2	287,46	306,46	306,46	315,9	315,9
	rsds	W/m2	70,65	77,05	77,05	77,77	77,77
	rsdsdir	W/m2	19,76	31,83	31,83	33,32	33,32
	rsdssca	W/m2	50,89	60,35	60,35	60,22	60,22
	ff	m/s	3,9	4,29	4,29	4,66	4,66
	tas	°C	5,56	7,51	7,51	9,63	9,63
	tasmin	°C	2,58	4,29	4,29	6,25	6,25
	tasmax	°C	9,35	11,18	11,18	13,45	13,45
Été	huss	g/kg	11,13	10,47	11,02	11,9	11,51
	pr	mm/j	0,36	0,55	1,23	1,22	0,57
	rlds	W/m2	374,46	370,06	370,68	382,43	399,44
	rsds	W/m2	265,23	269,64	270,25	273,13	279,14
	rsdsdir	W/m2	59,9	94,36	93,69	89,37	90,17
	rsdssca	W/m2	205,33	198,07	200,32	206,54	212,08
	ff	m/s	2,37	4,42	4	4,86	4,8
	tas	°C	26,09	24,7	24,49	26,52	29,54
	tasmin	°C	20,58	19,98	19,93	22,05	24,46
	tasmax	°C	32,86	30,1	29,74	31,79	35,43

5. Indicateurs de confort des mesures d'adaptation

5.1. Introduction

L'augmentation des températures impactée par les changements climatiques oblige le secteur de la construction à innover, à repenser la façon de concevoir et de réhabiliter les bâtiments de demain. Ce secteur recherche également des solutions techniques compétitives pour atteindre les objectifs de protection du climat comme ceux présentés par l'accord de Paris. C'est pourquoi, des outils d'aide à la conception ont été développés dans cet objectif. Ainsi, face au changement climatique, il convient d'utiliser ce type d'outil afin d'améliorer la résilience des bâtiments et donc, leur capacité à faire face à des crises telles que les canicules estivales. Il est en effet important pour le bien-être de tous d'être en capacité à maintenir une température acceptable à l'intérieur des bâtiments, zone où nous passons une grosse partie de notre temps.

L'objectif de ce projet « Resilience » est d'évaluer l'efficacité de différentes mesures d'adaptation (protections solaires, ventilation, matériaux...) en termes de réduction des risques de surchauffe liée au changement climatique. Cela a été réalisé pour différents types de bâtiments et un jeu de données climatiques élaboré par le CNRM, à l'horizon 2050 d'une part, et 2100 d'autre part. De nombreuses simulations numériques ont alors été effectuées avec le Module STD COMFIE de Pleiades afin d'étudier une grande quantité de variantes paramétriques correspondant aux mesures d'amélioration sur l'échantillon de bâtiments considéré, sur des échelles de temps variées (2050, 2100) ainsi que deux zones climatiques : Nîmes et Paris, avec ou sans îlot de chaleur, en milieu urbain ou rural.

Ce projet est coordonné par ARMINES et financé par l'ADEME, en collaboration avec le CEA, le CNRS, IZUBA Energies et Resallience by SIXENSE, une entreprise du groupe VINCI.

Concrètement, ce projet, d'une durée totale de trois ans, se compose des sept parties suivantes :

1. Etat de l'art et principaux choix méthodologiques,
2. Mesures in situ,
3. Elaboration de données climatiques prospectives,
4. Simulations thermo-aérauliques dynamiques (STD)
5. Analyse de cycle de vie (ACV)
6. Evaluations économiques,
7. Diffusion des résultats.

Dans ce rapport est présenté la partie 4. : Simulations thermo-aérauliques dynamiques. Ces simulations sont menées sur un total de huit bâtiments : 2 maisons individuelles, 3 logements collectifs, 2 écoles et les bureaux de Izuba.

5.2. Echantillon de bâtiments & Module de variation paramétrique

Dans le cadre du projet Résilience, huit bâtiments ont été sélectionnés : cinq bâtiments résidentiels, deux écoles et des bureaux.

Dans un premier temps au sein de cette partie II), vous retrouverez la présentation des bâtiments résidentiels. Dans un second temps, le module de variation paramétrique utilisé pour cette étude STD sera expliqué.

5.2.1. Les bâtiments résidentiels

Voici la liste des bâtiments résidentiels :

- Une Maison Neuve
- Une Maison des Années 50 (avec aussi sa variante « vieille maison »)
- Un HLM de Montreuil
- Un bâtiment Haussmannien
- Un logement collectif BBC

On retrouve donc deux logements individuels et trois logements collectifs. Ce sont tous de vrais bâtiments existants, leur label d'étiquette énergie issue d'un DPE est présenté dans le Tableau 11.

	Logements individuels	Logements collectifs
Label A	Maison Neuve, RT2012	Immeuble résidentiel basse consommation (BBC), 2016
Label G	Maison non isolée, 1950	- Bâtiment Haussmannien non rénové, 1880 - HLM non rénové, 1969

Tableau 11 : Présentation des bâtiments résidentiels choisis pour établir le projet Résilience

Les bâtiments choisis pour établir le label A ont un maximum d'isolation, du double ou triple vitrage. A l'inverse, les bâtiments choisis pour définir le label G ont peu d'isolation et des fenêtres à simple vitrage.

5.2.1.1. Logements individuels

Hypothèses communes

Deux types sont considérés : une maison construite avant la première réglementation thermique et une nouvelle construction soumise à la RT2012. Afin de définir une unité fonctionnelle pour la catégorie de logement individuel, nous définissons des hypothèses communes sur laquelle cette étude est fondée.

Des scénarios d'occultation des fenêtres et de ventilation nocturne sont présentés en fin de ce rapport, en dernière page, cf : **Erreur ! Source du renvoi introuvable. Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

Consigne de chauffage : 20°C constant tout au long de la journée, période de chauffage de la semaine 39 (24 Septembre) à la semaine 18 (06 Mai).

Nombre d'occupants :

Pour une maison de taille moyenne (environ 100 m²), le nombre d'occupants est de quatre. On le modélise donc par l'occupation de 3 adultes, on considère en effet que la chaleur dégagée par deux enfants est équivalente à celle d'un adulte (environ 90 W).

L'horaire de présence dépend de si la maison est modélisée par une seule zone de vie (regroupant toutes les pièces chauffées) ou si elle est subdivisée en une zone de jour (séjour, cuisine...) et une zone de

nuits (chambres...). Les horaires respectifs seront mentionnés plus en détail en Annexe pour chaque maison, cf **Erreur ! Source du renvoi introuvable. Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Apports internes de chaleur :

Le scénario d'apports internes pour une zone de vie représente un apport constant de 3 Watts par m². Si la maison est subdivisée en une zone de jour et une zone de nuit, alors les gains internes sont exclusivement dissipés dans la zone de jour.

A présent, vous retrouverez le détail des cinq maisons résidentielles.

a) Maison Neuve (Maison Pierre 5 - CEA)

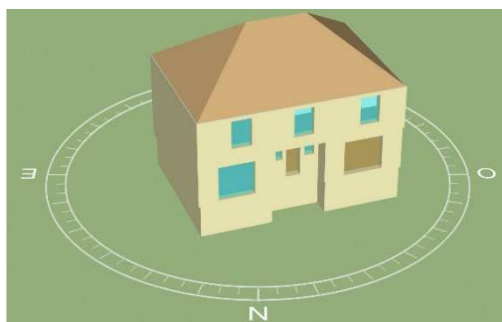


Figure 145 : Maquette 3D - Maison Neuve

La maison considérée dans cet échantillon est une maison neuve (RT2012) située à Villecresnes (94). La surface habitable est de 177 m² et nous considérons une famille de 4 occupants : 2 adultes et 2 enfants. La structure est en parpaing, on a des vitrages au nord et au sud, de l'isolation en polystyrène dans les murs et en laine de verre pour la toiture.

Taux de ventilation pour la maison :

1 vol/h en zone nuit et 0.5 vol/h en zone jour, incluant les infiltrations. Pour le Grenier et le Garage, on a 1 vol/h d'infiltration et 5 vol/h pour le vide sanitaire.

Ci-dessous, la liste des zones thermiques modélisées (cf Figure 146) :

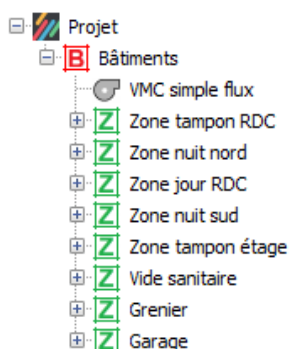


Figure 146 : Zones thermiques - Maison Neuve

b) Maison Phénix, Années 50

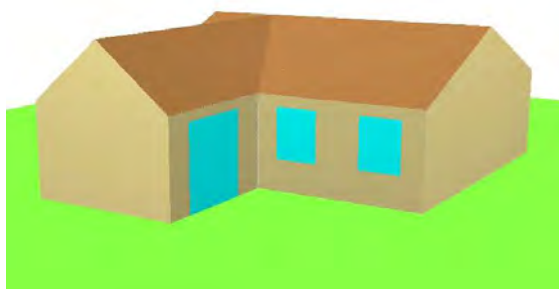


Figure 147 : Maquette 3D - Maison Années 50

La maison Phénix considérée dans cet échantillon a été construite en 1971 à Saint-Fargeau-Ponthierry en Ile-de-France. La surface habitable est de 86 m² et nous considérons 4 occupants. La structure est en acier, les murs sont constitués de plaques de béton mince et de plâtre avec une lame d'air centrale. Avant les travaux de rénovation, il n'y avait pas d'isolation et des fenêtres à simple vitrage.

Une isolation a été ajoutée dans la lame d'air. Il y a un grenier non chauffé, et une zone chauffée regroupant le salon, trois chambres, une salle de bains, une toilette, un dressing et une cuisine.

Enveloppe du bâtiment :

Murs	Panneaux 4.5 cm béton à l'extérieur et de plâtre à l'intérieur
Isolation des murs extérieurs	2 cm de polystyrène expansé avant rénovation
Isolation du toit	4 cm de laine de verre avant rénovation
Fenêtres	Fenêtres à simple vitrage avant rénovation

Tableau 12 : Enveloppe - Maison Années 50

Taux de ventilation pour la maison :

La ventilation est mécanique, le taux de renouvellement d'air est de 0.6 vol/h en incluant les infiltrations d'air. Une aération naturelle de 1 vol/h est considérée dans les combles.

Conditions aux limites :

Le rez-de-chaussée est situé au-dessus d'une cave non chauffée qui est ventilée et considérée à une température extérieure pour se ramener au cas plus représentatif du vide sanitaire ventilé. Il y a un espace tampon sous forme de grenier, donc le salon chauffé n'a pas de contact direct avec l'extérieur à travers le plafond.

Voici la liste des zones thermiques : (cf Figure 148)

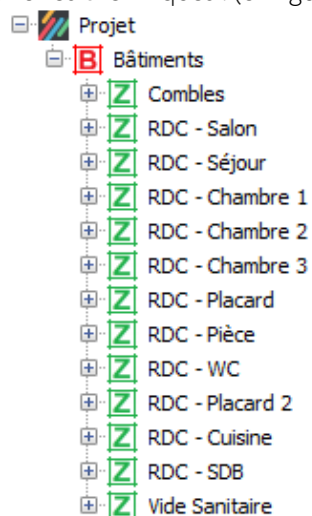


Figure 148 : Zones thermiques - Maison Neuve

5.2.1.2. Logements collectifs

Trois bâtiments sont considérés pour cette catégorie : un ancien bâtiment Haussmannien (date de construction vers 1880), un immeuble de logements sociaux construit dans les années 1960 (HLM) et une nouvelle construction de 2016 (label BBC). Afin de définir une unité fonctionnelle pour la catégorie des logements collectifs, nous définissons des hypothèses communes sur laquelle repose cette étude. En particulier, un scénario est défini concernant l'utilisation du bâtiment et la consigne de chauffage.

Hypothèses communes :

Des scénarios d'occultation des fenêtres et de ventilation nocturne sont présentés en fin de ce rapport, en dernière page, cf : **Erreur ! Source du renvoi introuvable. Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

Scénario d'utilisation : Les consommations d'énergie dépendent de l'utilisation des bâtiments, y compris du comportement de l'habitant. Des hypothèses communes sont donc choisies pour pouvoir comparer différents bâtiments dans le même échantillon de bâtiments.

Point de chauffage : 21°C constant tout au long de la journée, période de chauffage de la semaine 42 (15 Octobre) à la semaine 18 (06 Mai) pour BBC et Haussmannien. Pour Montreuil, on débutera en semaine 39 (24 Septembre) et on arrêtera le chauffage en semaine 18 également.

Nombre d'occupants :

A voir selon les bâtiments. Veuillez-vous reporter en **Erreur ! Source du renvoi introuvable. Erreur ! Source du renvoi introuvable..**, pour plus de détails.

Apports de chaleur internes :

L'utilisation d'appareils ménagers et d'éclairage induit la consommation d'électricité et la production de chaleur. Le scénario de gain de chaleur interne pour une zone d'appartements représente un apport constant de 5 Watts par m², ce qui correspond à environ 3000 kWh par an pour un logement moyen de 70m² et une famille de 4 personnes.

Ventilation :

Détaillée dans chaque description du bâtiment. Voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable. Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour la ventilation nocturne.

a) BBC :

La résidence « Les Roches Blanches », construite en 2016, est située à Jacob Bellecombette à côté de Chambéry en Savoie. Elle se compose de deux bâtiments à basse consommation énergétique, chacun avec 4 étages et 17 appartements de différentes tailles. La structure est en béton avec une isolation par l'extérieur. La durée de vie considérée est de 100 ans et la surface habitable est de 2414 m².



Figure 149 : Maquette 3D – BBC

Enveloppe du bâtiment :

Structure	Béton (murs 16 cm, planchers 20 cm)
Isolation des murs extérieurs	18 cm de laine de roche

Isolation du toit	30 cm de mousse de polyuréthane
Isolation du sol	10 cm de laine de roche et 3.3 cm de polyuréthane
Fenêtres	Double vitrage à basse émissivité

Tableau 13 : Enveloppe – BBC

Conditions aux limites :

Les habitations situées du côté nord du rez-de-chaussée sont situées au-dessus d'un parking extérieur (cf Figure 150). D'autres appartements au rez-de-chaussée sont en contact avec des espaces communs souterrains pour certains d'entre eux, et d'autres sont situés directement au-dessus du sol en fonction de la pente.



Figure 150: Coupe transversale des bâtiments Les Roches Blanches – Façade Nord

Système de chauffage et d'ECS :

Chauffage électrique direct

Eau chaude sanitaire : ballon électrique

Ventilation :

Infiltration = 0.15 vol/h

Ventilation hygroréglable dans tous les logements : T2 : 40.40 m³/h soit environ 0.28 vol/h, T3 : 56.50 m³/h soit environ 0.30 vol/h, T4 : 59.20 m³/h soit environ 0.28 vol/h, T5 : 61.60 m³/h soit environ 0.21 vol/h.

L'unité fonctionnelle de ce bâtiment peut donc être décrite comme suit :

Un immeuble résidentiel collectif abritant 0,04 occupant par m² de plus de 100 ans, selon le calendrier d'utilisation décrit ci-dessus. Afin de comparer les bâtiments avec différentes surfaces, le flux de référence correspond à une surface nette de 1 m² et à un an.

Zones thermiques : Le bâtiment est découpé en 36 zones, 34 appartements et 2 zones comprenant des pièces intermédiaires, tels que des escaliers par exemple.

b) Haussmannien :

Le bâtiment Haussmannien est un immeuble parisien typique, construit à la fin du XIXe siècle. Il a des murs en pierre calcaire, et pas d'isolation thermique. Il y a sept niveaux : les boutiques occupent le rez-de-chaussée, et les autres étages sont des appartements de différentes tailles. La durée de vie considérée est de 200 ans, et la surface habitable du bâtiment étudié est de 1346 m².

Dans ce projet, le rez-de-chaussée est considéré comme inoccupé et non chauffé, afin d'évaluer l'unité fonctionnelle du logement.

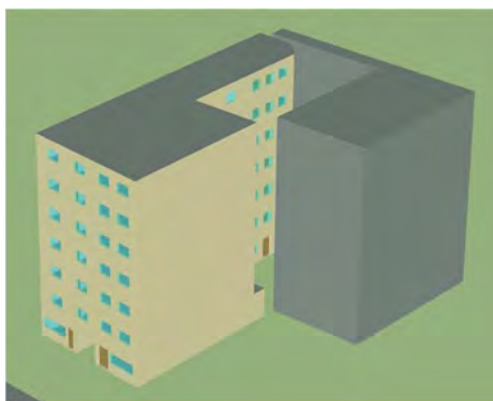


Figure 151 : Maquette 3D - Haussmannien

Enveloppe du bâtiment :

Murs	Pierre calcaire (20 cm)
Isolation des murs extérieurs	Pas d'isolation
Isolation du toit	Pas d'isolation
Isolation du sol	Pas d'isolation
Fenêtres	Double vitrage

Tableau 14 : Enveloppe - Haussmannien

Débit de ventilation pour les appartements :

Construction ancienne avant tout travaux de rénovation : un taux de renouvellement d'air de 0,6 vol/h (y compris l'infiltration d'air) est considéré.

Conditions aux limites :

Le rez-de-chaussée est situé au-dessus de caves non chauffées qui sont ventilées et considérées à une température extérieure. Aucun espace tampon n'est considéré sous le toit, de sorte que le plafond du dernier étage est considéré comme un toit.

Système de chauffage :

Selon l'Atelier Parisien d'Urbanisme, les bâtiments haussmanniens sont chauffés à 60% par le gaz (moitié des systèmes individuels et demi collectifs), 30% par l'électricité et 10% par le chauffage urbain.

L'unité fonctionnelle de ce bâtiment peut donc être décrite comme suit :

Un immeuble résidentiel collectif abritant 0,04 occupant par m² sur une durée de 200 ans, selon le scénario d'utilisation décrit ci-dessus. Afin de comparer les bâtiments avec différentes surfaces, le flux de référence correspond à une surface nette de 1 m² et à un an.

Zones thermiques :

Ci joint, le découpage des zones thermiques : (cf Figure 152)

Dans un étage donné il y a deux appartements de 06 occupants chacun.

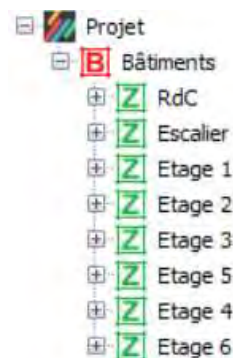


Figure 152 : Zones thermiques - Haussmannien

c) HLM Montreuil :

Ce bâtiment de 52 logements, construit en 1969, est situé à Montreuil (93). Il comporte 4 étages et comme le terrain est incliné, deux niveaux de rez-de-chaussée qui sont inoccupés. La structure est en béton, sans isolation et les fenêtres sont à simple vitrage avant les travaux de rénovation. La durée de vie considérée est de 100 ans, et la surface habitable est de 4588 m².



Figure 153 : Maquette 3D HLM

Enveloppe du bâtiment :

Structure (murs, planchers, toiture)	20 cm Béton
Isolation des murs extérieurs	0 puis 10 cm de laine de verre
Isolation du toit	5 cm de polyuréthane
Isolation du sol	Pas d'isolation
Fenêtres	Simple puis Double vitrage à faible émissivité

Tableau 15 : Enveloppe – Montreuil

Débit de ventilation pour les appartements :

Construction ancienne avant tout travaux de rénovation : un taux de renouvellement d'air de 0,6 vol/h est considéré (y compris l'infiltration d'air).

Conditions aux limites :

Le premier rez-de-chaussée est situé au-dessus de caves non chauffées qui sont ventilées et considérées à une température extérieure. Le dernier étage est situé sous une toiture terrasse.

Système de chauffage et d'eau chaude domestique :_chauffage urbain

Le mix énergétique pour le chauffage urbain de Bagnolet est de 57% de biomasse bois et 43% de Gaz Naturel.

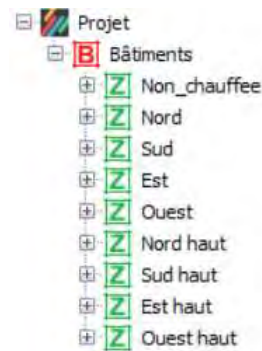
L'unité fonctionnelle de ce bâtiment peut donc être décrite comme suit :

Un immeuble résidentiel collectif abritant 0,04 occupant par m² pendant 100 ans, selon le calendrier d'utilisation décrit ci-dessus. Afin de comparer les bâtiments avec différentes surfaces, le flux de référence correspond à une surface nette de 1 m² et à un an.

Zones thermiques :

Ci-joint, les zones thermiques : (cf Figure 154)

Figure 154 : Zones thermiques
- Montreuil



5.2.2. Bâtiments tertiaires

5.2.2.1. Bâtiment de bureaux

a) Bâtiment de bureaux IZUBA

Le bâtiment de bureaux Izuba est situé dans l'Ecoparc de Fabrègues, près de Montpellier (34). Construit en 2015, ce bâtiment est le siège de la société Izuba énergies. Il dispose de deux niveaux et comprend des bureaux, une salle de réunion, un espace de rangement, une salle de serveurs, une cuisine et une salle de formation. La surface utile totale est d'environ 425 m².

Enveloppe du bâtiment



Figure 155 : Photo bâtiment de bureaux Izuba

Structure	Bois
Isolation des murs extérieurs	37 cm de paille
Isolation du toit	37 cm de paille
Isolation du sol	11 cm de polystyrène extrudé
Fenêtres	Double vitrage à faible émissivité

Tableau 16 : Enveloppe bâtiment bureaux Izuba

Consigne de chauffage : 19 °C tout au long de la journée de 7 h à 19 h, réduite à 17 °C pendant la nuit et les week-ends. La période de chauffage s'étend de la semaine 42 (15 octobre) à la semaine 18 (6 mai).

Consigne de refroidissement : 26 °C constant de 7 h à 19 h, du lundi au vendredi. La période de refroidissement s'étend de la semaine 16 (16 avril) à la semaine 39 (30 septembre).

Nombre d'occupants :

Le bâtiment de bureaux comporte 18 postes de travail. L'occupation est décrite par plusieurs scénarios selon la taille et la fonction de la pièce. Il y a onze bureaux d'une personne, deux bureaux de 2 personnes, un bureau de 3 personnes, une cuisine (10 places), une salle de réunion (occupation négligée) et une salle de formation (14 occupants).

Systèmes photovoltaïques :

Ce bâtiment comporte un système photovoltaïque, avec des modules monocristallins X20-327-COM de marque Sunpower qui ont les caractéristiques suivantes :

- Puissance nominale : 327 Wc
- Dimensions (mm) : 1559 x 1046 x 46

La puissance nominale de ce système est de 28,8 kWc (144 m²) avec 88 modules. Le système est simulé avec un onduleur de 90 % de rendement. Cette installation est montée sur le toit plat et produit 38 200 kWh d'énergie électrique par an.

Systèmes :

Chauffage : PAC géothermique (rendement : 0,82)

Refroidissement : PAC géothermique, EER = 2,5
Système d'émission : plancher chauffant ou rafraîchissant (selon la saison).

Débit de ventilation :

Chaque zone thermique a un scénario de ventilation différent, lié à l'occupation de la pièce. Néanmoins, ils présentent une structure commune : un scénario de ventilation annuel définissant l'utilisation de deux horaires hebdomadaires (l'un pour l'été et l'autre pour la période hivernale). En outre, afin de rafraîchir le bâtiment en été, toutes les fenêtres sont ouvertes pendant la nuit ce qui est modélisé par un scénario de surventilation (débit d'air de 3 vol/h) à partir de la semaine 20 (14 mai) et se terminant la semaine 39 (30 septembre).

Zones thermiques :

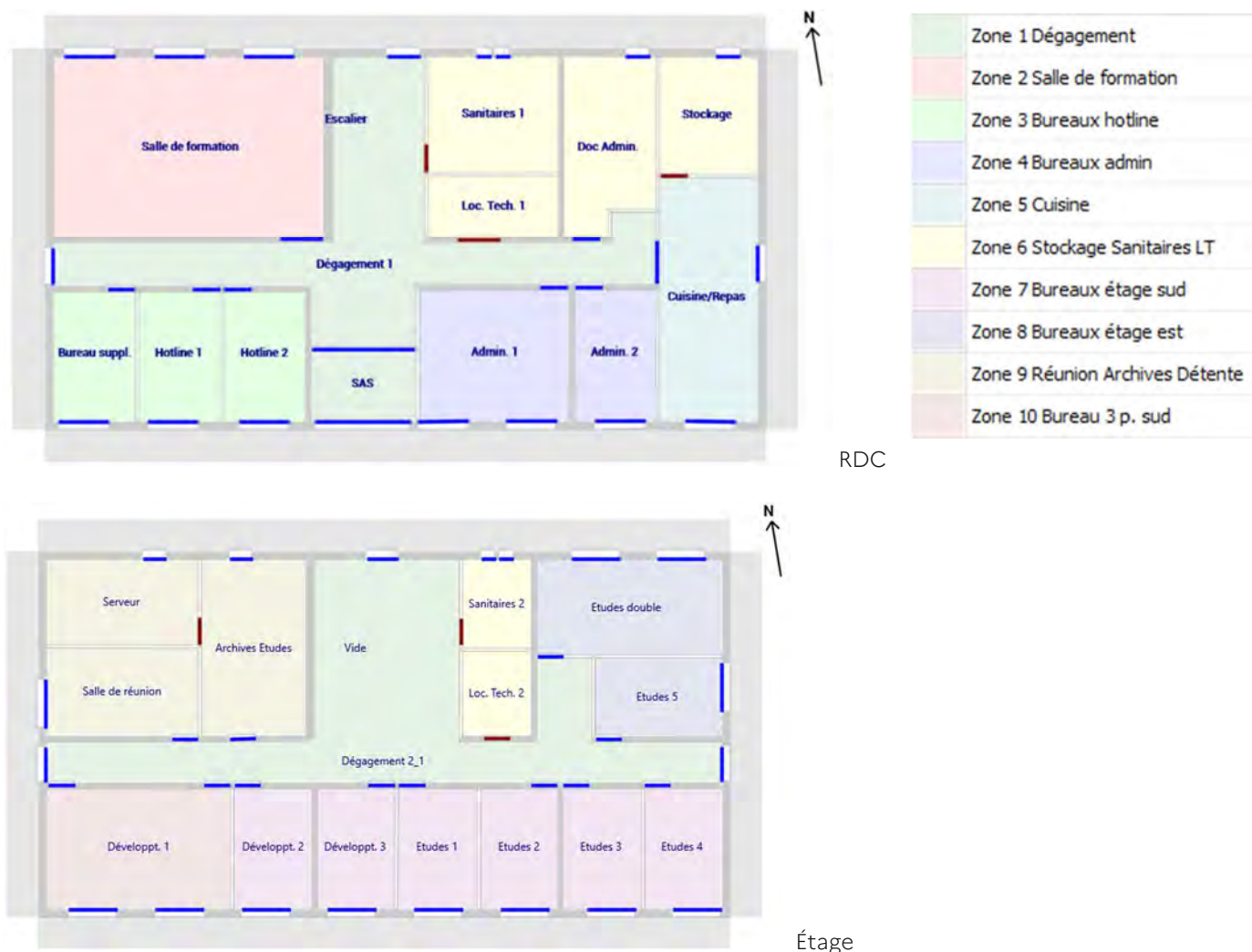


Figure 156 : Zonage thermique bâtiment bureaux Izuba

Les zones où la problématique du confort est la plus notable sont les zones de bureau et la salle de formation. En pratique, c'est la zone 10 Bureau 3 p. sud qui est la plus sujette à l'inconfort d'été. Elle est prise pour référence par la suite.

b) Bureaux anciens

Le bâtiment de bureaux anciens est une version dégradée du bâtiment de bureaux d'Izuba. Les modifications apportées sont les suivantes :

- Performances thermiques de l'enveloppe très dégradées (voir ci-dessous)
- Taille de menuiseries augmentée
- Protection solaire par stores intérieurs
- Pas de ventilation double flux : ventilation par ouverture des fenêtres

Ce bâtiment a été simulé pour compléter les résultats obtenus sur le bâtiment neuf, déjà très bien conçu vis-à-vis du confort d'été. Cette version dégradée permet de caractériser les possibilités d'amélioration d'un bâtiment existant aux performances thermiques initiales passables.

Enveloppe du bâtiment

Structure	Bois
Isolation des murs extérieurs	Pas d'isolation
Isolation du toit	3cm de laine de verre
Isolation du sol	Pas d'isolation
Fenêtres	Simple vitrage

Tableau 17 : Enveloppe bâtiment de bureaux ancien

Consigne de chauffage et refroidissement : Identique aux bureaux neufs.

Nombre d'occupants : Identique aux bureaux neufs.

Systèmes : Identique aux bureaux neufs.

Débit de ventilation : La ventilation des bureaux se fait par ouverture des fenêtres.

Zones thermiques : Identique aux bureaux neufs.

5.2.2.2. Bâtiments d'enseignement

a) Ecole ancienne



Figure 157 : photos école ancienne

Cette école a été construite dans les années 1960. Elle est située à Fabrègues dans l'Hérault. Elle est constituée de 3 classes, 1 salle polyvalente et des locaux annexes (bureau, sanitaires), en rez-de-chaussée. La surface totale est d'environ 450 m².

Enveloppe du bâtiment

Structure	Béton
Isolation des murs extérieurs	Non isolée
Isolation du toit	5 cm laine de verre
Isolation du sol	Dalle béton non isolée
Fenêtres	Menuiseries aluminium double vitrage Menuiseries bois simple vitrage

Tableau 18 : Enveloppe école ancienne

Consigne de chauffage :

20 °C constant tout au long de la journée de 7 h à 18 h, période de chauffage de la semaine 40 (1^{er} octobre) à la semaine 19 (13 mai). Température réduite de 19 °C constante pendant la nuit, les week-ends et les vacances scolaires.

Nombre d'occupants :

27 enfants sont présents dans chaque classe, aux horaires scolaires : 9 h-12 h et 14 h-16 h, 4 jours par semaine. La salle polyvalente est utilisée :

- pour les temps périscolaires : 7 h-9 h, 12 h-14 h (5 enfants), 16 h-18 h. (arrivées et départs progressifs de 10 à 30 enfants)
- pour un accueil pendant les vacances : du lundi au vendredi de 14 h à 19 h (30 jeunes) et le mercredi et le vendredi de 19 h à minuit (15 jeunes).

Systèmes :

Chauffage : radiateurs à eau chaude alimentés par une chaudière gaz. Loi d'eau et ralenti en dehors des jours de classe.

Débit de ventilation :

La ventilation des classes se fait par ouverture des fenêtres. Dans les sanitaires, trois conduits de ventilation débouchent pour partie directement dans les combles. Trois autres conduits aboutissent à une souche en toiture.

Zones thermiques :

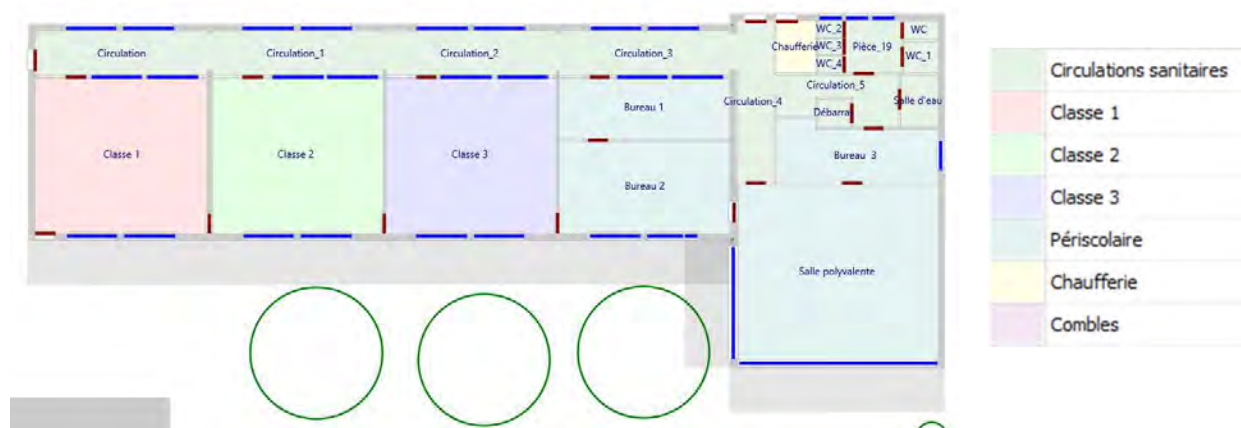


Figure 158 : modélisation école ancienne

Les zones observées sont les trois salles de classe et la zone Péricolaire qui est aussi utilisée durant les vacances et en particulier en plein été.

b) École neuve

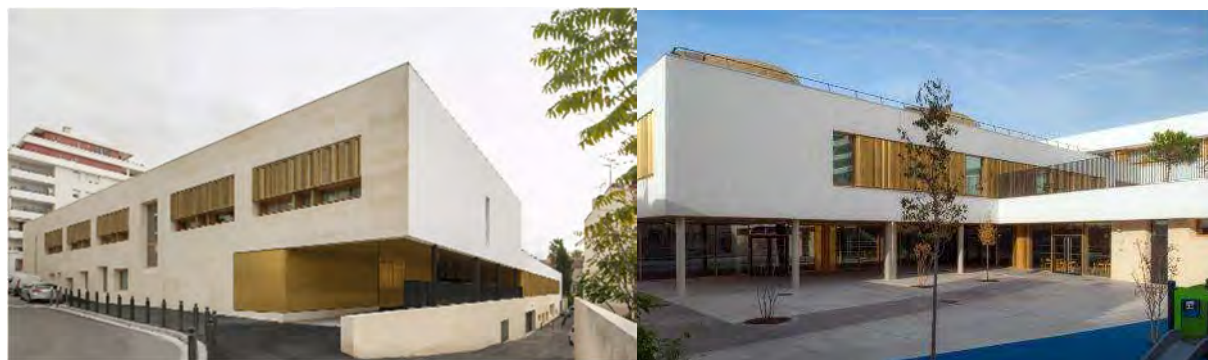


Figure 159 : Photos école nouvelle (architectes Cactus)

Cette école a été livrée en 2017. Elle est située à Marseille dans les Bouches-du-Rhône. Elle est constituée de 9 classes élémentaires, de 5 classes maternelles. Elle est aussi utilisée comme centre aéré pour 80 enfants durant les périodes de vacances. Elle comporte aussi un parking sous-terrain, une cantine, un logement pour le gardien. La surface totale est d'environ 2 600 m². Ce bâtiment comporte 3 niveaux. Comme il est située sur une parcelle en pente, le niveau -1 est semi-enterré. L'accès piéton se fait depuis la rue par le niveau 0 (cf. Figure 159).

Enveloppe du bâtiment

Structure	Béton
Isolation des murs extérieurs	20 cm laine de bois intérieure
Isolation du toit	22 cm polyuréthane en toit terrasses 30 cm laine de bois + 5 cm laine de roche en toit en pente
Isolation du sol	12 cm de polyuréthane sous chape
Fenêtres	Ouvrants à la française bois double vitrage Murs rideaux alu double vitrage

Tableau 19 : Enveloppe école nouvelle

Consigne de chauffage : 21 °C dans les salles de classes, 19 °C dans les bureaux et réfectoire, 18 °C dans les circulations, 16 °C dans les sanitaires en journée. Ralenti à 16 °C la nuit. Période de chauffage du 1^{er} novembre au 30 avril. Température réduite de 17 °C constante pendant la nuit et les week-ends.

Nombre d'occupants :

L'école accueille 400 élèves et 20 adultes. Les horaires scolaires, vacances scolaires et utilisation des locaux pour les temps périscolaires sont pris en compte dans les scénarios d'occupation.

Systèmes photovoltaïques :

Ce bâtiment comporte un système photovoltaïque, d'une puissance totale de 120 kWc. La production annuelle estimée est de 151 MWh.

Systèmes :

Chauffage : Chaudières gaz condensation bas NOx

Emission par le radiateur basse température et planchers chauffants au niveau 0 et salle de motricité.

ECS : production décentralisée par ballons électriques.

Débit de ventilation :

Ventilation simple flux des salles de classe : extracteur de confort sur horaires scolaires. (400 m³/h par classe)

Ventilation simple flux permanente en sanitaires et cuisines.

Ventilation double flux pour chaque salle à manger. (2000 et 2400 m³/h)

Zones Thermiques :

Le zonage réalisé comporte 32 zones qui ne sont pas détaillées ici. Les zones qui sont observées sont les salles de classe, les bureaux, la bibliothèque de l'école élémentaire, les zones d'activité (scolaire ou périscolaire) et les salles de restauration. Les zones d'activités périscolaires sont les zones N0 07 Salle poly, N0 08 Elem Biblio et N0 26 Mat Bureaux, marquées d'une croix orange sur la Figure 161).

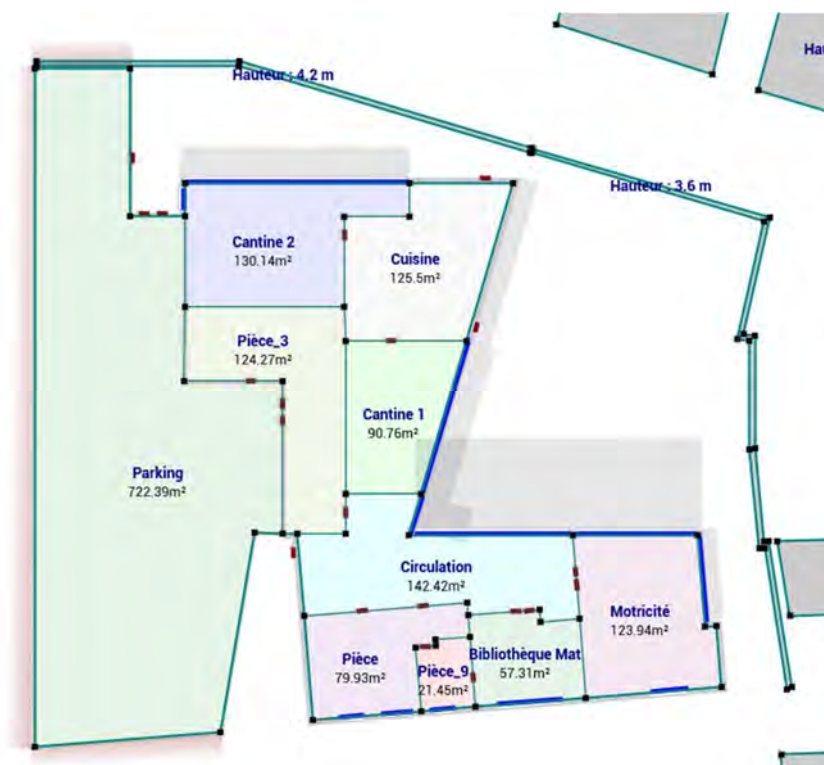


Figure 160 : modélisation école neuve, niveau -1

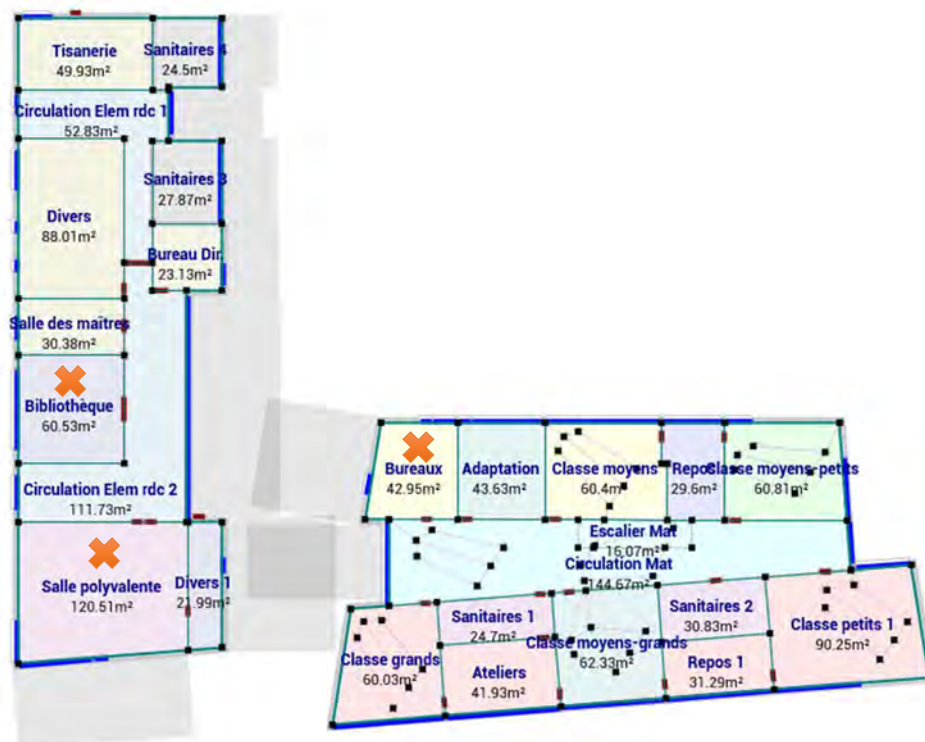


Figure 161 : modélisation école neuve, niveau 0



Figure 162 : modélisation école neuve, niveau 1



Figure 163 : modélisation école neuve, vue générale 3D depuis l'ouest

5.2.3. Module de variation paramétrique : Python, Amapola

Dans le cadre de ce projet, un module de variation paramétrique a été développé sous Python. Ce dernier exécute la Blackbox STD de Pleiades pour lancer une optimisation STD sous l'outil Amapola.



L'objectif de ce dernier étant de pouvoir obtenir rapidement des résultats de confort pour cinq épaisseurs d'isolants et trois types de vitrage. A partir d'un échantillon de bâtiments réels, nous avons en effet tenu à faire varier l'isolation des bâtiments de l'étude. Par conséquent, on s'intéresse, sur cet échantillon plus large, à savoir comment ces bâtiments vont se comporter face aux canicules, en fonction de leur niveau d'isolation, et en retour, trouver des solutions pour améliorer leur résilience.

En partant d'un code python déjà fonctionnel issu de l'entreprise Kocliko, ce dernier a été adapté par le CES pour introduire les éléments ci-dessous :

- Extraction de la température extérieure depuis un fichier météo
- Calcul d'une moyenne glissante de la température extérieure (Text) sur 24h
- Calcul de la température seuil de confort à partir de cette moyenne : entre 28°C et 30 °C, comme définie en : Confort adaptatif - RE2020Figure 166.
- Calcul des heures d'inconforts chauds adaptatifs
- Calcul des degrés heures (DH), en °C.h
- Affichage automatique d'un graphique avec les DH ou heures d'inconforts, et ce, pour 15 variantes de simulations (cf exemple : Figure 165)

Par exemple, voici-ci-dessous un extrait de quelques lignes de codes qui permettent le calcul des degrés heures :

```

162 #Calcul des degrés heures (DH)
163 j=0
164 DH=[]
165 for i in range(len(list_variants)-2):
166     cmpt=0
167     DH.append(0)
168     deltaT=[]
169     for j in range(8736):
170         deltaT.append(0)
171         deltaT[j]=Tint[i][j]-Tseuil_chaud[j]
172         if(deltaT[j]>=0.0 and Occupation[i][j]!=0.0):
173             cmpt=cmpt+deltaT[j]
174     DH[i]=cmpt

```

Figure 165 : Calcul sous Python des DH

Comme le montre la Figure 165, on initialise dans un premier temps les compteurs « j » et « cmpt ». De même, on crée une liste « DH » et « deltaT » qui sont vides initialement. Ensuite, on somme sur l'ensemble des données horaires de l'année : il y a 8736 et non 8760 données car il manque le dernier jour du mois de Décembre dans « Tint », cela n'a aucune incidence sur le calcul comme il ne fait jamais plus de 28 degrés Celsius un 31 Décembre. Dans cette sommation, on ajoute les DH à travers la variable « cmpt ». Comme le montre la ligne 172 en Figure 165, on tient bien compte de l'occupation des individus : on ne retiendra pas les DH sur des heures non occupées.

La liste « Tseuil_chaud » a été calculée à partir du graphique suivant (Figure 166) et selon la comparaison avec la température extérieure en moyenne glissante, définie selon la RE2020 (ancienne version) :

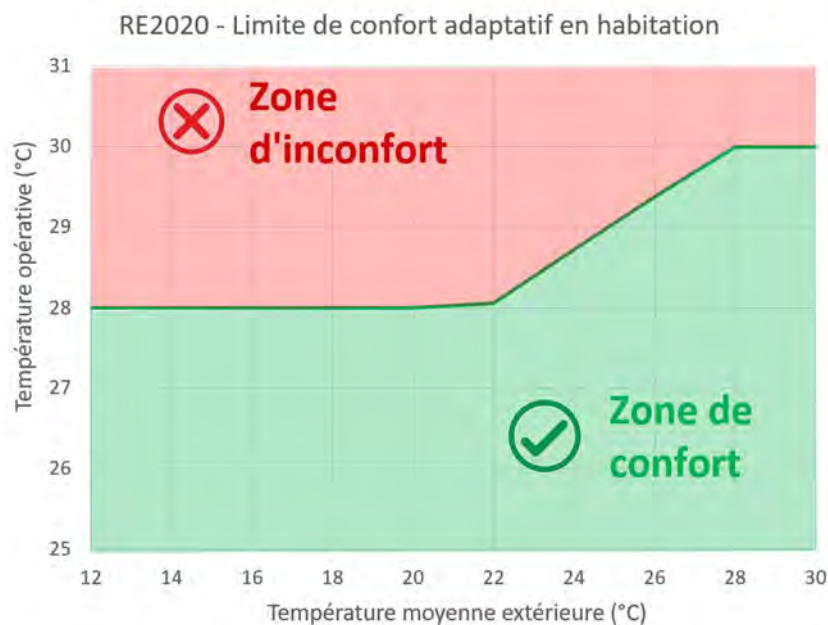


Figure 166 : Confort adaptatif - RE2020

La réglementation RE2020 a changé entre temps et le seuil de température d'inconfort chaud est passé à 26/28°C. Le nombre de DH est donc moins élevé dans notre étude que s'il avait été calculé sur la base de la RE2020.

Pour le reste du code python, veuillez-vous reporter à l'annexe, partie **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

5.2.4. Données météorologiques

5.2.4.1. Origine des données

L'analyse des données climatiques régionales s'appuie sur les projections climatiques EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014) disponibles pour les scénarios RCP4,5 et RCP8,5 à 0.11° de résolution horizontale (soit environ 12,5 km).

Dans le cadre de la tâche 3 du projet Resilience, un total de 16 fichiers météo s'appuient sur ces modèles et ont été fournis par le CNRM (une unité Mixte de Recherche constituée par le CNRS et Météo-France).

On retrouvera en effet :

- Deux sites : Paris et Nîmes
- Deux dates : futur proche (2020-2049) et futur lointain (2070-2099), nommés ci-dessous 2050 et 2100
- Deux niveaux de sévérité des canicules : médian et extrême
- Deux microclimats : avec et sans îlot de chaleur (nommés ci-dessous urbain et rural)

Nous avons également utilisé dans ce projet le fichier météo de la canicule de 2003 qui a eu lieu sur Paris, pour comparaison d'une part, et d'autre part, parce que ces fichiers météo ont un peu tardé avant de nous être fournis.

Dans ces fichiers de format .try, voici la liste, dans l'ordre, des paramètres physiques qui sont accessibles et utilisés ici :

- Température (dixième de °C)
- Rayonnement global horizontal (J/cm²)
- Rayonnement diffus horizontal (J/cm²)
- Rayonnement direct normal (J/cm²) : calculé par MétéoCalc
- Humidité relative (%)
- Vitesse du vent (m/s)
- Mois
- Jour
- Heure
- Direction du vent (°)
- Température d'eau froide (dixième de °C) : calculé par MétéoCalc
- Humidité absolue (mg/kgas)
- Hauteur du soleil (°)
- Azimut du soleil (°)

Les autres données climatiques ont été ignorées, non utilisées.

Pour l'ensemble de ces fichiers, un post traitement sous Excel a été effectué pour récupérer les données dont on avait besoin. Une conversion en format .try via l'outil MétéoCalc de Pleiades a ensuite été réalisée.

5.2.4.2. Éléments de présentation et d'analyse des fichiers météorologiques

Dénomination des fichiers et statistiques

	Nîmes Rural				Nîmes urbain				Paris Rural				Paris urbain			
	Lointain		Proche		Lointain		Proche		Lointain		Proche		Lointain		Proche	
	Extrême	Médian	Extrême	Médian	Extrême	Médian	Extrême	Médian	Extrême	Médian	Extrême	Médian	Extrême	Médian	Extrême	Médian
Dénomination livrable 3	FLHWE	FLHWM	FPHWE	FPHWM	FLHWE	FLHWM	FPHWE	FPHWM	FLHWE	FLHWM	FPHWE	FPHWM	FLHWE	FLHWM	FPHWE	FPHWM
Dénomination simuls tertiaire	NRLE	NRLM	NRPE	NRPM	NULE	NULM	NUPE	NUPM	PRLE	PRLM	PRPE	PRPM	PULE	PULM	PUPE	PUPM
Température max (°C)	44,2	41	39,7	37,6	42,8	40,7	37,7	38	47	36,5	43,5	35,8	46,1	38,4	42	36,5
Nbre d'heures > 30°C	1141	682	355	352	1139	671	388	355	390	136	136	74	449	214	167	101
Nbre d'heures > 35°C	448	217	21	29	457	210	39	44	136	10	55	3	171	26	68	9
Nbre d'heures > 40°C	48	15	0	0	52	9	0	0	41	0	12	0	40	0	12	0
Durée de la vague de chaleur (jours)	38	15	9	10	38	15	9	10	41	9	10	5	41	9	10	5

Tableau 20 : Analyse statistiques des 16 fichiers météorologiques du projet

L'analyse statistique des fichiers météorologiques amène aux commentaires suivants :

Pour les températures maximales :

- la vague de chaleur extrême considérée pour Paris présente une température maximale supérieure à celle de Nîmes.
- la vague de chaleur médiane considérée pour Nîmes présente une température maximale supérieure à celle de Paris.
- les températures maximales sont plus élevées en localisation rurales qu'en localisation urbaine pour les événements extrêmes, elles sont proches ou inférieures pour les événements médians

En termes de durée et d'intensité :

- les fichiers de Nîmes présentent généralement un nombre d'heures dépassant les seuils de températures analysés supérieurs aux fichiers de Paris.
- les fichiers de Nîmes en futur proche vague de chaleur extrême dérogent à cette règle. Comme signalé dans le livrable 3, ceci s'explique par les données disponibles dans les simulations AROME dans ce cas.
- les fichiers correspondant à des événements extrêmes présentent logiquement des durées de dépassement supérieures aux fichiers d'événements médians (sauf pour Nîmes futur proche)
- les fichiers correspondant au futur lointain présentent logiquement des durées de dépassement supérieures aux fichiers futur proche
- les dépassements sont proches entre localisation rurales et urbaines pour Nîmes, la différence est légèrement plus marquée pour les fichiers sur Paris, avec des durées de dépassement inférieures pour la localisation urbaine.

Ces analyses sont illustrées ci-dessous pour des exemples de comparaison graphique de fichiers météorologiques.

[Comparaison fichiers futur proche futur lointain](#)

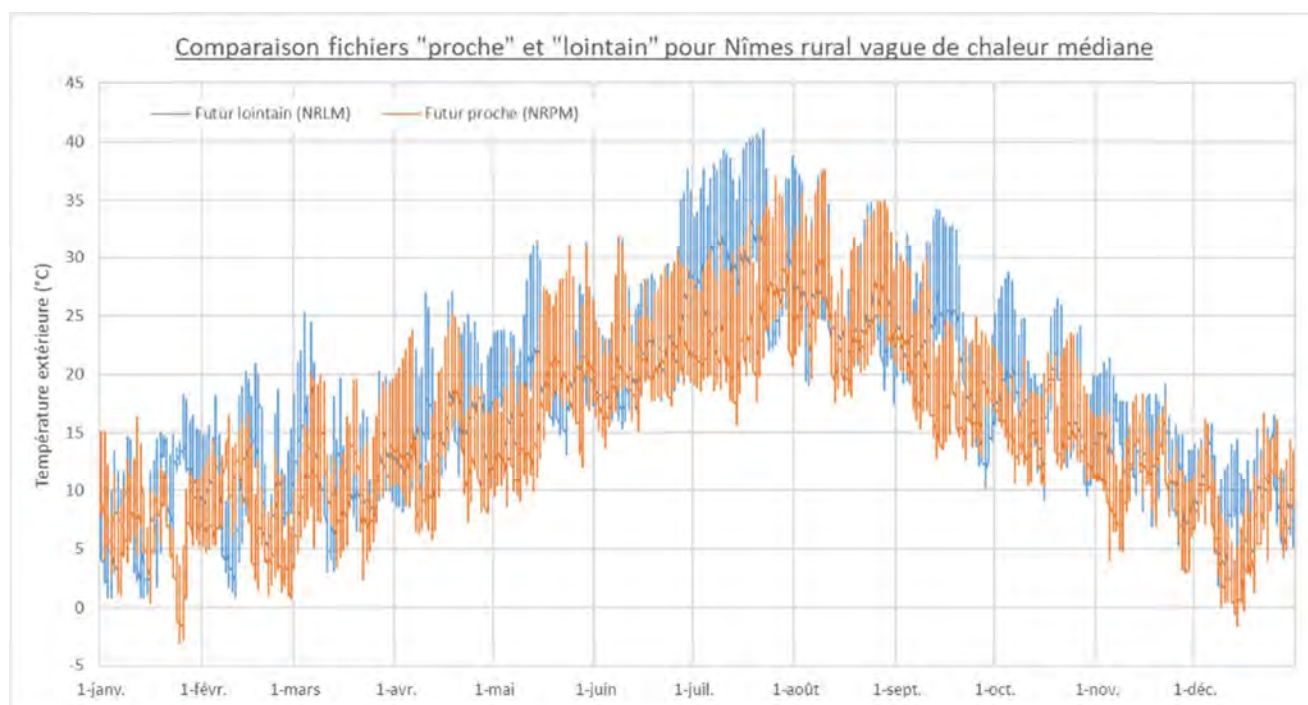


Figure 167 : Comparaison températures des fichiers futur proche et lointain (Nîmes rural médian)

La Figure 167 montre un réchauffement général des températures sur l'année entière, ainsi qu'une vague de chaleur d'une longueur bien plus importante en futur lointain (mois de juillet) qu'en futur proche.

Comparaison vague de chaleur médiane et vague de chaleur extrême

Sur la Figure 168 ci-dessous, les profils de températures des vagues de chaleurs médianes et extrêmes sont représentés, pour Paris Urbain 2100.

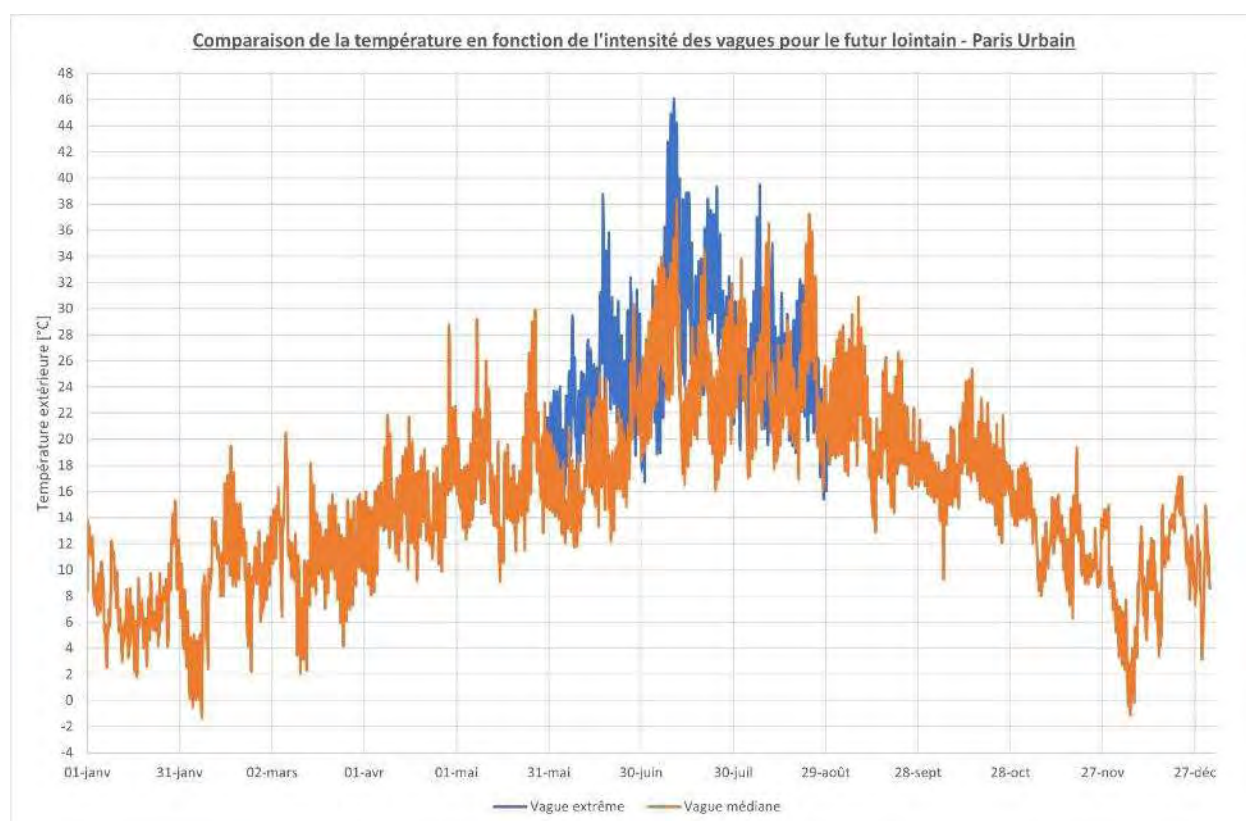


Figure 168 : Comparaison températures vague extrême et médiane (Paris urbain, futur lointain)

Comme le montre la Figure 168, la distinction extrême/médiane se fait seulement ressentir en été sur la vague de chaleur caniculaire, la température sur le reste de l'année étant la même.

Comparaison climat urbain et climat rural

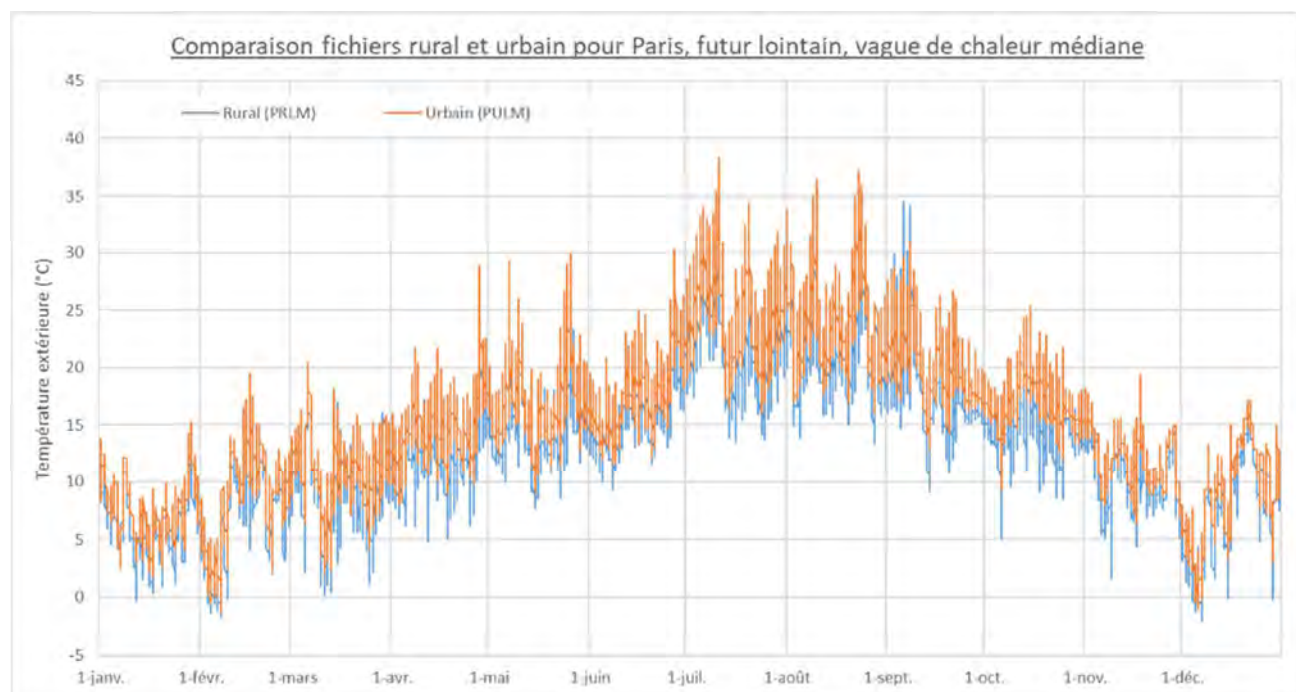


Figure 169 : Comparaison températures rural et urbain (Paris futur lointain, vague médiane)

La Figure 169 illustre la proximité des fichiers météorologiques entre les localisations urbaine et rurale. Les températures sont dans ce cas globalement plus basses en zone rurale.

Comparaison station de Nîmes et de Paris

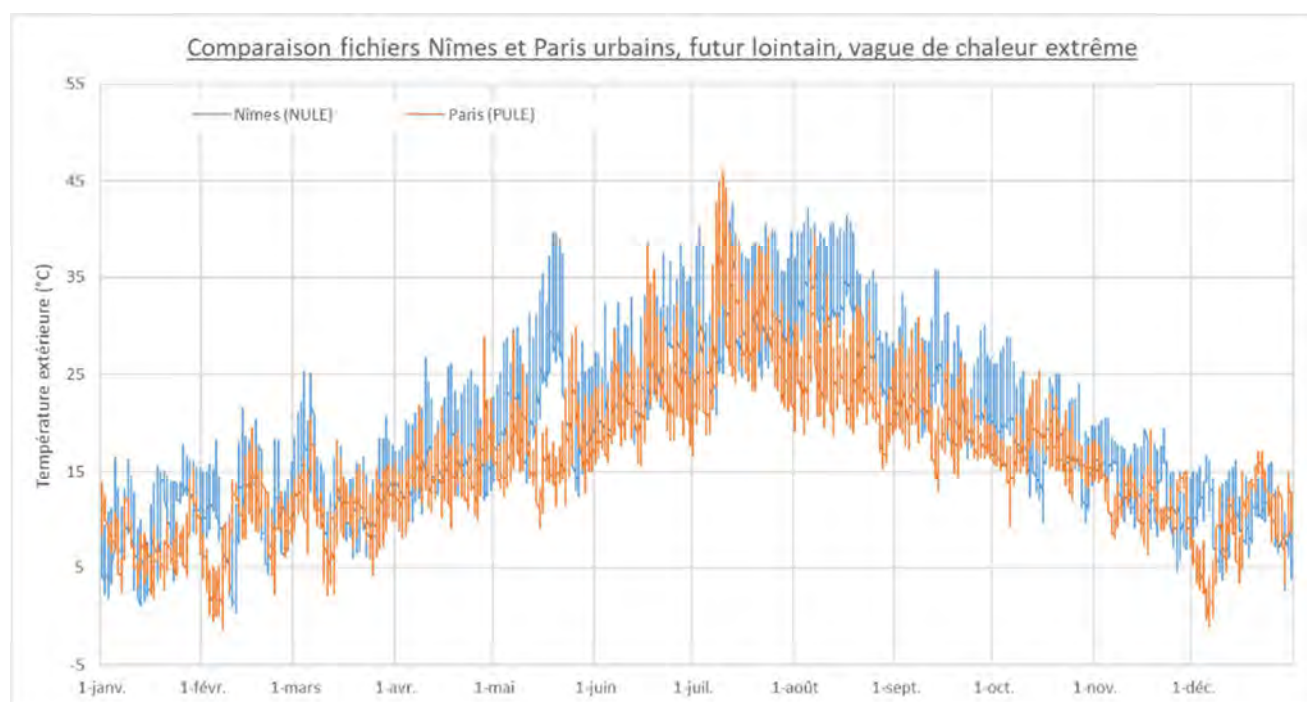


Figure 170 : Comparaison températures Paris et Nîmes (futur lointain, vague extrême)

La Figure 170 illustre les différences relevées dans l'analyse statistique entre les fichiers de Nîmes et Paris :

- durée des vagues de chaleur et températures généralement plus élevées pour Nîmes
- température maximale plus élevée pour Paris sur un événement plus ponctuel

5.2.4.3. Utilisation des fichiers météorologiques

Pour les simulations des bâtiments de logement, les fichiers ont été utilisés selon le processus suivant :

- étude complète présentée en partie 5.3, sur un fichier météo unique : Paris Urbain, 2100, vague médiane.
- fichier de Canicule 2003 pour les analyses présentées en parties 5.3.1 et 5.3.4.
- comparaison avec les 15 autres fichiers météorologiques en partie 5.4.

Pour les simulations sur les bâtiments tertiaires, présentées en partie 5.5., les 16 fichiers météorologiques ont été utilisés en parallèle évaluer les bâtiments de base, puis les fichiers présentant les conditions les plus sévères sont utilisés pour analyses certaines variantes (Nîmes Rural Lointain Extrême et Paris Rural Lointain Extrême notamment).

5.3. Etude complète : Fichier Météo : Paris Urbain, Futur Lointain, Vague Médiane

Dans cette partie, une étude en STD relativement complète a été menée avec un des fichiers météo, celui de Paris Urbain, Futur Lointain (2080/2100), vague de chaleur médiane.

5.3.1. Comportement des occupants, Fichier Canicule 2003

Des premières simulations menées sur la maison des Années 50 avec le fichier de la canicule de 2003 ont été réalisées. Dans cette partie, on vous présente certain de ces résultats. Ces derniers présentés ici permettent de comprendre quel rôle majeur les occupants des bâtiments jouent dans le confort estival (cf Figure 172 et Figure 173).

Dans ces deux figures, un scénario d'ouverture des fenêtres sous contrôle est modélisé de la façon suivante (cf Figure 171) :

Ce scénario de ventilation sous contrôle définie en Figure 171 est valable sur l'intégralité des résultats présentés dans ce rapport.

Nom
Ouverture fenêtres

☐ Mode réchauffage
☒ Mode rafraîchissement

Condition d'allumage
T° de la zone Extérieur < T° de la zone Zone courante -1 °C

Conditions d'arrêt
T° de la zone Extérieur > T° de la zone Zone courante + 0 °C
ou
T° de la zone Zone courante < 24 °C

Figure 171 : Scénario d'ouverture des fenêtres sous contrôle

Un débit de ventilation de 10 vol/h est modélisé en Figure 172, ce qui correspond à une ventilation traversante. Un débit de 02 vol/h sera aussi étudié par la suite de ce rapport.

Quant au scénario d'occultation, il est considéré durant tout l'été, de 7h à 20h, à 80%. Lors de cette occultation, on a donc 20% du flux solaire qui rentre par les fenêtres.

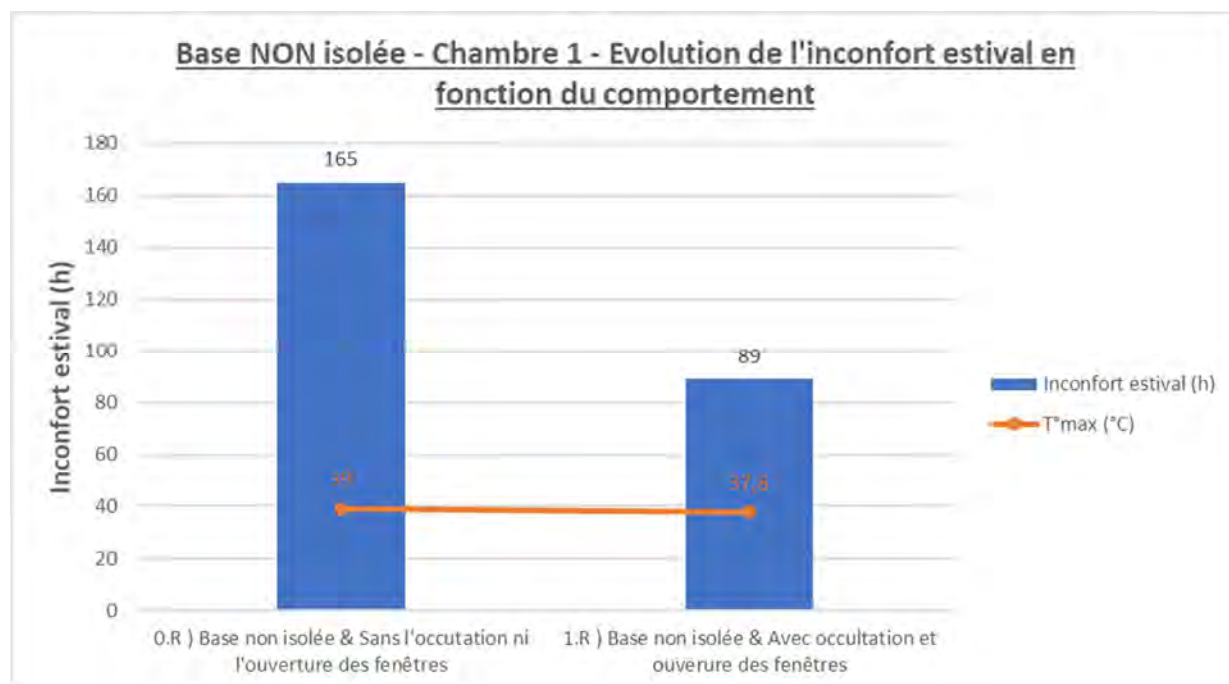


Figure 172 : NON isolée : Comportement

On remarque par la Figure 172 que l'ouverture des fenêtres, en particulier pour un rafraîchissement la nuit, ainsi que l'occultation de ces dernières en journée, permettent de diminuer par deux le nombre d'heures d'inconfort estival. La température maximale ressentie a diminué aussi, de 1,2°C mais elle reste trop élevée. L'impact du comportement des usagers dans le cas de la maison isolée sera abordé en Figure 173.

Ainsi, il est très important que les usagers occultent leurs fenêtres la journée (via des volets, des stores...) pour diminuer les apports solaires entrants. Il est aussi important que les occupants ouvrent leurs fenêtres dès qu'il fait plus frais dehors pour rafraîchir l'air ambiant intérieur et les parois qui ont accumulé de la chaleur durant la journée. Malheureusement, la température devient difficilement supportable à certaines heures. Il faudrait donc procéder à des travaux d'amélioration.

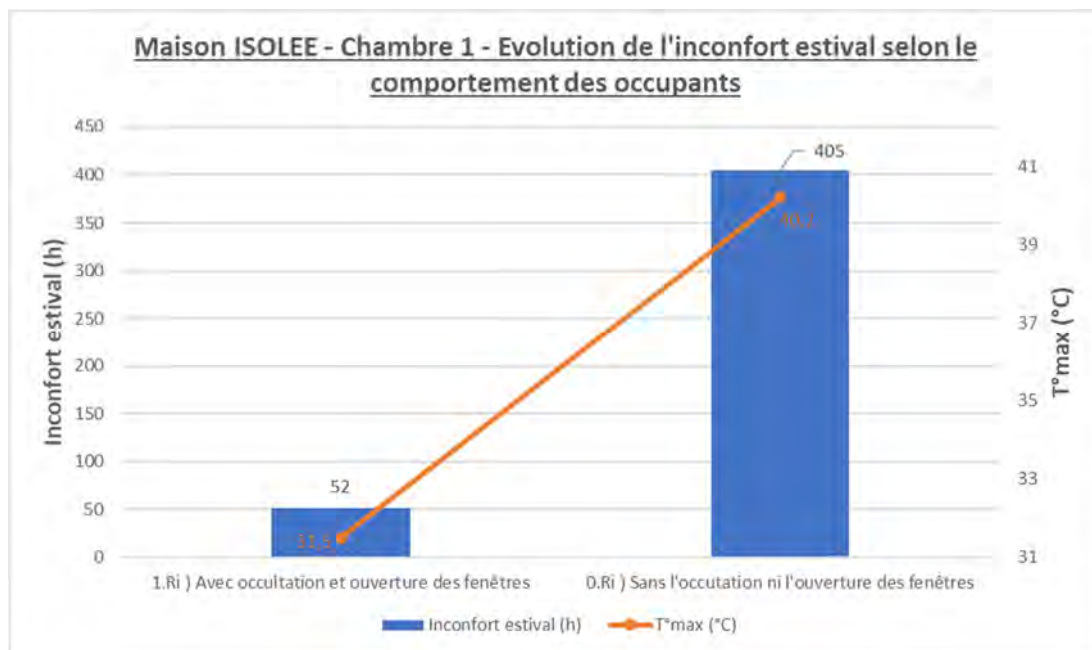


Figure 173 : ISOLEE : Comportement

Comme le montre la Figure 173, l'impact du comportement des habitants avec leurs fenêtres se fait d'autant plus ressentir lorsque la maison est isolée (si l'on compare avec la Figure 172 : NON isolée : Comportement). L'inconfort a en effet diminué de 353 heures, soit l'équivalent de 44 nuits de 8h. La température maximale ressentie a aussi chuté de près de 9°C. Ne pas occulter et ouvrir ses fenêtres dans le cas de la maison isolée contribue à une augmentation considérable de l'inconfort comme le montre la simulation 0.Ri).

Ainsi, l'impact du comportement des usagers sur leurs fenêtres est d'autant plus important que la maison est isolée.

Une question souvent posée : l'isolation thermique peut-elle détériorer le confort d'été ?

Pour résumer nos conclusions des Figure 172 et Figure 173 et répondre à cette question, voici un tableau récapitulatif (cf Tableau 21) :

Chambre 1	Heures d'inconfort estival (T° > 28°C), Tmax	
	SANS ouverture fenêtres ni occultation	AVEC ouverture fenêtres et occultation
NON isolé	165 h, 39°C	89 h, 37.8°C
Isolé (béton avec 30 cm de polystyrène)	405 h, 40.2°C	52 h, 31.5°C

Ainsi, comme le montre le Tableau 21, pour obtenir un confort acceptable en période de canicule, il faut à la fois isoler le bâtiment, fermer des stores/volets et ouvrir les fenêtres lorsqu'il fait plus frais dehors. Isoler un bâtiment améliore le confort d'été seulement si le bâtiment est suffisamment ventilé (ou climatisé). Si les occupants n'ouvrent pas leurs fenêtres, en particulier la nuit lorsqu'il fait plus frais dehors, la température peut devenir insupportable dans cette maison.

**Ce phénomène étant amplifié via une ITI (isolation par l'intérieur), on privilégiera donc une ITE dans la mesure du possible.*

Tableau 21 : Récapitulatif sur l'inconfort Chambre

Par conséquent, l'absence de climatiseur nécessite que les occupants du bâtiment ouvrent leurs fenêtres en été dès lors que la température extérieure est inférieure à la température intérieure. Pour rappel, le débit de ventilation considéré ici est de dix volumes par heures (sous condition) pour l'ensemble des

pièces où une fenêtre est présente. Si cela n'est pas possible, il faut recourir à un dispositif spécifique de ventilation naturelle, par exemple des ouvertures avec chicanes anti-bruit.

5.3.2. Etude Isolation & Vitrages

Dans cette partie, on s'intéresse entre autres à étudier l'intérêt d'un double ou d'un triple vitrage, par rapport à un simple vitrage. On regarde également quel est l'impact sur le confort d'été d'une forte isolation de la toiture et des murs extérieurs. Pour cela, on compare les degrés heures d'inconfort chaud (DH) à l'aide du confort adaptatif défini par la norme RE2020 pour trois types de vitrages. La température seuil d'inconfort chaud varie alors de 28°C à 30°C, en fonction de la température extérieure en moyenne glissante sur les dernières 24 heures. C'est l'épaisseur de l'isolant placé en toiture ou dans les murs extérieurs que l'on fait varier de 0 à 5, 10, 20 ou 30 cm. L'isolant du plafond étant de la laine de verre et celui constitué dans les murs étant du polystyrène expansé, et ce, pour les cinq bâtiments de l'étude. Sauf indication contraire (via une ITI), on se place dans une configuration où l'isolant est placé du côté extérieur.

Pour effectuer cette étude, on fait appel à l'algorithme python expliqué en 0. C'est par l'intermédiaire de ce code qu'est calculé les degrés heures d'inconfort chauds (cf Figure 165). Ces résultats ont été comparés dans un premier temps avec les heures d'inconforts chauds pour lesquelles la température seuil de confort était fixée à 28°C. Cette comparaison, non présentée ici, a permis d'en déduire que le calcul des degrés heures chauds est cohérent. En effet, les tendances observées sur le confort estival sur les trois vitrages et pour les différentes épaisseurs d'isolants sont les mêmes. Ce qui change, c'est que l'on aura globalement 10 à 20 % d'inconfort en moins en tenant compte du confort adaptatif. La raison étant qu'en confort adaptatif on considérera que la température seuil de confort peut atteindre jusqu'à 30°C, soit 2°C de plus qu'en imposant une température fixée à 28°C.

Le Tableau 22 ci-dessous présente les caractéristiques des trois vitrages étudiés lors de cette étude :

Caractéristiques des vitrages :

	Simple vitrage	Double vitrage	Triple vitrage
Coefficient U (W/m².K)	4.083	1.30	1.095
Facteur solaire Sw	0.70	0.51	0.41

Tableau 22 : Caractéristiques des vitrages

Dans les résultats de la Figure 174 : Maisons et de la Figure 176, on fait varier pour les cinq bâtiments de l'étude le débit de ventilation. Ce débit est le débit de ventilation nocturne, il est de deux ou dix volumes par heure, dans l'ensemble des pièces de vie et de nuit, dès lors que la température extérieure est inférieure à la température intérieure de 01 degré. Celui-ci est présenté en Figure 171. Valable toute l'année, il permet de modéliser une ouverture des fenêtres. Etant donné qu'on s'intéresse aux périodes caniculaires, la ventilation qui est ici modélisée se met en place pratiquement que lors des soirées et des nuits, en été. Ce débit est complémentaire du système de ventilation de base (VMC).

Ci-dessous, le Tableau 23 présente les zones thermiques que l'on a décidé d'étudier sur l'ensemble des simulations.

Choix des zones thermiques :

	Années50	Maison neuve	Haussmannien	HLM	Collectif BBC
Zone étudiée	Chambre 1 - Nord	Zone nuit - Sud	Etage 6	Ouest haut	T3-B302
Raison	Le choix d'une chambre car c'est un lieu où l'inconfort chaud est particulièrement gênant pour dormir. On a une chambre exposée au nord et l'autre au sud.		C'est au 6 ^{ème} étage que l'inconfort chaud est le plus important, due aux apports solaires.	Appartements les plus en hauteur avec une exposition au soleil importante en fin d'après-midi.	En hauteur également, avec un maximum d'inconfort en comparaison avec tous les appartements.

Tableau 23 : Zones thermiques

Le fichier météo utilisé pour les résultats présents dans ce rapport est celui de fin de siècle, vague de chaleur médiane, localisation : Paris urbain. Bien entendu, dans le cadre du projet, des simulations ont été effectuées avec tous les fichiers météo.

On retrouvera en Figure 174 les résultats pour les deux maisons individuelles et en Figure 176 ceux des trois logements collectifs. Ces Figures représentent les degrés heures d'inconfort chaud, pour cinq épaisseurs d'isolants et trois vitrages différents. On est ici en isolation thermique par l'extérieur (ITE).

5.3.2.1. Logements individuels

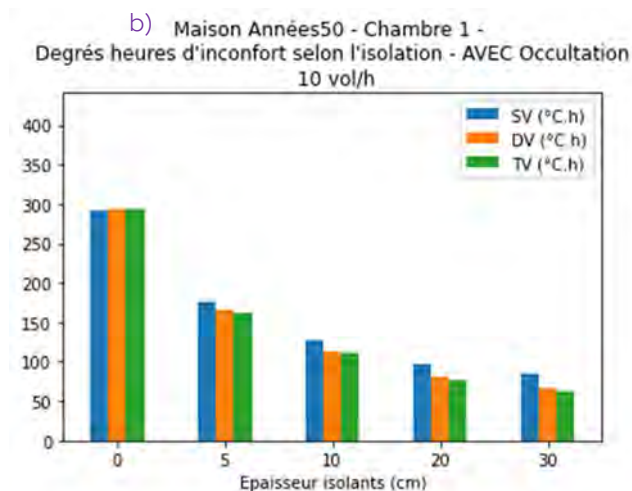
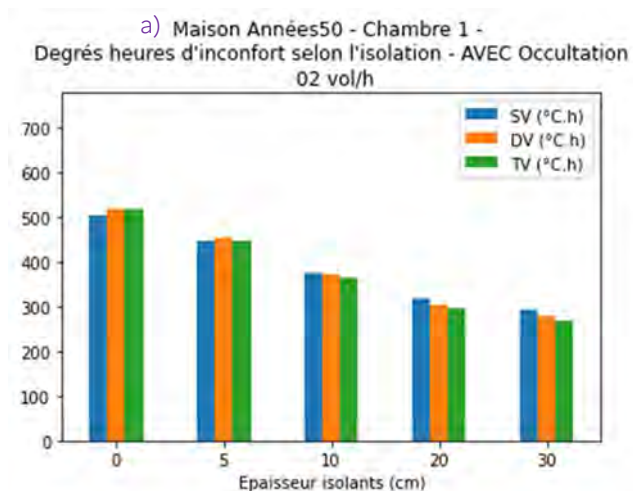
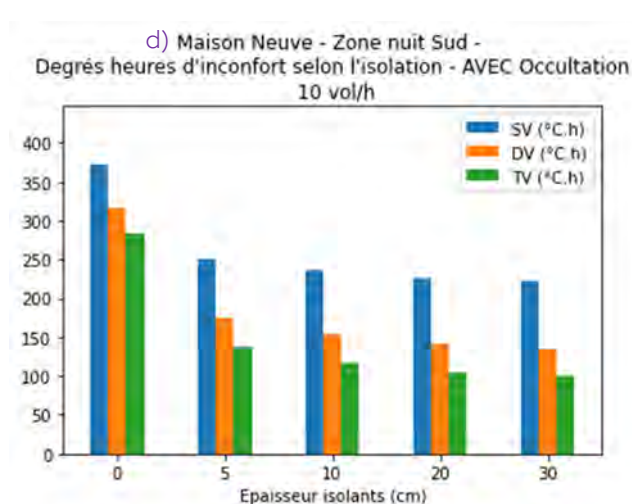
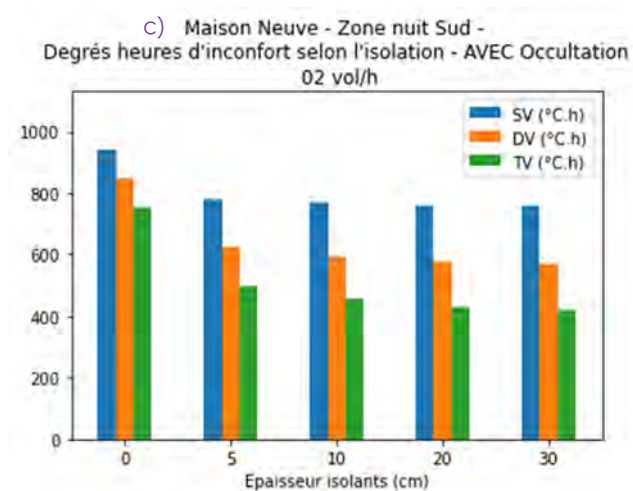


Figure 174 : Maisons



Observations :

- L'isolation des murs extérieurs et de la toiture est bénéfique sur la diminution des degrés heures, et donc, contribue à améliorer le confort estival. Cela se constate pour les deux débits de ventilation nocturne : 2 et 10 vol/h
- On a tout de même une baisse plus significative des DH avec un débit plus important, si l'on compare les graphiques de gauche avec ceux de droite
- Le triple vitrage représente un intérêt sur le confort d'été : les DH sont moins importants en triple vitrage par rapport à du double ou du simple vitrage.

Quelques soient les bâtiments, un débit de renouvellement d'air suffisant est nécessaire pour permettre à l'isolation d'être bénéfique sur le confort estival. En effet, si l'on se contente seulement d'une VMC de l'ordre de 1 vol/h (débit courant d'une VMC simple flux d'une maison neuve) et que l'on n'ouvre pas les fenêtres pour ventiler la nuit, voici la tendance que l'on obtient avec l'isolation (en ITE) de la maison neuve (cf Figure 175) :

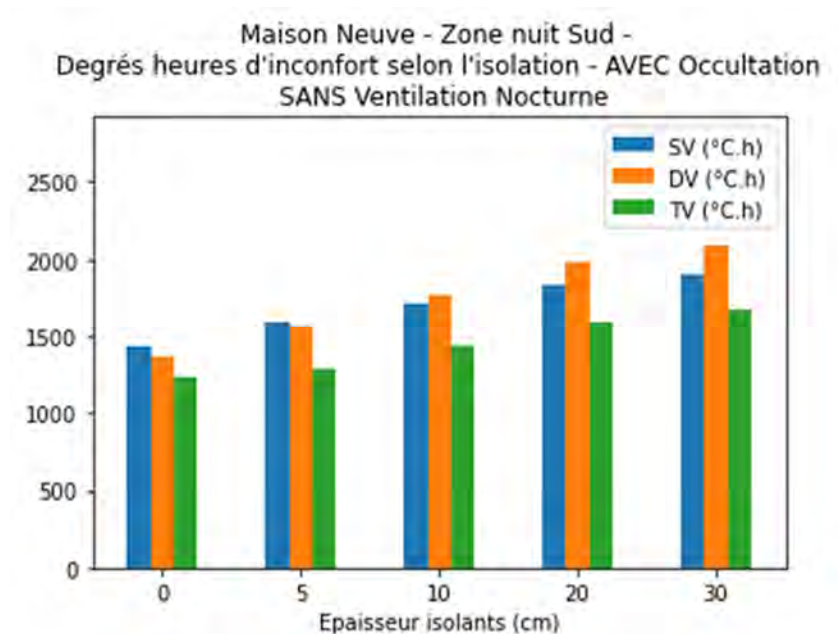


Figure 175 : Maison Neuve - SANS Ventilation Nocturne (on se contente d'une VMC de 1 vol/h)

Il est donc important que les occupants ouvrent leurs fenêtres dès qu'il fait plus frais dehors qu'en intérieur. Si ce n'est pas fait, dans ce cas, l'isolation des bâtiments contribuera à détériorer le confort et non à l'améliorer. La ventilation nocturne a l'avantage de pouvoir éliminer le surplus de calories accumulées dans les murs lors des journées où il a fait particulièrement chaud. De plus, si cette dernière se fait en ouvrant les fenêtres, on ne consommera pas d'énergie au même titre que des ventilateurs ou un climatiseur.

En effet, il a été montré, sur les cinq bâtiments de l'étude (disposant tous d'un système de ventilation hygiénique allant de 0.5 à 1.0 vol/h constant) qu'un débit de ventilation nocturne supplémentaire de 1 à 2 vol/h était nécessaire pour permettre à l'isolation d'être bénéfique sur le confort estival. Pour des bâtiments non climatisés, il est alors indispensable d'ouvrir ses fenêtres dès qu'il fait plus frais dehors, en ventilation traversante si possible afin d'avoir le débit de renouvellement d'air le plus élevé possible.

A présent, veuillez retrouver en page suivante, Figure 176, cette même étude de l'isolation mais pour les logements collectifs.

5.3.2.2. Logements Collectifs

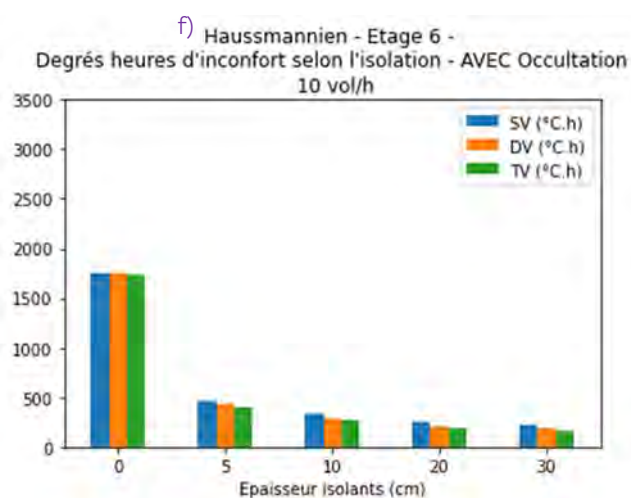
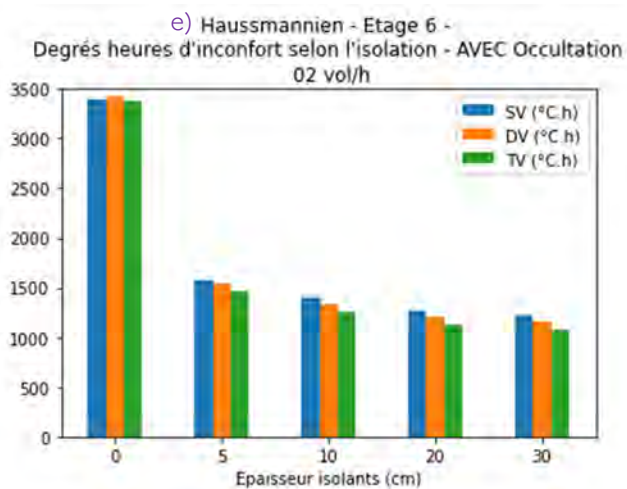
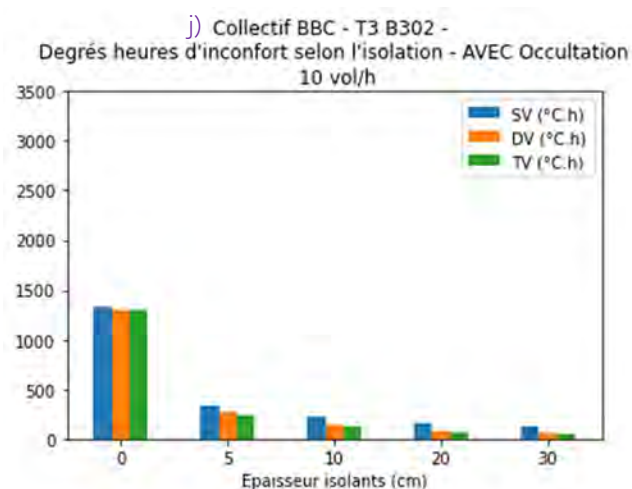
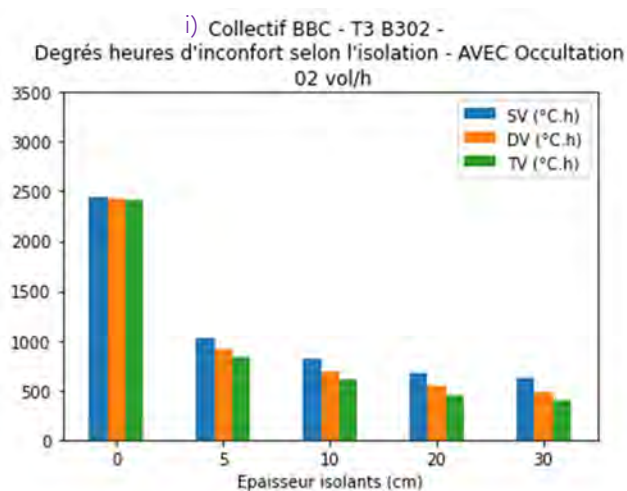
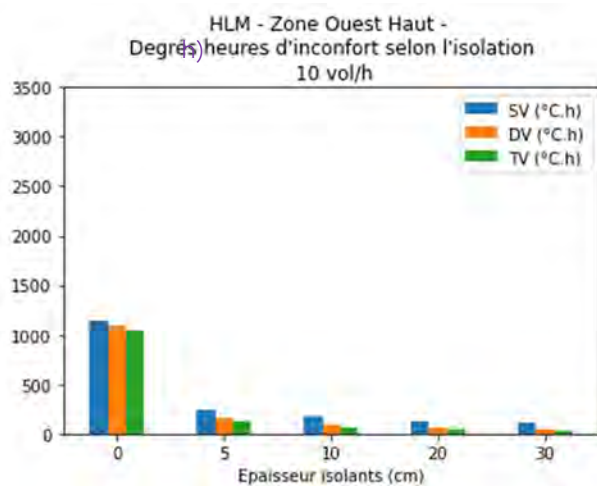
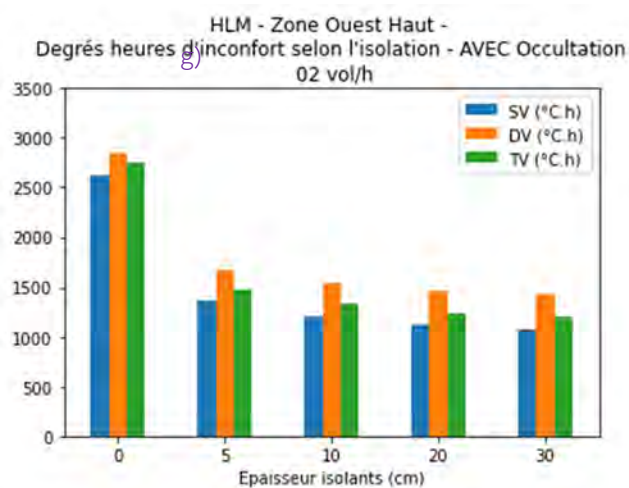


Figure 176



Les observations constatées avec les logements collectifs en Figure 176 sont les mêmes qu'avec les logements individuels. Sur les trois bâtiments, l'isolation et la ventilation sont bénéfiques. Le bâtiment haussmannien étant le seul isolé par l'intérieur, c'est celui-ci qui a le plus d'inconfort chaud avec un débit de 10 vol/h.

Pour un visuel plus détaillé sur les surchauffes, on pourra aussi regarder la température maximale atteinte dans une zone, on aura ainsi meilleure représentation du confort estival (cf, exemple : Tableau 24)

5.3.3. Inertie Maison Neuve & BBC

Bien entendu, l'inertie thermique des bâtiments joue aussi un rôle sur les tendances observées. C'est pourquoi, on s'intéresse à étudier l'évolution des DH selon si le bâtiment est isolé par l'extérieur (ITE) ou par l'intérieur (ITI).

5.3.3.1. Maison Neuve

On commence par faire une étude sur l'inertie de la maison neuve.

Isolation par l'extérieur (ITE) ou par l'intérieur (ITI) ?

L'ITE est représentée par la Figure 174, graphiques c) et d). Ci-dessous, l'ITI est caractérisée par les Figure 178 et Figure 177.

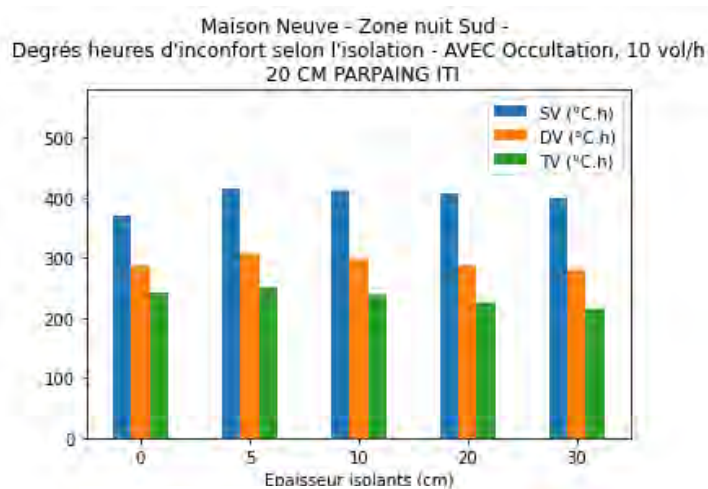


Figure 178: Maison Neuve ITI 10 vol/h

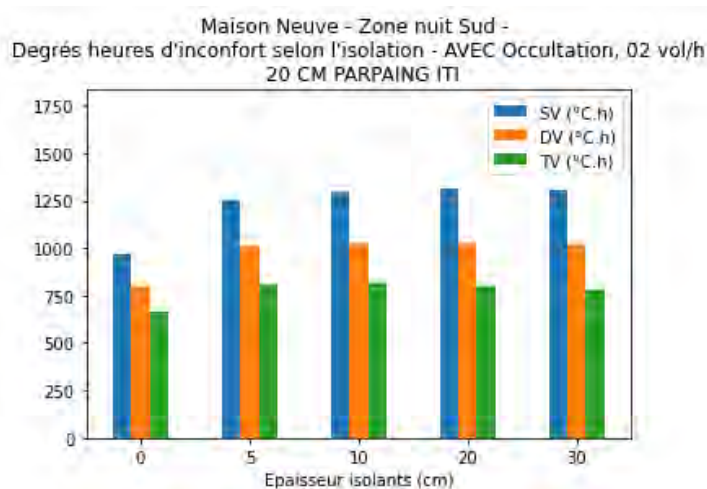


Figure 177 : Maison Neuve, ITI 2 vol/h

On remarque par les Figure 178 et Figure 177 que l'isolation par l'intérieur n'apporte pas de réelle amélioration sur le confort d'été. Cela s'observe notamment avec le simple et le double vitrage où le confort se voit détériorer en 02 vol/h exclusivement. En double vitrage sous 10 vol/h, on observe une petite amélioration du confort estival à mesure que l'on isole avec 10 cm ou plus. Avec du triple vitrage, on remarque une petite amélioration du confort d'été en 10 vol/h. En 02 vol/h, les DH n'évoluent que très peu avec le triple vitrage, et épaisseurs ≥ 5 cm. En comparaison avec la Figure 174 c) (même configuration mais en ITE, 2 vol/h), pour 10 cm d'isolant et du double vitrage, on retrouve ici 400°C.h en plus avec une isolation par l'intérieur.

Lorsqu'un mur est isolé par l'intérieur, la chaleur accumulée à l'intérieur du bâtiment (par les occupants et les équipements) a du mal à s'évacuer, elle se voit bloquée par l'isolant. Il est aussi connu que l'inertie thermique en ITE est meilleure qu'en ITI et ce décalage temporel de la température améliore aussi le ressenti sur le confort. On recommandera donc, systématiquement, de privilégier une ITE dès la

construction d'un bâtiment. Une configuration ITI pourra tout de même être utilisée pour réduire les besoins de chauffage, dans la mesure où une ITE n'est pas possible.

Maison en Parpaing ou en Béton ?

Pour étudier l'inertie thermique, comparons la composition d'une maison en parpaing et celle d'une maison en béton. Le béton étant plus lourd que le parpaing, on s'attend à obtenir une meilleure inertie et donc, un meilleur confort d'été.

Ci-dessous, les Tableau 24 et Tableau 25 représentent les résultats des simulations, on regarde à la fois les DH et la température maximale.

Maison Neuve – Zone nuit Sud - Débit de ventilation nocturne de 02 vol/h

Murs (Isolation 10 cm ITE)	20 cm Parpaing		20 cm Béton		50 cm Béton	
Donnée étudiée	DH	T° max	DH	T° max	DH	T° max
SV	769 (°C.h)	42.5 °C	654 (°C.h)	41.5 °C	521 (°C.h)	41.0 °C
DV	594 (°C.h)	39.3 °C	497 (°C.h)	38.4 °C	362 (°C.h)	38.0 °C
TV	458 (°C.h)	37.3 °C	374 (°C.h)	36.7 °C	250 (°C.h)	36.2 °C

Tableau 24

Maison Neuve – Zone nuit Sud - Débit de ventilation nocturne de 10 vol/h

Murs (Isolation 10 cm ITE)	20 cm Parpaing		20 cm Béton		50 cm Béton	
Donnée étudiée	DH	T° max	DH	T° max	DH	T° max
SV	235 (°C.h)	39.3 °C	195 (°C.h)	38.7 °C	157 (°C.h)	38.1 °C
DV	155 (°C.h)	36.8 °C	124 (°C.h)	36.7 °C	92 (°C.h)	36.1 °C
TV	118 (°C.h)	35.8 °C	92 (°C.h)	35.1 °C	61 (°C.h)	34.5 °C

Tableau 25

Comme attendu, ces données des deux tableaux confirment que le confort estival est meilleur en utilisant du béton, par rapport à des parpaings. Avec du double vitrage par exemple et un débit de 2 vol/h, on gagne près de 1 degré sur la température maximale et on diminue de près de 10% les DH.

Une étude avec une maison en bois a aussi montré que l'on a davantage d'inconfort avec du bois qu'avec une structure en béton.

L'occultation :

Maintenant, si on n'occulte pas nos fenêtres en journée durant l'été, l'intérêt du triple vitrage se voit encore plus marqué afin de réduire l'inconfort chaud comme le montre la Figure 179, si on la compare avec la Figure 174 d). La comparaison entre ces deux figures permet aussi de voir l'intérêt des occultations des fenêtres, on retrouve en effet deux fois plus de DH sans occultations.

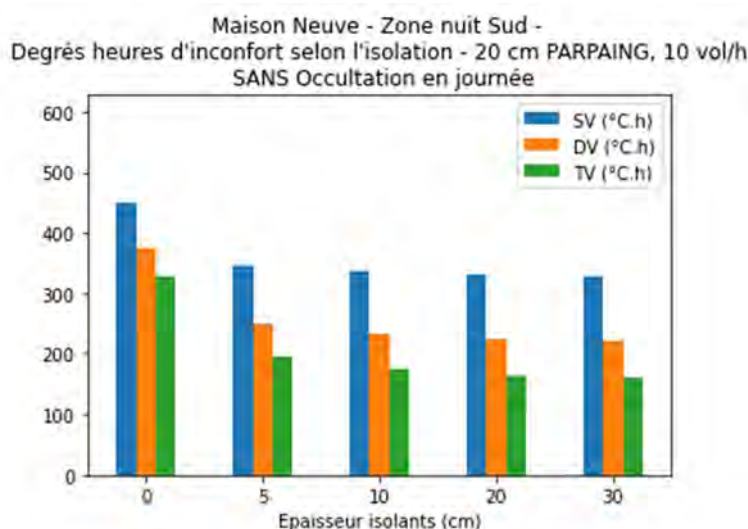


Figure 179: Maison Neuve – SANS Occultation

Intérêt d'un triple vitrage ?

Il est connu que le triple vitrage est certes bénéfique en été mais que sur une façade sud bien exposée il contribue à augmenter les besoins de chauffage en hiver, par rapport à un double vitrage. En effet, le facteur solaire d'un triple vitrage est plus faible que celui d'un double vitrage, on réduit alors les apports solaires. Qu'en est-il vraiment ?

Si l'on simule pour ce même bâtiment (zone exposée au sud), avec par exemple 50 cm de Béton et un chauffage de 20°C constant en hiver, on passe de 4945,4 Kwh à 5176,4 Kwh des besoins en chauffage en mettant du triple vitrage sur toutes les façades (par rapport à du DV), soit une hausse de seulement 05 %. A l'inverse, en été, le triple vitrage a permis de diminuer la température maximale de 1.5 à 2.0 degrés et de diminuer les degrés heures d'inconfort jusqu'à presque un tiers, comme l'a montré le Tableau 24. De plus, avec du triple vitrage, si le bâtiment a l'intention d'être climatisé, il est fort probable à la vue de ces résultats que le gain en besoin froid soit bien plus intéressant par rapport à la perte en besoin chaud. Pour limiter la perte en besoin chaud, on recommandera de laisser du double vitrage en exposition sud (cela permet d'avoir un facteur solaire plus élevé).

5.3.3.2. Résidence BBC

Dans cette étude, on fait varier l'épaisseur du béton de la résidence BBC, pour voir si l'on obtient la même tendance de résultats pour un bâtiment plus grand que la maison neuve, vis-à-vis de l'inertie. Cette résidence étant constituée de 34 appartements. Les résultats sont présentés dans le Tableau 26 :

Résidence BBC – T3 B302 - Débit de ventilation nocturne de 02 vol/h						
Murs (Isolation 10 cm)	16 cm Béton		30 cm Béton		50 cm Béton	
Donnée étudiée	DH	T° max	DH	T° max	DH	T° max
SV	812 (°C.h)	35.7 °C	650 (°C.h)	35.0 °C	520 (°C.h)	34.7 °C
DV	686 (°C.h)	34.9 °C	526 (°C.h)	34.2 °C	397 (°C.h)	33.6 °C
TV	601 (°C.h)	34.7 °C	447 (°C.h)	34.0 °C	325 (°C.h)	33.3 °C

Tableau 26

On remarque d'après le Tableau 26 qu'on a un gain appréciable sur le confort, à mesure qu'on augmente l'épaisseur du béton, et donc, l'inertie. Il sera pertinent d'étudier la répercussion environnementale d'une telle épaisseur de béton.

5.3.4. Vieille Maison en pierre : Inertie & Vide sanitaire ou Terre-plein, Fichier Canicule 2003

Au même titre que la partie : 5.3.1 Comportement des occupants, Fichier Canicule 2003, on utilise le fichier météo de la Canicule de 2003 avec la maison des années 50.

Afin d'avoir un échantillon d'étude plus large, il a été décidé de faire une autre variante à partir de la maison des années 50 : une vieille maison en pierre. Ainsi, nous avons changé la composition des parois de cette dernière pour y mettre 50 ou 100 cm de Calcaire. On a aussi regardé quelle était la différence entre un contact entre le sol et un vide sanitaire ou sur un terre-plein.

Les résultats sont présentés en Figure 180 :

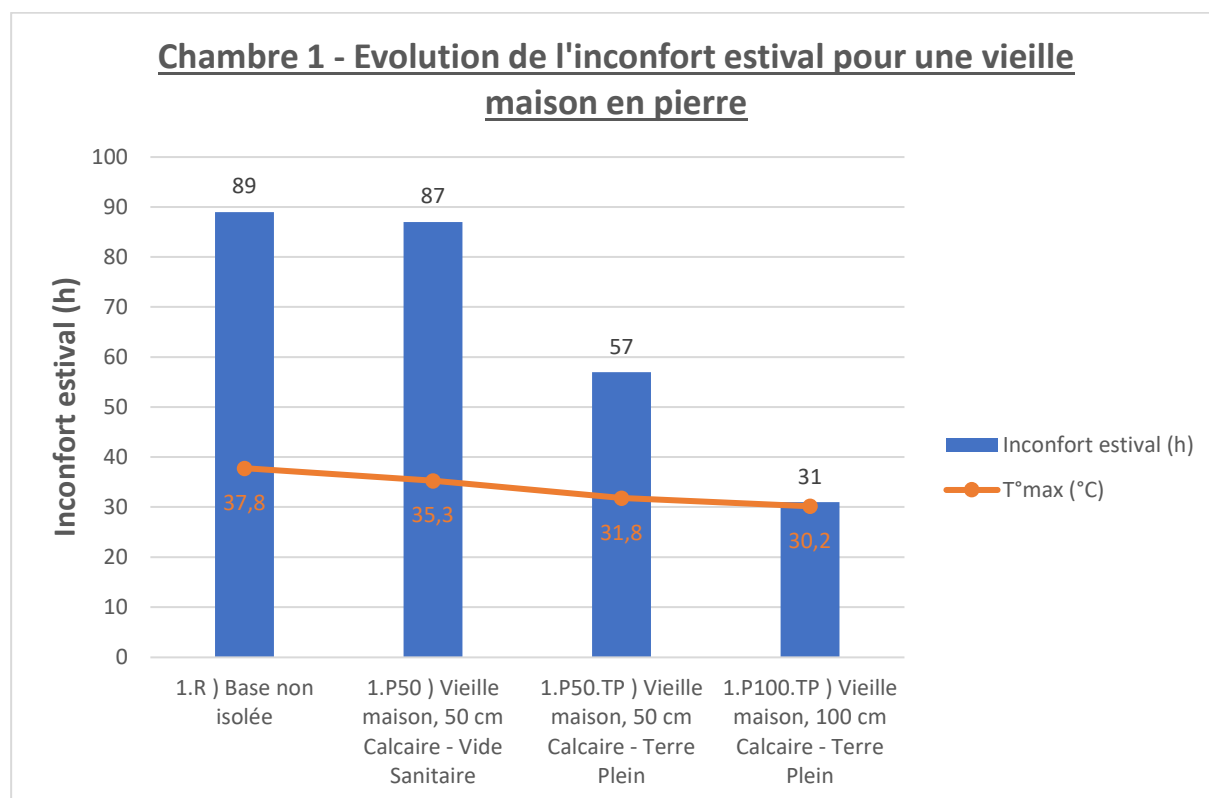


Figure 180: Vieille maison

La Figure 180 permet de visualiser comment résisterait une maison ancienne à une canicule. On remarque donc que la maison en pierre sur terre-plein a un confort bien plus acceptable que la maison de base en plaque de béton mince sur vide sanitaire. De plus, l'augmentation de l'épaisseur des murs de 50 à 100 cm a permis d'améliorer ce confort, cela s'explique par une hausse de l'inertie thermique du bâtiment. La vieille maison en 50 cm en contact avec le vide sanitaire obtient toutefois des résultats proches de ceux de la simulation 1.R). Il est à noter qu'une vieille maison en pierre est le plus souvent en contact direct avec le sol et non un vide sanitaire, c'est pourquoi la variante terre-plein a été étudiée.

5.3.5. Végétalisation BBC

A présent, on étudie une autre solution qui permet d'améliorer le confort d'été : la végétalisation des façades.

Une paroi végétalisée joue un rôle similaire à une protection solaire bien qu'elle protège généralement une paroi opaque. Mais son rôle ne se limite pas qu'à un effet d'occultation puisque le phénomène d'évapotranspiration du végétal participe aussi.

Principe physique :

Les végétaux participent au rafraîchissement des bâtiments par au moins quatre phénomènes :

- L'effet de masque au même titre que les autres protections solaires, qui fait intervenir le taux de couverture du mur, l'absorption, la réflectance et la transmission solaire du rideau végétal
- L'évapotranspiration, mécanisme naturelle des plantes, qui produit un rafraîchissement par évaporation du rideau végétal
- La convection par la création d'une circulation d'air préférentielle entre le mur végétal et la paroi protégée
- La résistance thermique du rideau végétal

Modélisation :

Afin de tenir compte du phénomène d'évapotranspiration des végétaux, on modélise une végétalisation des façades dans le Module STD COMFIE de Pleiades en modifiant l'absorptivité des parois. Pour cela, on a créé un nouvel état de surface où l'on a mis une absorptivité de 0,1, et ce, sur l'ensemble des parois verticales extérieures et la toiture.

Dans les résultats obtenus ci-dessous, on a en effet considéré un cas « extrême » où l'ensemble de toutes les parois externes du bâtiment BBC sont végétalisés, afin de voir la tendance observée sur le gain en confort.

Résultats :

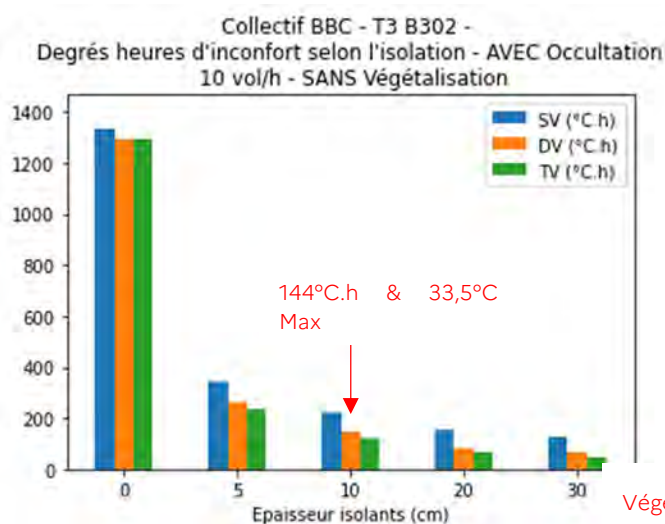


Figure 181: BBC 10 vol/h - SANS Végétalisation

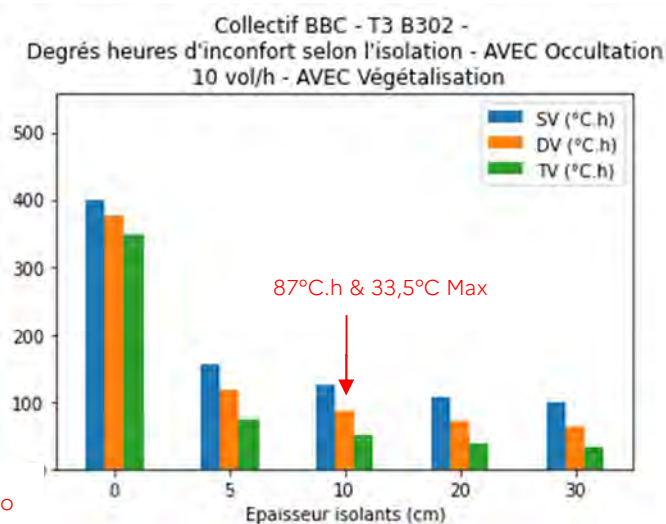


Figure 182: BBC 10 vol/h AVEC Végétalisation

Lorsque l'on compare les Figure 181 et Figure 182, on remarque dans un premier temps que l'on a une diminution importante des DH pour la configuration non isolée (0 cm), soit, trois fois moins.

Dans un second temps, avec 10 cm d'isolants, on passe de 144°C.h à 87°C.h, le gain ressenti en confort est moins important mais n'est pas négligeable non plus.

En revanche, avec 10 cm d'isolants, la température maximale atteinte dans l'appartement B302 n'a pas diminué. Sachez qu'elle diminue seulement pour les configurations 0 et 5 cm.

Ainsi, dans une configuration isolée, on observe une réduction des heures d'inconfort ($T > 28^{\circ}\text{C}$) qui est à l'origine d'une diminution des DH. D'après ce modèle qui a été simulé, la végétalisation ne contribue pas à réduire de façon importante les surchauffes des bâtiments isolés (puisque l'on ne diminue pas la température maximale atteinte dans l'été). Cette dernière apporterait toutefois un gain important sur le confort d'été pour des bâtiments très peu isolés et exposés au rayonnement solaire.

5.3.6. Isolation biosourcée et déphasage

Certains promoteurs de l'isolation biosourcée mettent en avant le « déphasage thermique » plus élevé de ces matériaux par rapport à des isolants comme la laine de verre. En fait, un isolant transmet peu de chaleur donc le fait de déphaser cette petite quantité ne devrait pas avoir beaucoup d'influence sur l'ambiance intérieure. Pour le vérifier, nous avons comparé par la simulation le nombre de degrés-heures d'inconfort pour de la laine de bois et une isolation standard (laine de verre en toiture et polystyrène dans les murs). La maison considérée est celle des années 1950, on suppose l'utilisation d'occultations et un débit de ventilation nocturne de 2 ou 10 vol/h. Le climat correspond aux données prospectives de MétéoFrance pour Nîmes en 2050 (zone rurale, canicule extrême).

Les caractéristiques considérées pour ces trois matériaux sont indiquées dans le tableau suivant.

	Conductivité thermique, W/(m.K)	Masse volumique, kg/m ³	Chaleur massique, J/(kg.K)
Laine de verre	0.041	12	840
Polystyrène	0.039	25	1380
Laine de bois	0.049	190	2100

La comparaison est faite d'une part à épaisseur égale, d'autre part à résistance thermique égale. Dans ce cas, l'épaisseur de laine de bois est de 12.5 cm dans les murs et 12 cm dans les combles.

Les résultats sont indiqués ci-dessous.

Degrés-heures d'inconfort	Isolation standard, 10 cm	Laine de bois, 10 cm	Laine de bois, même résistance thermique
Surventilation nocturne 2 vol/h	732 °C.h	747,5 °C.h	699 °C.h
Surventilation nocturne 10 vol/h	122 °C.h	122 °C.h	107 °C.h

Selon ces résultats, le déphasage de l'isolant biosourcé n'apporte qu'une très faible amélioration à résistance thermique égale. Sa plus forte conductivité dégrade même le confort à épaisseur égale. L'intérêt des matériaux biosourcés est plutôt liée à leur bilan carbone plus favorable.

5.3.7. Mesures actives : Brasseur d'air & Puits Climatique

Jusqu'à présent, essentiellement des mesures passives ont été étudiées pour améliorer le confort d'été :

- Isolation et vitrages
- Inertie thermique
- Ventilation naturelle par les fenêtres
- Occultation des fenêtres
- Végétalisation des façades

On va s'intéresser maintenant aux mesures actives suivantes :

- Brasseur d'air
- Puits climatique
- Climatisation : cf : Maison Années 50 : Nîmes Urbain, 2100, Extrême – Climatisation en zonage thermique

Brasseur d'air :

Dans le module STD COMFIE de Pleiades, dans l'onglet résultat, on peut afficher un diagramme de l'air humide, de Givoni, après avoir activé les paramètres de confort. Ce dernier, représenté en deux diagrammes avec la Figure 183, est caractérisé par l'humidité absolue (en kg/kg_{air sec}) en ordonnée et la

température sèche de l'air (°C). Selon les lignes orange en escalier, on retrouve l'humidité relative, allant de 10 à 100% (courbe de saturation).

Afin d'être plus représentatif de la notion du confort, on peut en effet tenir compte de l'humidité. On aura par exemple tendance à davantage transpirer avec un climat humide qu'un climat sec.

Dans la Figure 183, la zone de confort acceptable est identifiée par le trait orange lisse qui forme une sorte de maisonnette. Ces résultats concernent la maison neuve, avec un scénario de ventilation de 02 vol/h sous contrôle, et une occultation des fenêtres la journée. Bien entendu, le fichier météo de Paris Urbain, Lointain, vague médiane, a toujours été utilisé.

Dans le premier diagramme, on n'utilise pas de brasseur d'air. Dans le second, on en utilise un dans la chambre des parents avec un débit modélisé à 1 m/s (en catégorie d'ambiance I).

Dans le 1^{er} cas, on a un confort estimé à 82,2% sur le temps d'occupation (calculée à partir des heures de confort de Pleiades, et non des DH). Dans le 2nd cas, avec l'utilisation d'un brasseur d'air, la zone de confort s'élargit et on passe à 94,4% de confort sur le temps d'occupation.

A savoir qu'un tel ventilateur consomme environ 50 W d'électricité. Les brasseurs d'airs ne rejetant pas de la chaleur directement à l'extérieur au même titre qu'un climatiseur, ces derniers représentent alors un avantage quant à leur utilisation.

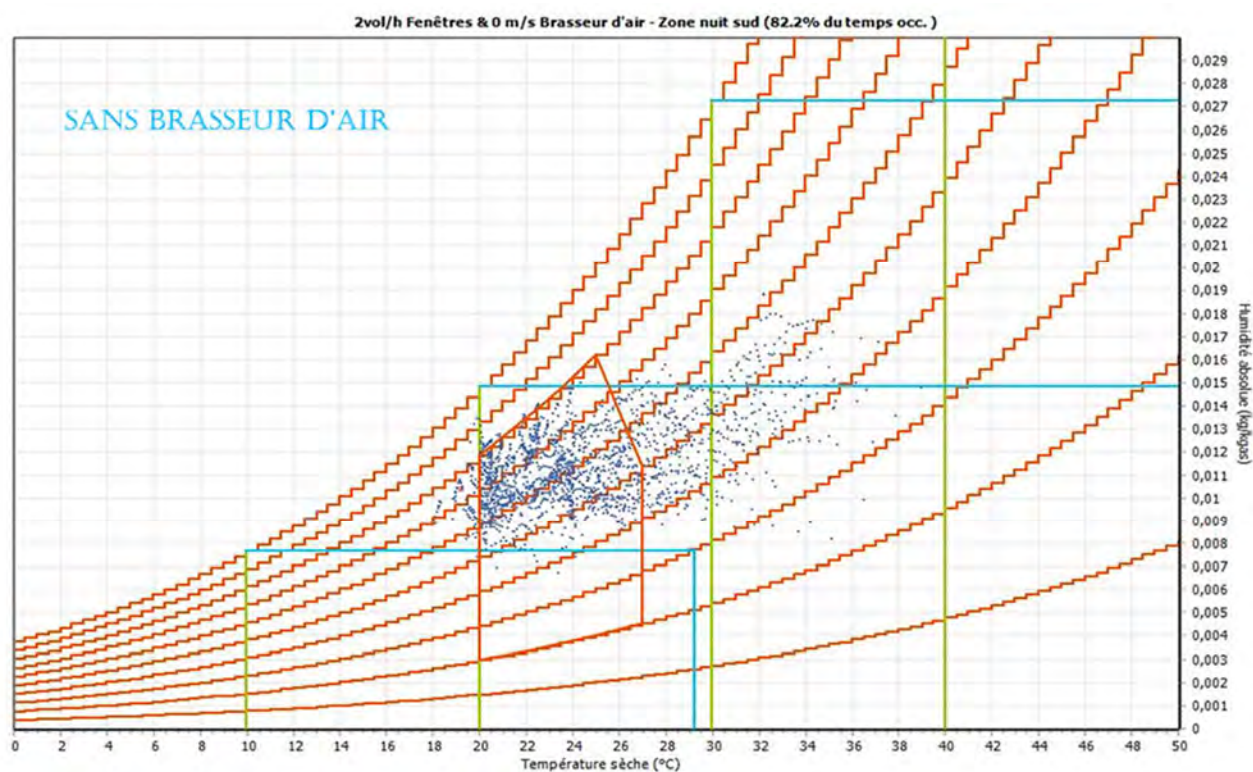
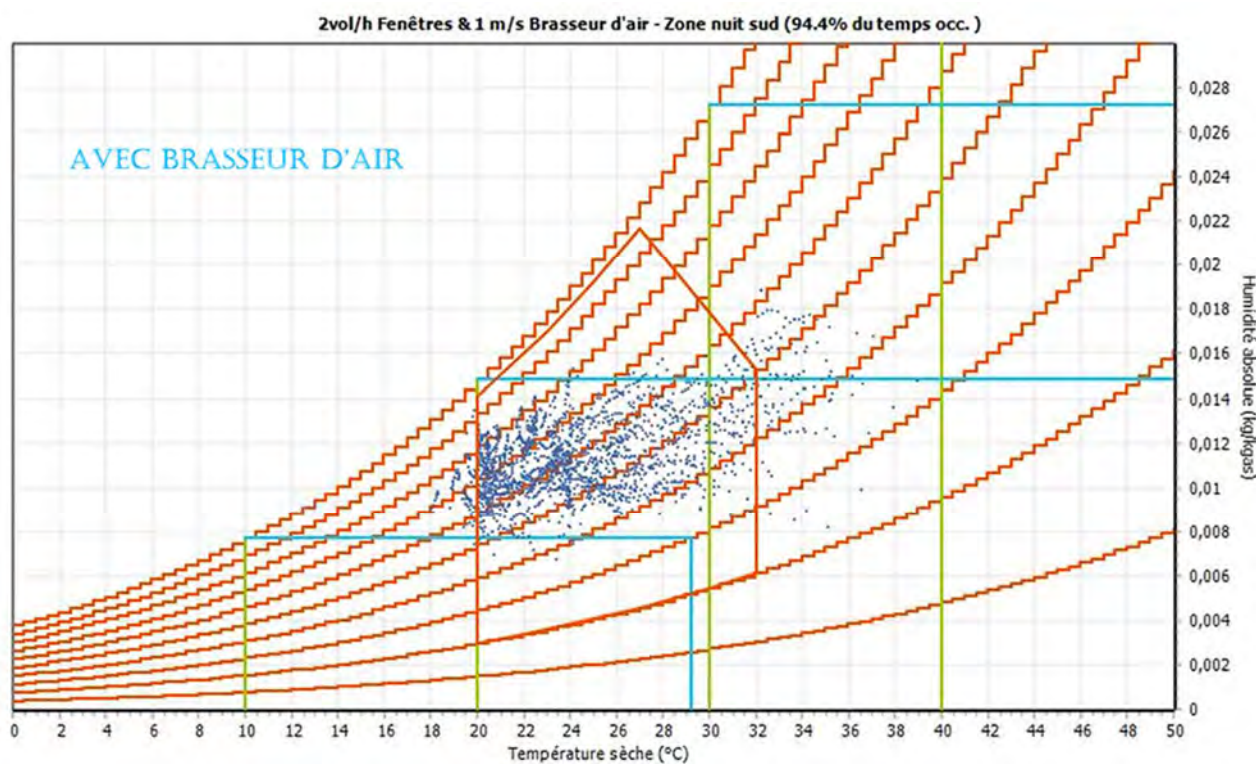


Figure 183 : Utilisation d'un brasseur d'air



Puits climatique :

Une autre solution permettant l'amélioration du confort en été et même en hiver, consiste à faire usage de puits climatique. Le principe étant de faire passer l'air extérieur dans le sol avant d'être inséré dans la maison. En hiver, le sol étant plus chaud que l'air extérieur, l'air se voit ainsi réchauffé. A l'inverse, en été, le sol étant plus frais que l'air ambiant, celui-ci se voit rafraîchi.

Nous avons modélisé dans le module STD COMFIE de Pleiades un tel puits, pour la maison neuve. Voici la manière dont a été paramétré le puits climatique :

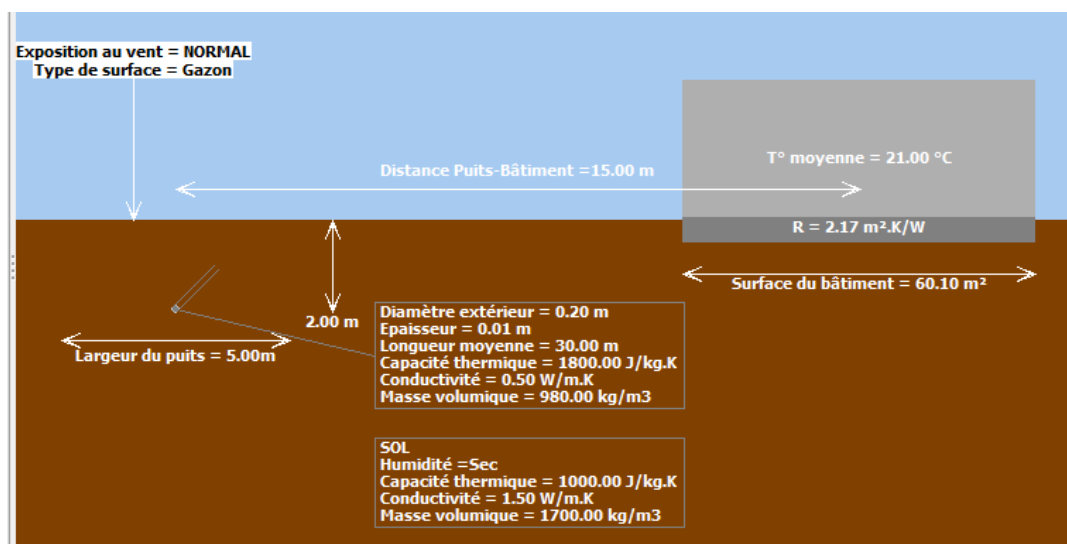


Figure 184 : Paramètres Puits climatique

Dans un premier temps, nous avons considéré que le débit apporté dans les pièces de vie via le puits est le même que le débit hygiénique, soit 0.5 vol/h.

Avec un débit de ventilation nocturne de 02 vol/h et une occultation des fenêtres en journée, voici les résultats que nous obtenons dans la zone nuit (cf Figure 186 et Figure 185) :

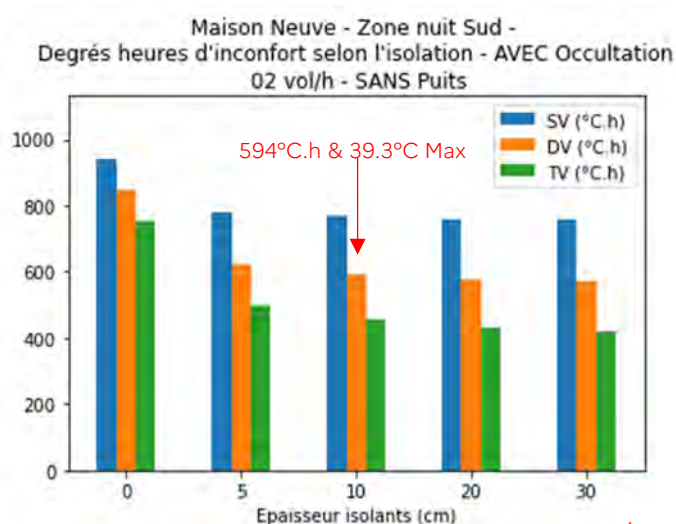


Figure 185 : SANS Puits

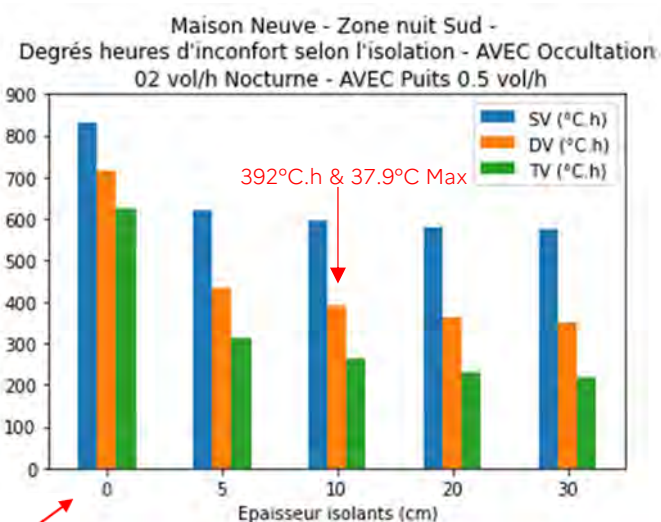


Figure 186 - AVEC Puits

D'après double

les figures ci-dessus, avec du vitrage et 10 cm d'isolants, on a un gain de 1,4°C sur la température maximale et une diminution de 200°C.h, ce qui est très appréciable. Ainsi, l'utilisation de puits climatique représente une solution très intéressante quant au gain sur le confort d'été. De plus, ce dernier permet aussi de réduire les besoins en chauffage l'hiver, par rapport à une VMC classique (sans échangeur).

Dans un deuxième temps, on compare deux débits d'air dans le puits : 0.5 vol/h dans toutes les pièces de vie ou 1 vol/h dans ces mêmes pièces (cf Figure 187 et Figure 188).

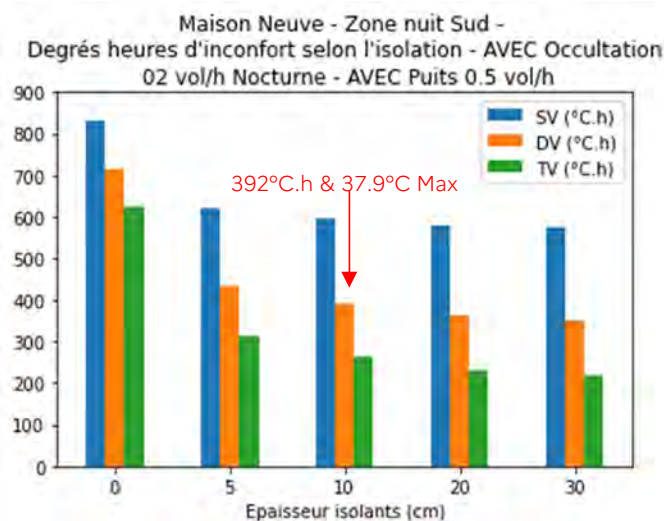


Figure 188 : Puits avec 0.5 vol/h

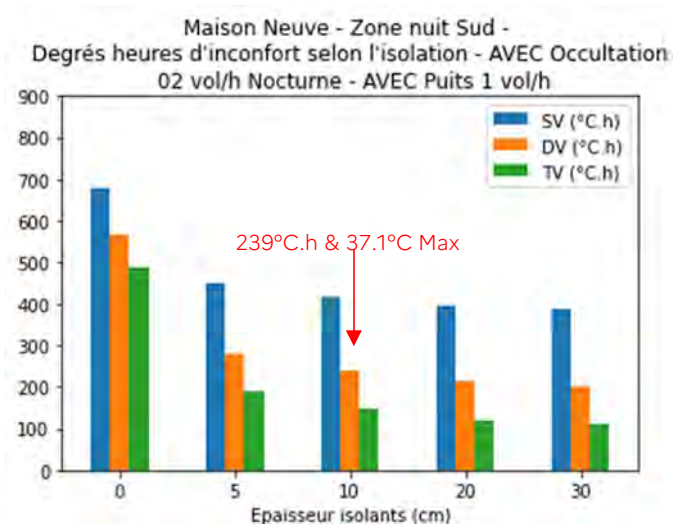


Figure 187 : Puits avec 1 vol/h

Cette comparaison de figures nous permet de constater une diminution des DH à mesure qu'on augmente le débit de ventilation apporté par le puits. A titre d'exemple, on passe de 392 °C.h à 239 °C.h en configuration DV et 10 cm.

Il est alors important pour le confort d'été de prendre en compte ce débit et de ne pas se contenter systématiquement d'un dimensionnement sur le débit hygiénique qui pourrait être insuffisant.

Et si on ne fait rien ?

Cette fois-ci, avec la maison neuve (isolée en ITE avec 10 cm), toujours sur le même fichier météo de fin de siècle (2080/2100), voici un exemple des températures à l'intérieur de la chambre exposée au sud que l'on pourrait avoir si l'on ne met aucune action en place et que les usagers du bâtiment ne font rien pour améliorer leur confort : (cf Figure 189)

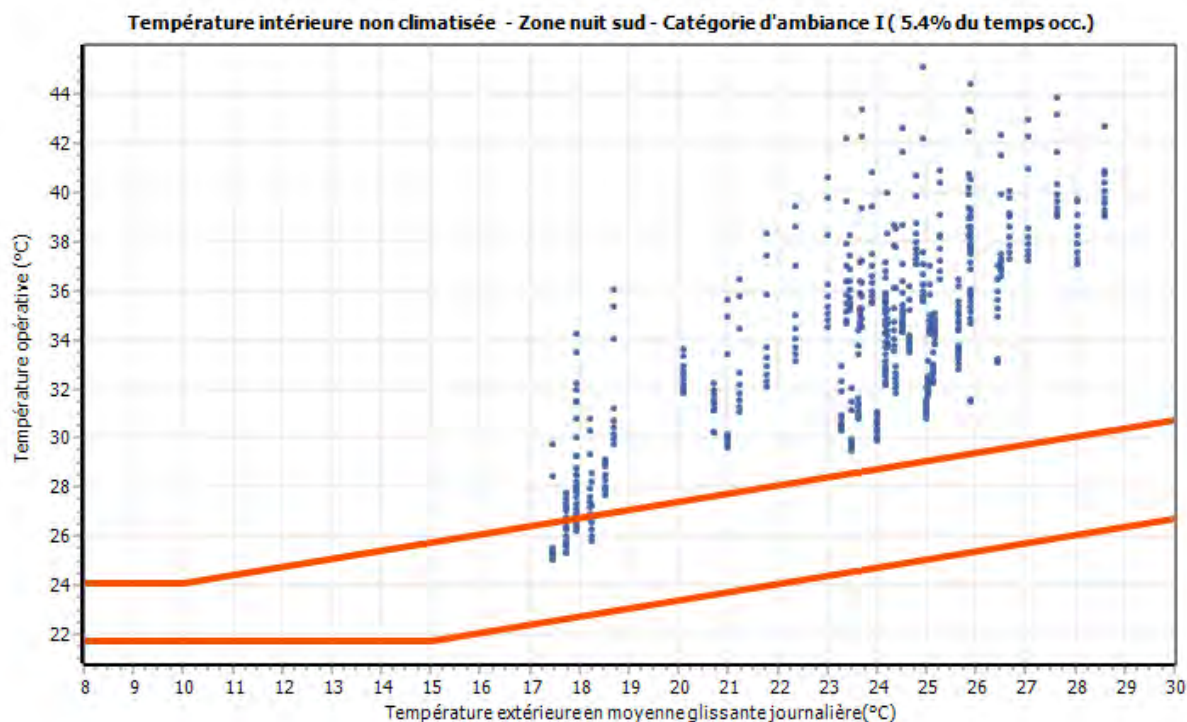


Figure 189 : Maison Neuve, Diagramme de confort adaptatif

Comme le montre la Figure 189, sur la période estivale qui a été simulée, soit, du 14 Mai au 23 Septembre, seulement 5,4% du temps d'occupation de la chambre est considéré comme confortable. Les températures avoisinent beaucoup les 32 à 38°C, ce qui est très embêtant pour pouvoir dormir correctement, elles peuvent atteindre plus de 44°C.

A l'inverse, si on ouvre toutes ses fenêtres quand il fait plus frais dehors (débit estimé à 10 vol/h), qu'on fait recours à un puits climatique, qu'on occulte bien ses fenêtres la journée, alors, on arrive à obtenir 100% de confort, malgré ces prévisions météorologiques de fin de siècle.

C'est pourquoi, on insiste sur le fait que les usagers des bâtiments jouent un rôle majeur dans l'amélioration de leur confort, comme l'a si bien illustré la Figure 173 avec le fichier météo de la Canicule de 2003.

5.4. Les 15 autres fichiers météo du Projet Résilience

A présent, vous retrouverez les résultats concernant les 15 autres fichiers météo du projet, afin de tenir compte de l'ensemble des évolutions climatiques que l'on est susceptible de connaître, en France. A travers ces fichiers, on tient alors compte de :

- Niveau de sévérité : vague de chaleur médiane ou extrême
- Îlots de chaleurs : milieu urbain ou rural
- Evolution temporel : horizon 2050 ou 2100
- Localisation : Paris ou Nîmes

La Figure 190 ci-dessous représente le profil de la température extérieure prévue en France par le CNRM, à Paris Urbain, vague de chaleur extrême, pour un horizon 2050 puis 2100.

A titre de comparaison, sur cette figure est également représentée, en vert, le profil de température pour la canicule française de 2003.

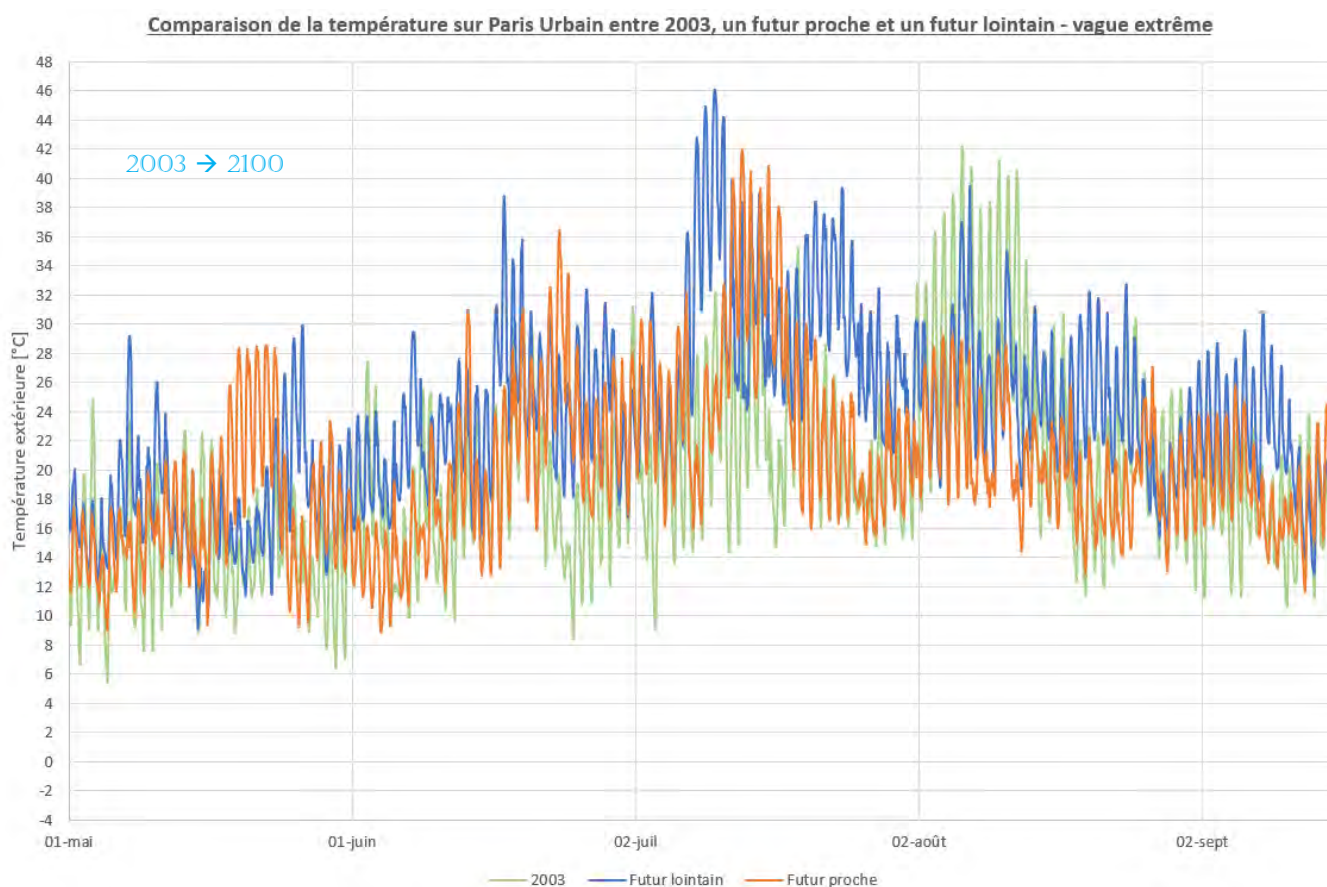


Figure 190 : Evolution temporelle de la température - CNRM

Observations sur la Figure 190 :

- La courbe orange de futur proche est globalement, sur l'année, au-dessus de la courbe verte de 2003. On observe notamment que les températures descendent moins bas les nuits en 2050, par rapport à 2003.
- En futur proche, une vague de chaleur d'intensité égale mais d'une durée un peu plus courte qu'en 2003 est prévue, avec un pic de chaleur à 42°C.
- En futur lointain, la courbe bleue est globalement au-dessus de celle de la canicule de 2003 et du futur proche. On s'attend à un mois de juillet particulièrement chaud, avec un pic de chaleur à 46°C. Sur une durée de quatre jours, on remarquera que la température descend difficilement en-dessous de 32°C durant la nuit : ceci risque d'être particulièrement gênant pour passer une nuit confortable.

Ainsi, d'après l'évolution de la température extérieure observée via la Figure 190, on observe bien une prise en compte des changements climatiques en France qui sont à l'origine d'une hausse de la température extérieure. On s'attend alors à avoir une augmentation des degrés heures dans les résultats à venir et donc, une hausse de l'inconfort estival.

C'est ce que nous allons pouvoir vérifier dans les pages suivantes de ce document.

5.4.1. Haussmannien à Paris

En 2019, d'après les données du Ceren dont l'ADEME s'appuie dans ses rapports annuels, on estime à près de 44% la proportion d'appartements pour les résidences principales du parc résidentiel français. Les bâtiments haussmanniens représentent une part importante des appartements situés à Paris Urbain, c'est pourquoi, étudier des résultats de simulations thermiques de ces bâtiments nous semble pertinent. De plus, ces derniers étant marqués par des contraintes sur la volonté à effectuer des rénovations (le changement de l'esthétique de la façade extérieure pour une ITE ou la diminution de la surface habitable

en ITI), il est important de trouver des solutions alternatives et/ou complémentaires pour améliorer la résilience de ces bâtiments.

5.4.1.1. Comparaison 2050-2100, Médian

Ci-dessous en Figure 191, les résultats obtenus en vague médiane, sur la comparaison temporelle des fichiers météo, avec le bâtiment Haussmannien à Paris Urbain :

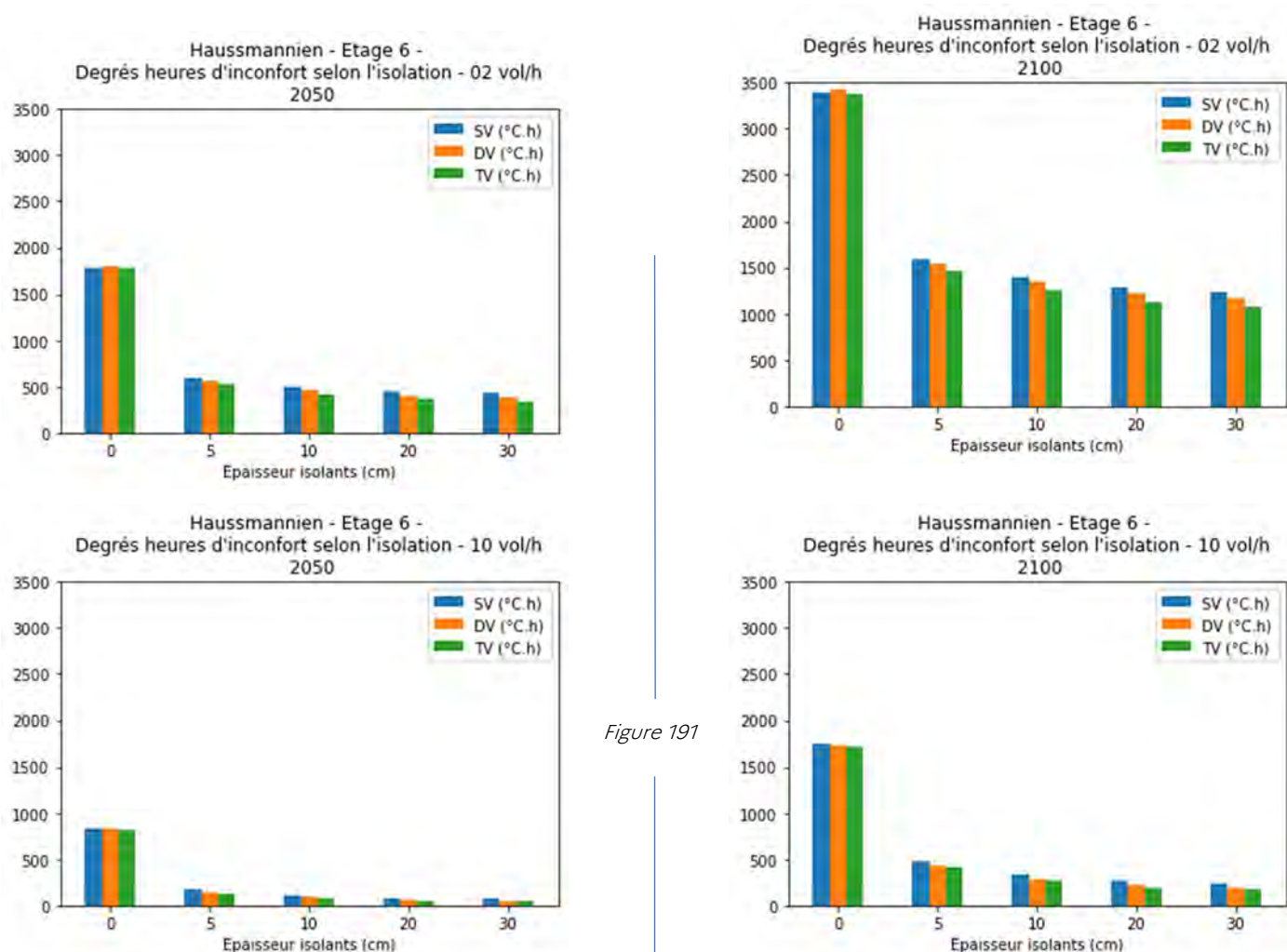


Figure 191

D'après la Figure 191, en configuration isolée (toute épaisseur d'isolant ≥ 5 cm) et pour les deux débits de ventilation nocturne, on a en moyenne trois fois plus de DH en horizon 2100 par rapport à 2050, ce qui confirme les conclusions de la Figure 190. En 2100, on voit d'autant plus l'intérêt de ventiler avec un débit élevé, on a effectivement un gain important sur la diminution des DH en ayant 10 vol/h de ventilation nocturne par rapport à 02 vol/h. Isoler avec 20 ou 30 cm n'apporte pas d'intérêt ici.

5.4.1.2. Comparaison Médian-Extrême, 2100

A présent, on s'intéresse à la comparaison des deux vagues de chaleur : médiane ou extrême. En plus de tenir compte des incertitudes du réchauffement climatique à venir, cette distinction de l'intensité entre les deux vagues est surtout là pour nous rappeler que selon les années, on a des vagues de chaleur plus ou moins intenses.

Comme le montre la Figure 192 ci-dessous, en dehors de la vague de chaleur sur l'été (juin à Août), le profil de température extérieure est le même sur le reste de l'année.

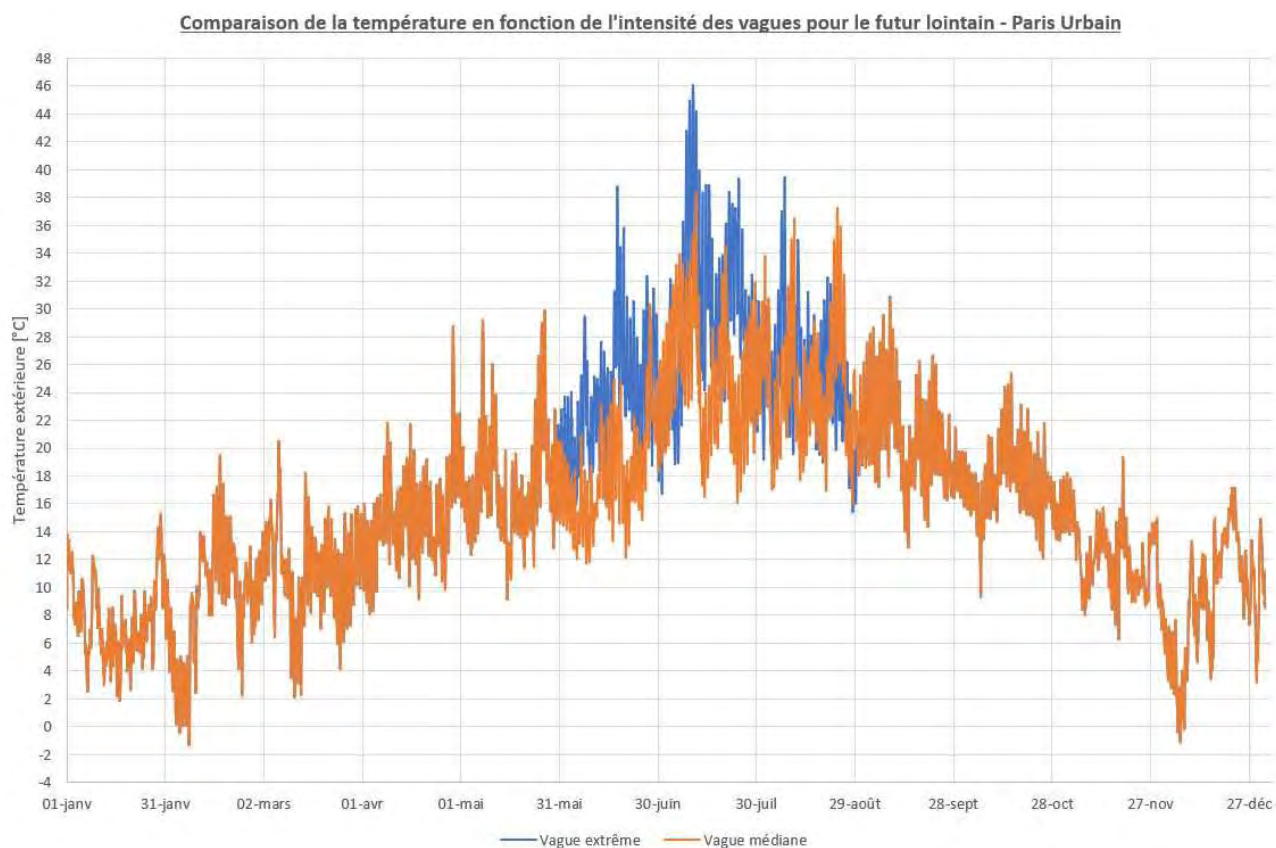


Figure 192 : Intensité des vagues de chaleur – CNRM

D'après cette figure, à Paris Urbain en horizon 2100, il est prévu un pic de chaleur atteignant les 46°C. Les surchauffes étant bien plus importantes avec la « vague extrême » par rapport à une vague dite « médiane ».

Cette vague extrême correspond à un épisode caniculaire important, qui, en principe, n'aura pas lieu chaque année sur la période de fin de siècle considérée. Ainsi, compte tenu du réchauffement climatique et des incertitudes à venir, on peut s'attendre à avoir des seuils de températures qui fluctueront selon les valeurs obtenues en vague médiane et en vague extrême.

A présent, voici en Figure 193 les résultats d'évolution des DH sur le bâtiment Haussmannien, compte tenu de la comparaison des deux vagues à Paris Urbain en horizon 2100 :

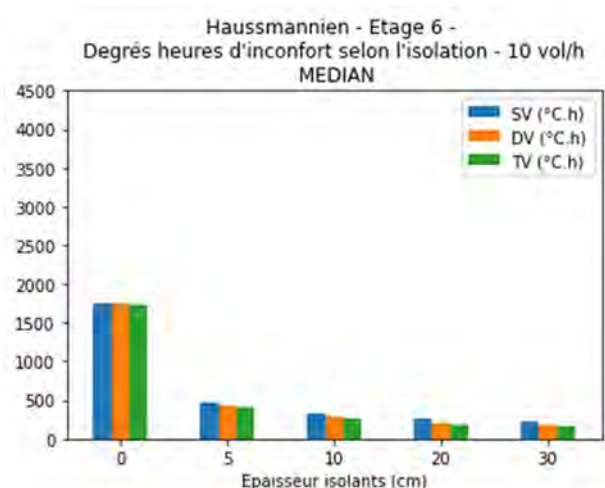
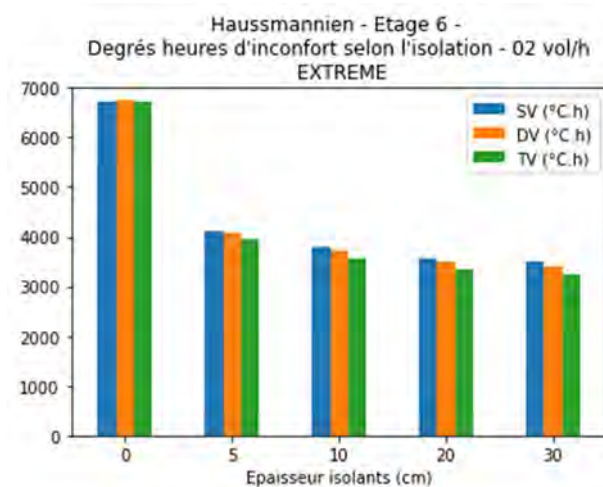
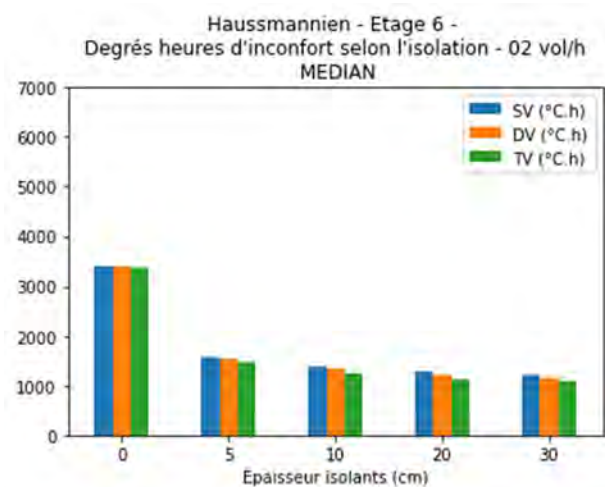
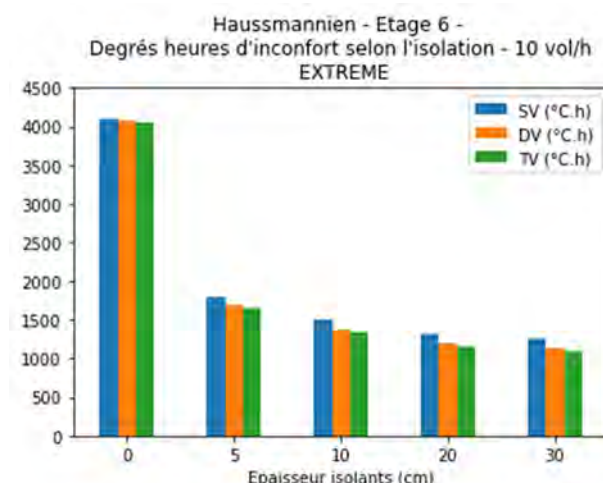


Figure
193



Comme attendu avec les observations précédentes de la Figure 192, on a un inconfort estival bien plus important en vague extrême, par rapport à une vague médiane : on a approximativement un facteur trois. Même constat qu'avec la Figure 191, une isolation avec 20 ou 30 cm n'apporte que très peu d'intérêt sur le gain en confort estival. Ce sont surtout avec les 5/10 premiers centimètres d'isolants que le gain en confort estival se fait ressentir de façon importante.

On observe ici peu de différence entre les trois configurations de vitrages (même si l'inconfort reste un plus élevé avec du simple vitrage). Ceci varie selon l'exposition au soleil et donc, l'orientation des façades où sont installées les menuiseries. En l'occurrence, cet étage 6 comporte un total de 10 menuiseries dont 2 au sud, 4 à l'ouest et 4 au nord, il est donc cohérent d'avoir ici peu d'écart entre les trois configurations de vitrages.

5.4.1.3.Comparaison Urbain-Rural, 2100, Extrême

A présent, on s'intéresse à comparer l'inconfort estival du bâtiment Haussmannien entre le milieu Urbain et Rural de la région parisienne.

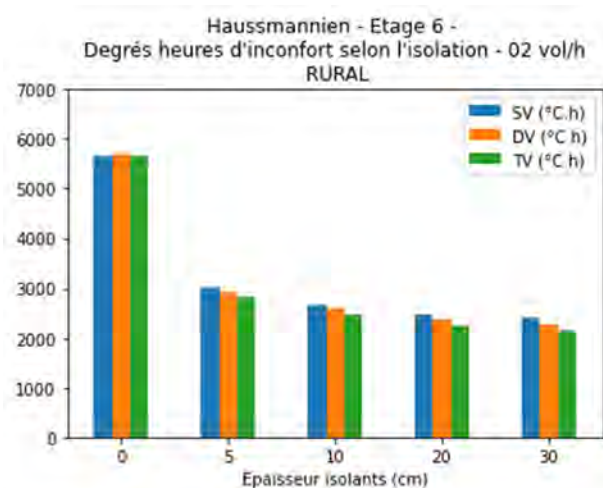
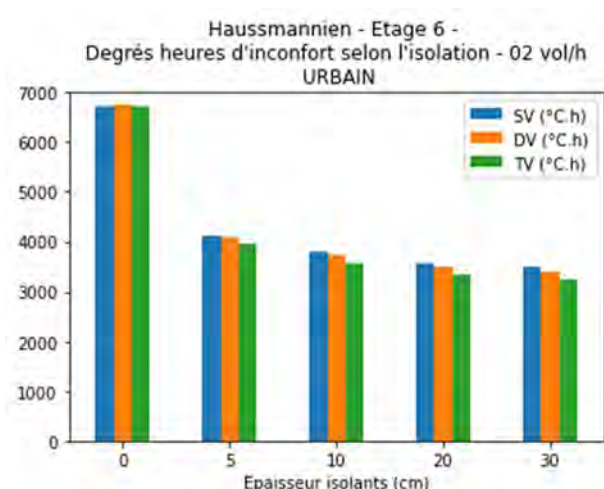
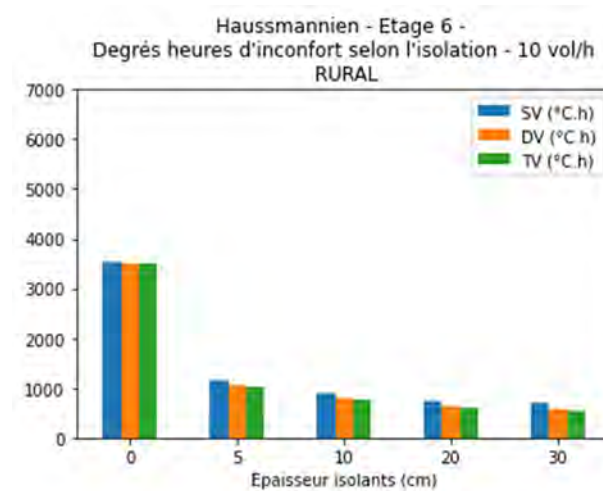
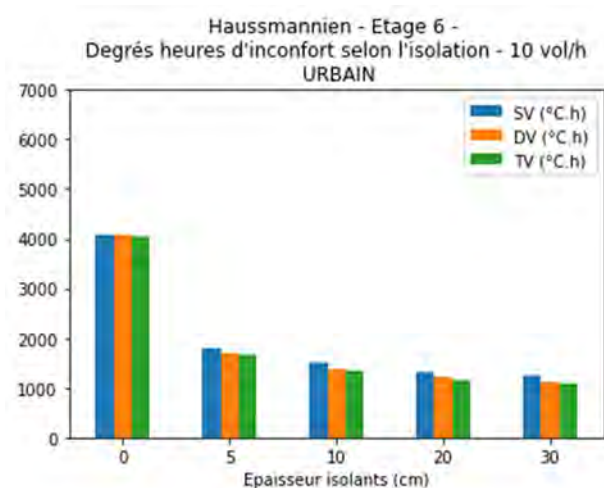


Figure 194



D'après cette Figure 194, on obtient un meilleur confort en milieu rural (c'est-à-dire sans îlot de chaleur). Par exemple, en 02 vol/h, en configuration double vitrage et 10 cm d'isolants, on a une diminution de 1137°C.h par rapport au milieu urbain (avec îlot de chaleur). Cette diminution est de 597°C.h pour 10 vol/h. La végétalisation apporterait donc un peu de fraîcheur aux bâtiments.

5.4.2. Maison neuve : Paris et Nîmes, 2 Dates, 2 Niveaux de sévérité

A présent, on s'intéresse à comparer les lieux de Paris et Nîmes pour 2 dates et 2 niveaux de sévérité. On regardera les résultats obtenus avec la maison neuve, en milieu rural.

Mais avant cela, observons les profils de températures extérieures pour un horizon 2100, à Nîmes et Paris, vague extrême (cf Figure 195).

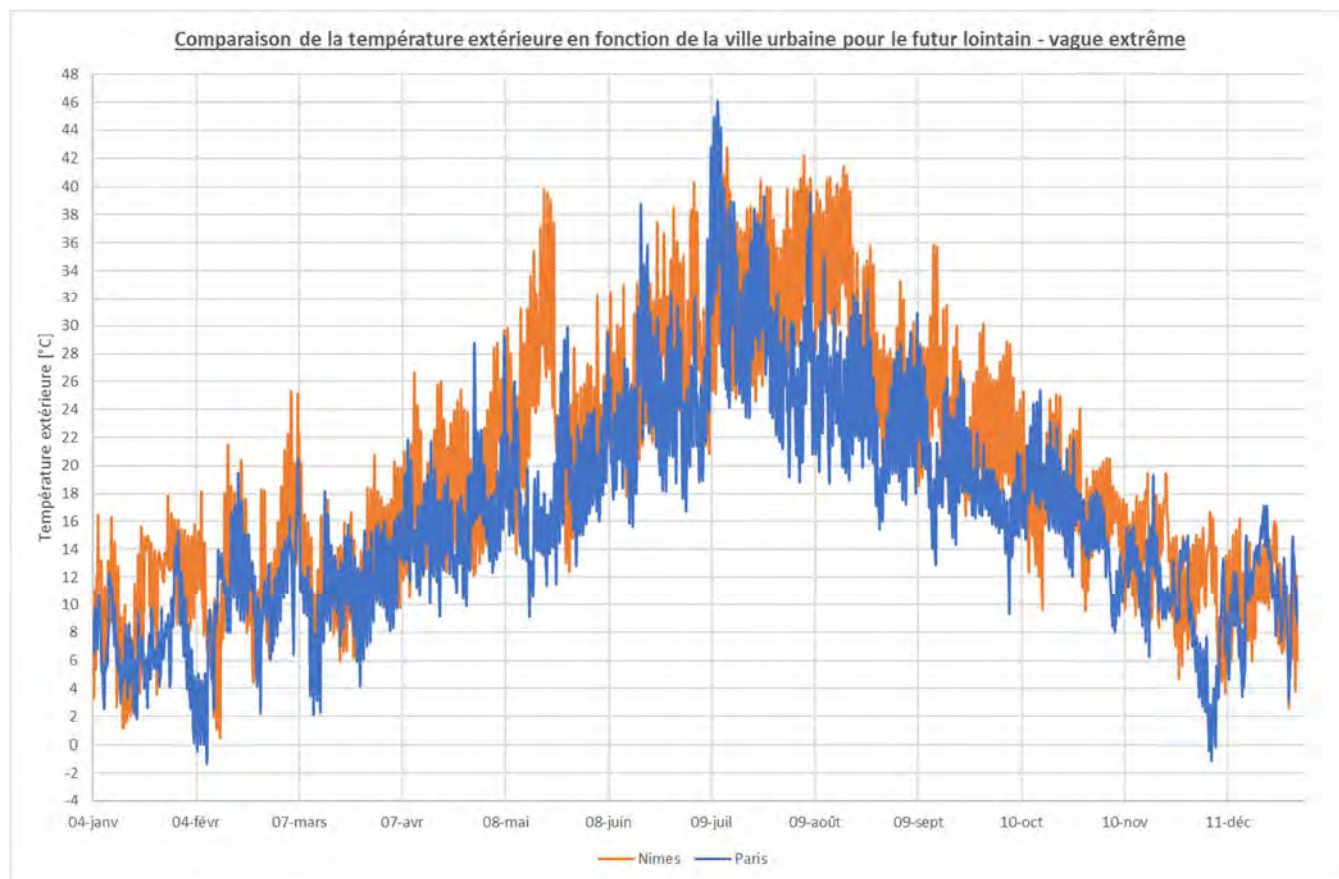


Figure 195 : Comparaison Text - Nîmes vs Paris

D'après la Figure 195, on remarque que globalement, sur l'ensemble de l'année, la température extérieure de Nîmes est supérieure de 4°C en moyenne : il fait plus chaud en journée et la nuit les températures descendent plus bas sur Paris. Ce dernier point est particulièrement embêtant puisqu'il risque de diminuer l'intérêt de la ventilation nocturne. On s'attend donc à avoir bien plus de degrés heures à Nîmes que sur Paris et ce, que l'on soit en milieu urbain ou rural.

C'est ce que nous allons voir à présent à travers les résultats des prochaines simulations.

On considèrera un milieu rural pour rester cohérent avec ce type de bâtiment (une maison individuelle) que l'on ne retrouverait pas, ou très peu, au sein de la ville de Paris.

5.4.2.1.Comparaison Paris-Nîmes, 2050, Médian

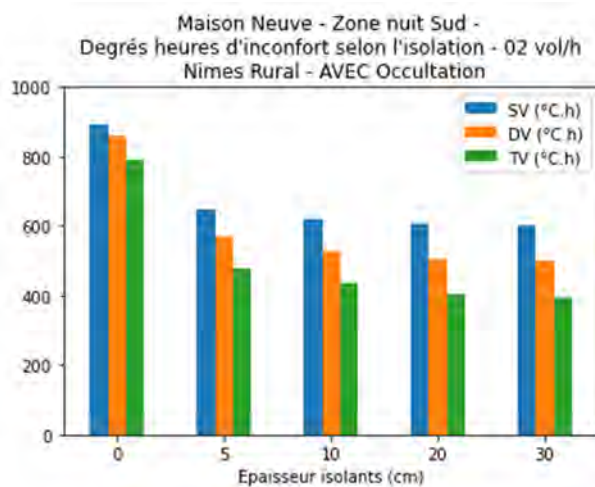
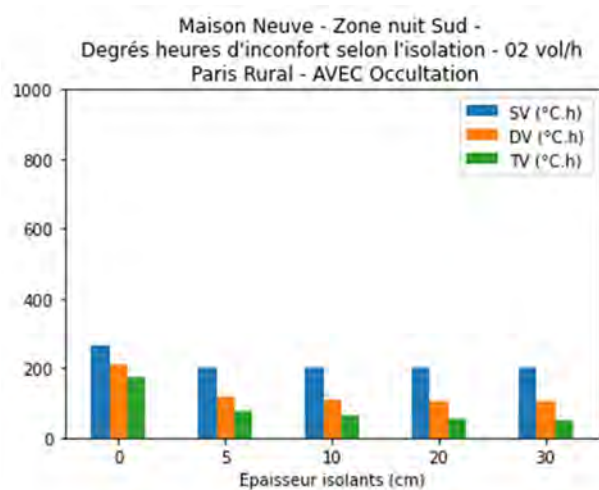
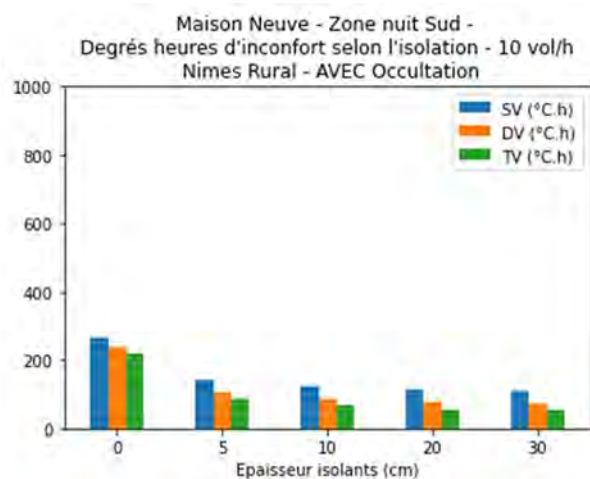
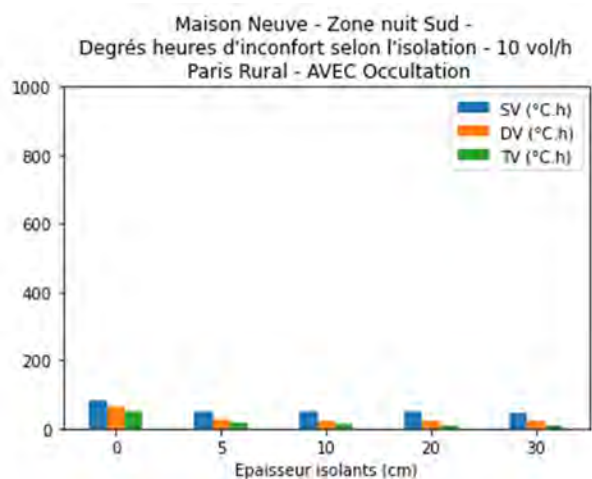


Figure 196



D'après la Figure 196, on pourrait s'attendre, en 2050, à avoir en moyenne trois à quatre fois plus de DH sur Nîmes que sur Paris. L'inconfort estival dans les bâtiments du sud de la France serait donc bien plus important que dans le nord. Cela confirme les observations constatées avec les profils de températures de la Figure 195.

5.4.2.2. Comparaison Paris-Nîmes, 2100, Médian

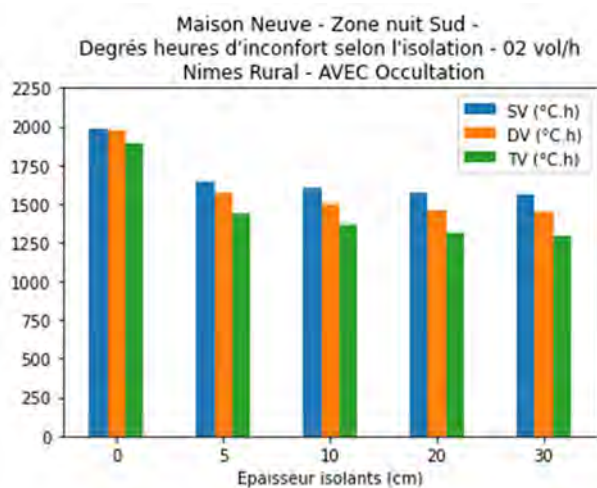
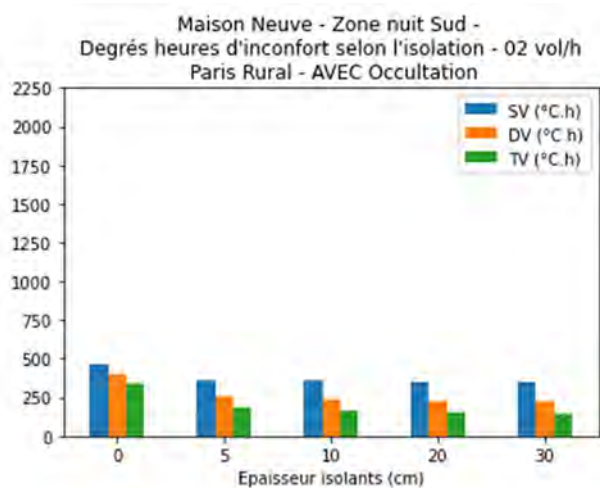
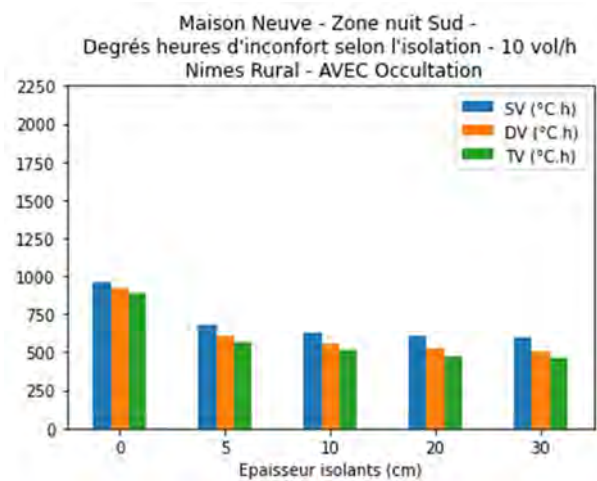
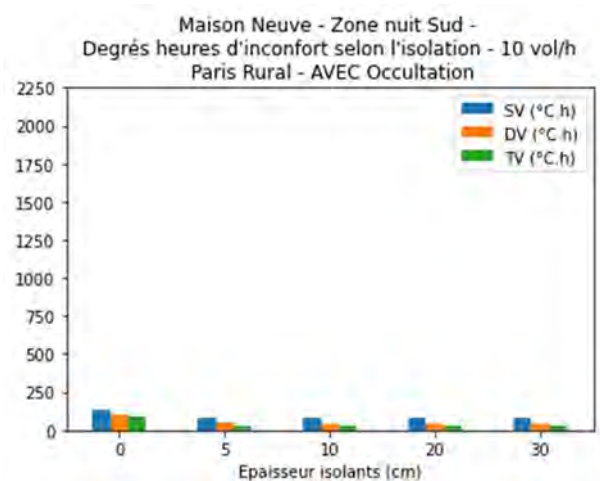


Figure 197



Le constat avec cette Figure 197 est encore plus alarmant que celui de la figure précédente. En effet, en 2100 (médian), l'écart de confort estival est d'autant plus marqué qu'en 2050 (médian). On retrouve ici un facteur 6 sur la hausse des degrés heures à Nîmes avec un débit de 02 vol/h.

5.4.2.3. Comparaison Paris-Nîmes, 2050, Extrême

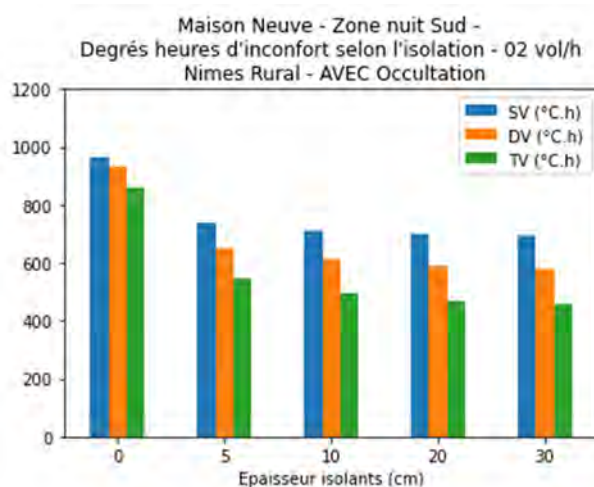
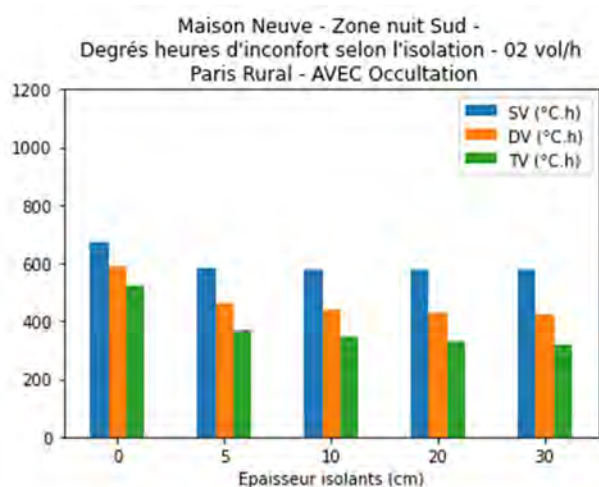
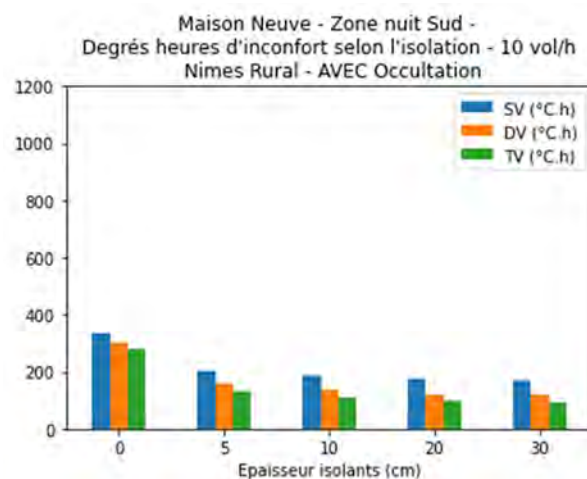
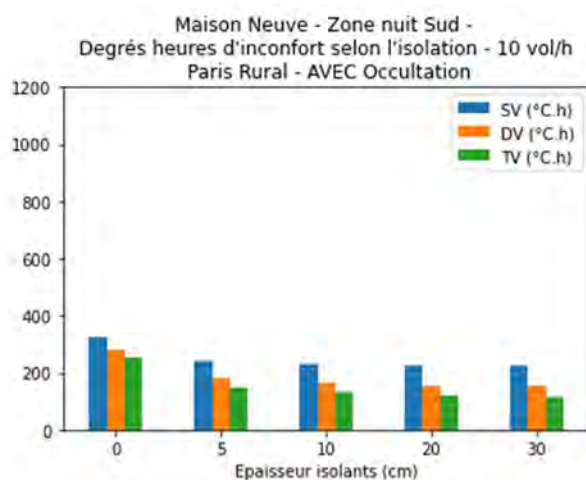


Figure
198



A présent, dans une vague extrême d'horizon 2050, on constate que l'écart entre Paris et Nîmes se fait bien moins ressentir qu'une vague médiane, comme l'on avait observé avec la Figure 196.

En 10 vol/h de débit de ventilation nocturne, on arrive même à avoir un confort légèrement plus agréable sur Nîmes rural par rapport à Paris rural.

Nous pensons que cet écart très faible des DH entre Nîmes et Paris est propre à ces fichiers météo extrême en milieu rural (et d'horizon 2050) qui ont été utilisés. Il semblerait toutefois que les différences en termes de confort d'été entre le nord et le sud de la France se fassent davantage ressentir sur des vagues médianes.

5.4.2.4. Comparaison Paris-Nîmes, 2100, Extrême

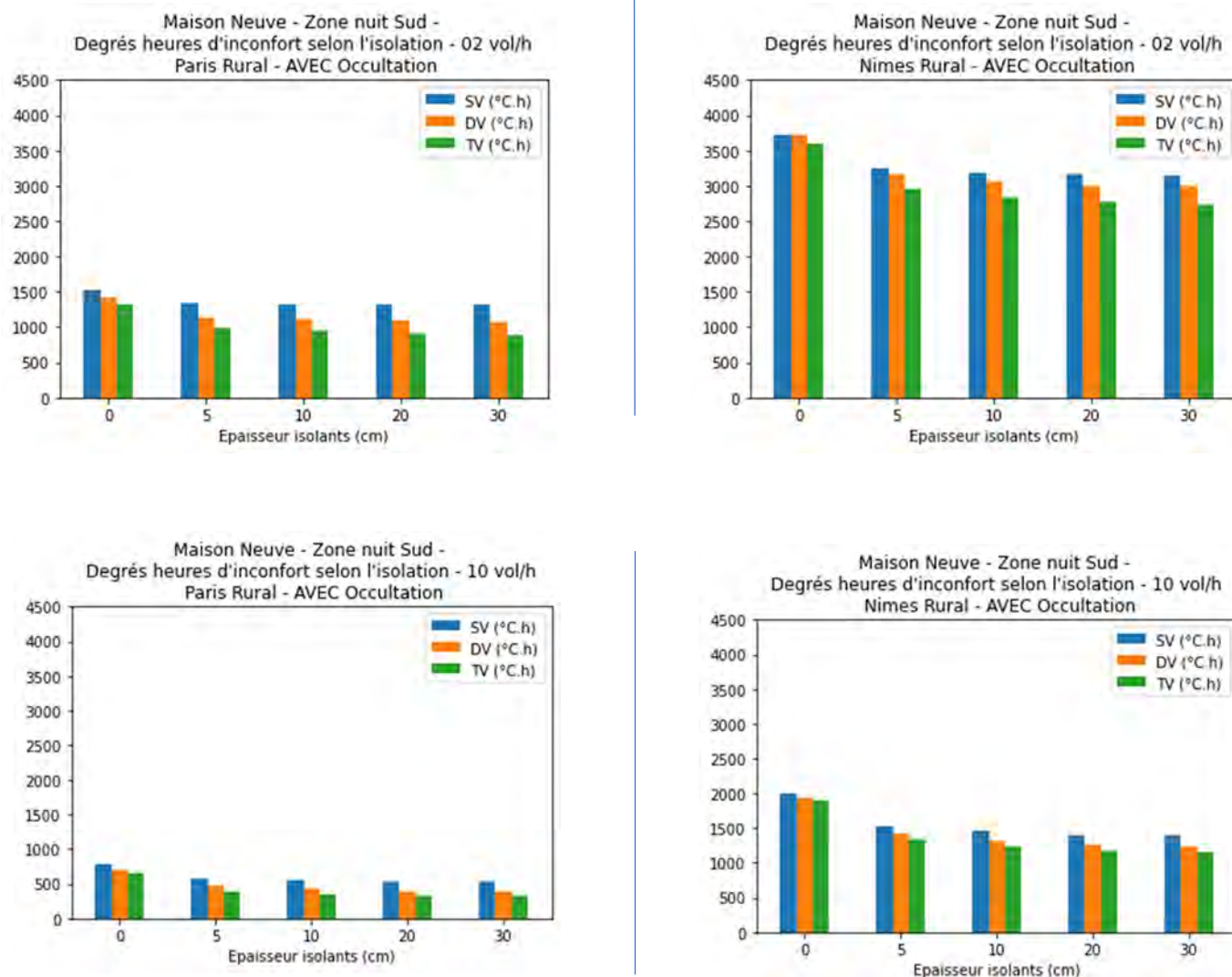


Figure 199

Cette fois-ci, comme le montre la Figure 199 on retrouve environ trois fois plus de DH à Nîmes que sur Paris. Cet écart est donc moins important qu'avec une vague dite médiane pour un même horizon temporel (2100).

On peut s'attendre à avoir jusqu'à plus de 3000 °C.h sur Nîmes si l'on ventile avec 2 vol/h en nocturne (dès qu'il fait plus frais dehors). Cette valeur très élevée rend compte du fait qu'il fera, au cours de l'été, très souvent au-delà du seuil de température intérieur fixé à 28/30°C pour des habitations.

Ainsi, ce bâtiment, malgré qu'il soit récent et réponde à la réglementation RT2012, ne respecte plus la réglementation RE2020 sur le confort d'été qui a été estimé ici pour la fin du siècle. Le seuil maximal de 1250°C.h est en effet clairement dépassé.

Cette étude montre également que l'occultation des fenêtres, l'ouverture de ces dernières et une isolation en ITE ne sont pas suffisantes pour garantir un confort d'été acceptable. Ces mesures sont bien entendu nécessaires mais à compléter par d'autres solutions.

Que faire dans ce cas pour améliorer le confort d'été ?

On vous invite à voir la partie « Maison Années 50 : Nîmes Urbain, 2100, Extrême – Climatisation en zonage thermique » qui pourrait être une solution intéressante pour des zones où la chaleur est particulièrement insupportable, comme dans le sud de la France. Les brasseurs d'airs peuvent être aussi une bonne alternative à de la climatisation comme l'a montré la Figure 183.

5.4.2.5. Comparaison Paris Médian-Extrême, 2100

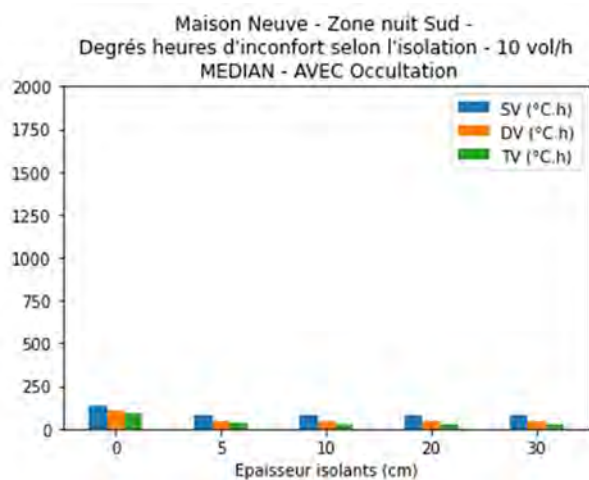
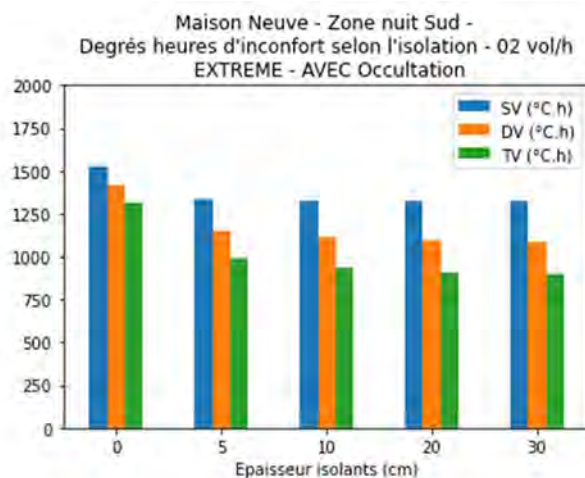
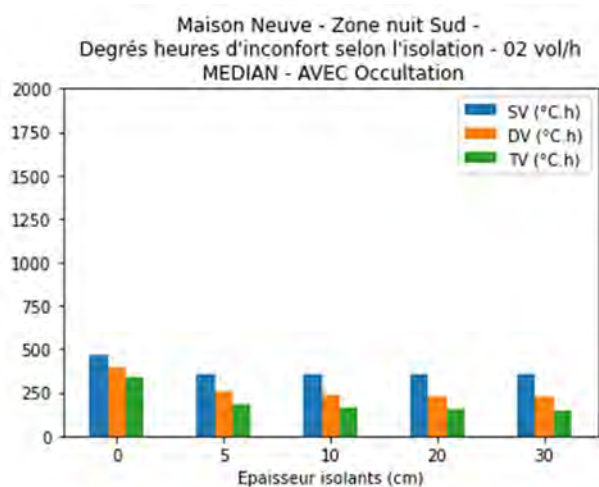
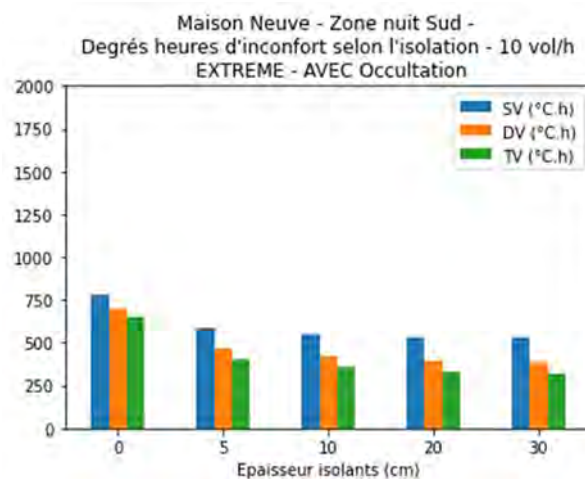


Figure 200



Comme le montre la Figure 200, on retrouve quatre à cinq fois plus de DH en vague extrême (selon le débit de ventilation). On remarque également qu'augmenter le débit de ventilation nocturne à 10 vol/h permet une diminution par 2 ou 3 des DH par rapport à un débit de 02 vol/h.

5.4.3. HLM : Nîmes Urbain, 2 Dates, 2 Niveaux de sévérité

A présent, on s'intéresse au bâtiment HLM de Montreuil et à étudier le caractère temporel des données climatiques dans un 1^{er} temps puis une comparaison vague médiane vs vague extrême pour 2100 dans un 2nd temps. Dans les deux cas, nous serons situés à Nîmes Urbain, on peut donc s'attendre à avoir davantage d'inconfort estival que sur Paris.

5.4.3.1. Comparaison 2050-2100, Médian

En Figure 201 vous retrouverez les résultats qui l'horizon 2050 et l'horizon 2100.

comparent l'inconfort estival du HLM à Nîmes,

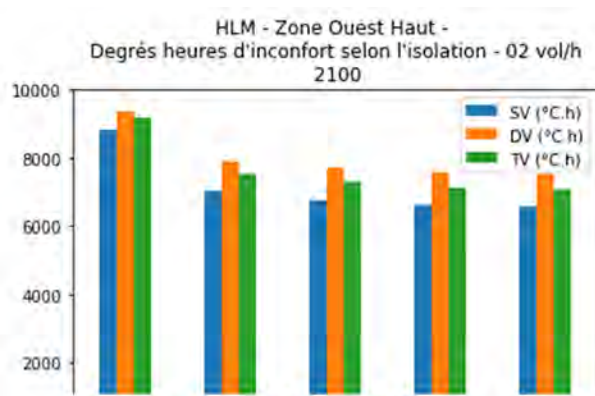
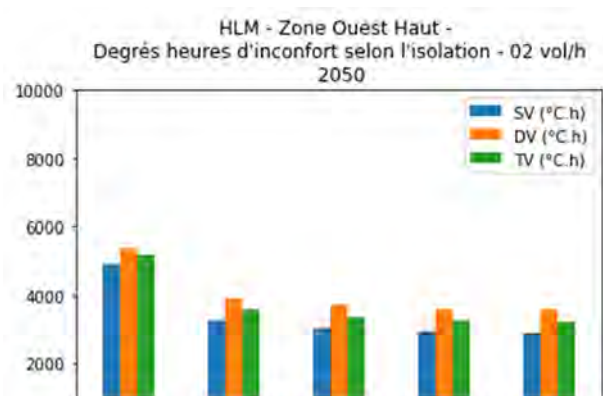
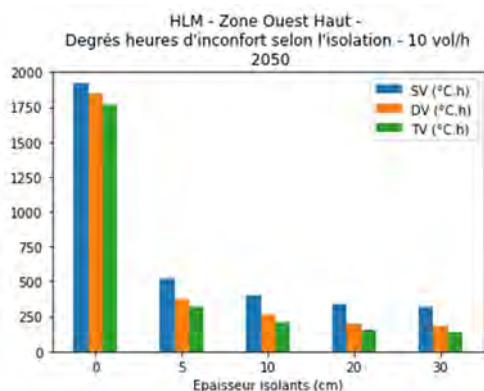
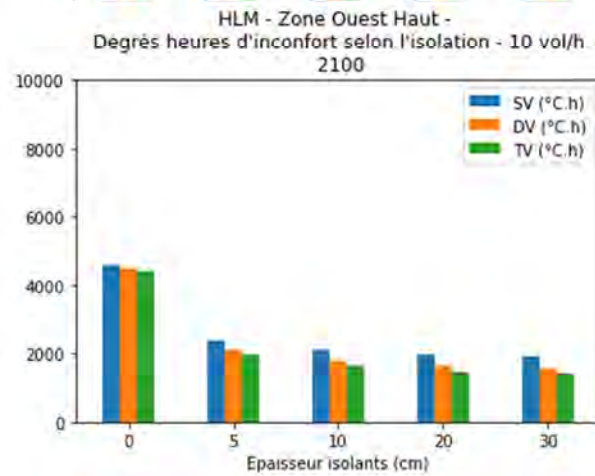
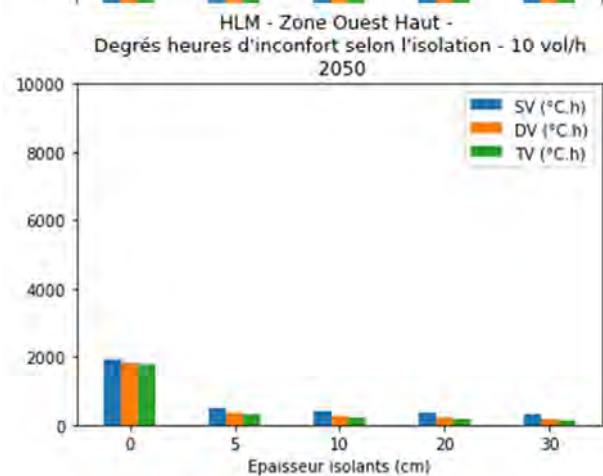


Figure 201



D'après la Figure 201, on peut s'attendre à avoir beaucoup plus d'inconfort estival à l'horizon 2100 par rapport à l'horizon 2050. On observe effectivement 2 fois plus de DH. Un haut débit de ventilation nocturne doit être privilégié

5.4.3.2. Comparaison Médian-

Extrême, 2100

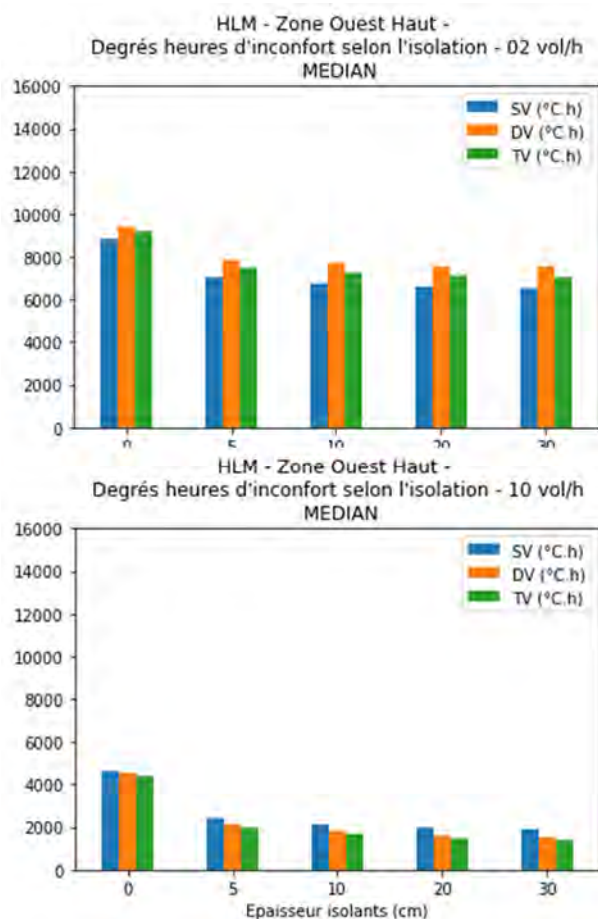
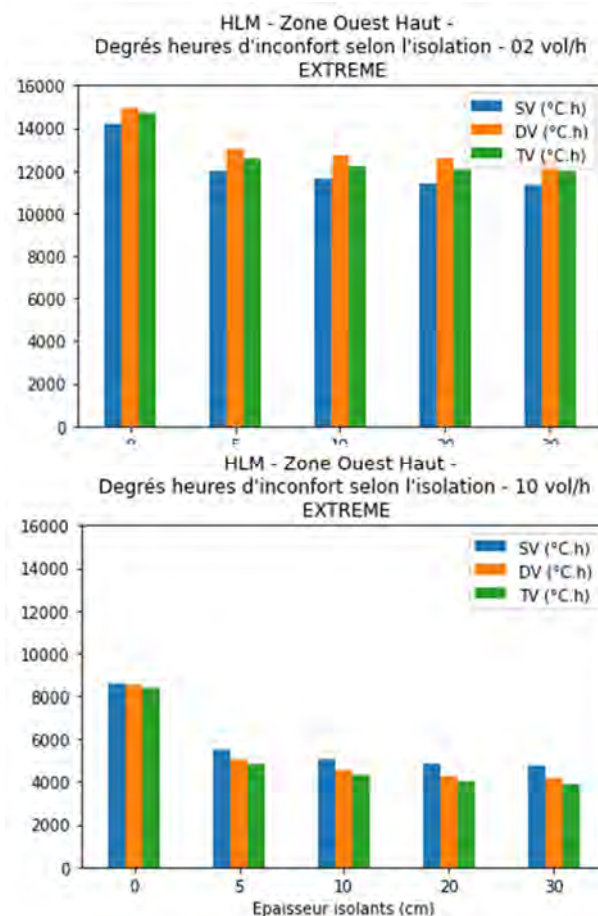


Figure 202



D'après la Figure 202, on a environ le double de DH en vague extrême. Pour ce bâtiment HLM, avec 02 vol/h de ventilation nocturne, on atteint des valeurs extrêmes en termes de degrés heures, on en a plus que le nombre d'heures contenues en une année. Le seuil haut d'inconfort de 1250°C.h définie par la RE2020 est largement dépassé, même avec 10 vol/h de ventilation nocturne. Cela sous-entend que sur l'été, il fera très souvent une température supérieure à 30°C et ce, de plusieurs degrés d'écart (cf. figure 44).

Dans ce climat extrême, il sera certainement nécessaire de climatiser tout ou une partie du bâtiment.

Pour l'usage d'une climatisation dans une seule pièce d'un bâtiment, vous pouvez vous reporter à : « Maison Années 50 : Nîmes Urbain, 2100, Extrême – Climatisation en zonage thermique ».

Pour mieux comprendre comment sont répartis les degrés heures, on trace en Figure 203 un histogramme de la température intérieure du HLM, zone Ouest Haut, du 1^{er} Mai au 30 Septembre. Cette Figure confirme qu'un inconfort chaud pratiquement constant est observé sur cette période. Une grosse majorité des heures d'inconforts sont dues à une température intérieure supérieure à 30°C.

Une part non négligeable est même représentative pour $T_{int} > 35^{\circ}\text{C}$.

A présent, comparons en Figure 203 les profils de températures intérieurs et extérieurs pour comprendre si la ventilation nocturne a été efficace ou non.

HLM - Ouest Haut - Histogramme de température intérieure, du 1er Mai au 30 Septembre (2100 Extrême, Nîmes Urbain)

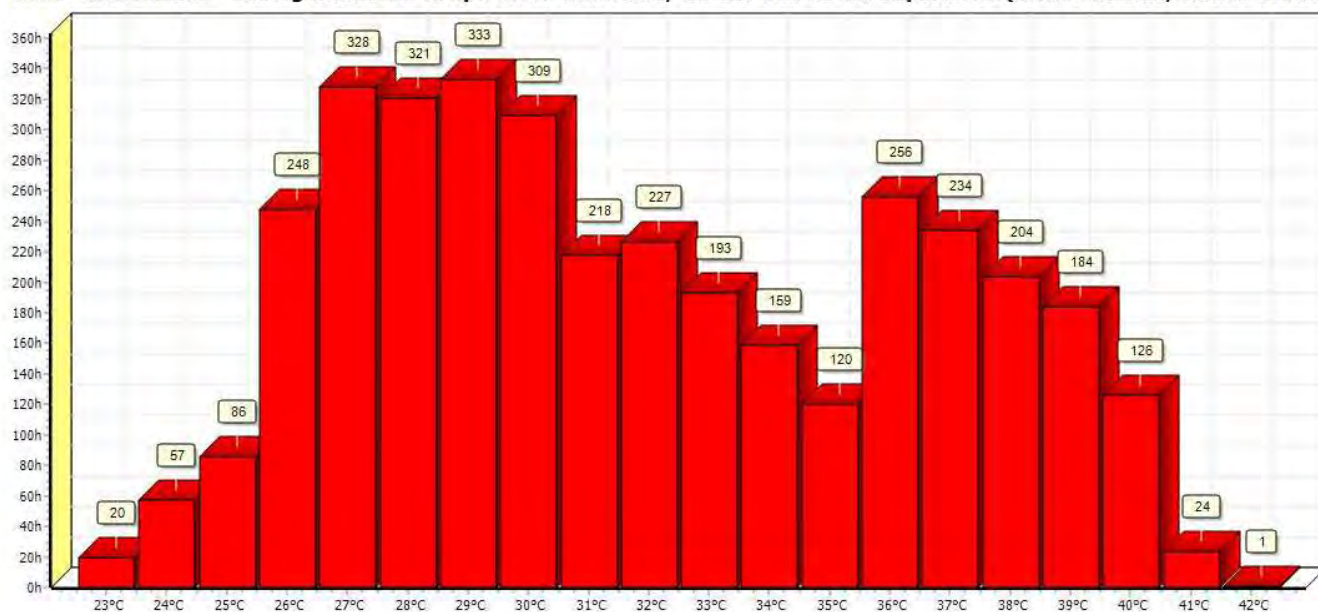


Figure 203

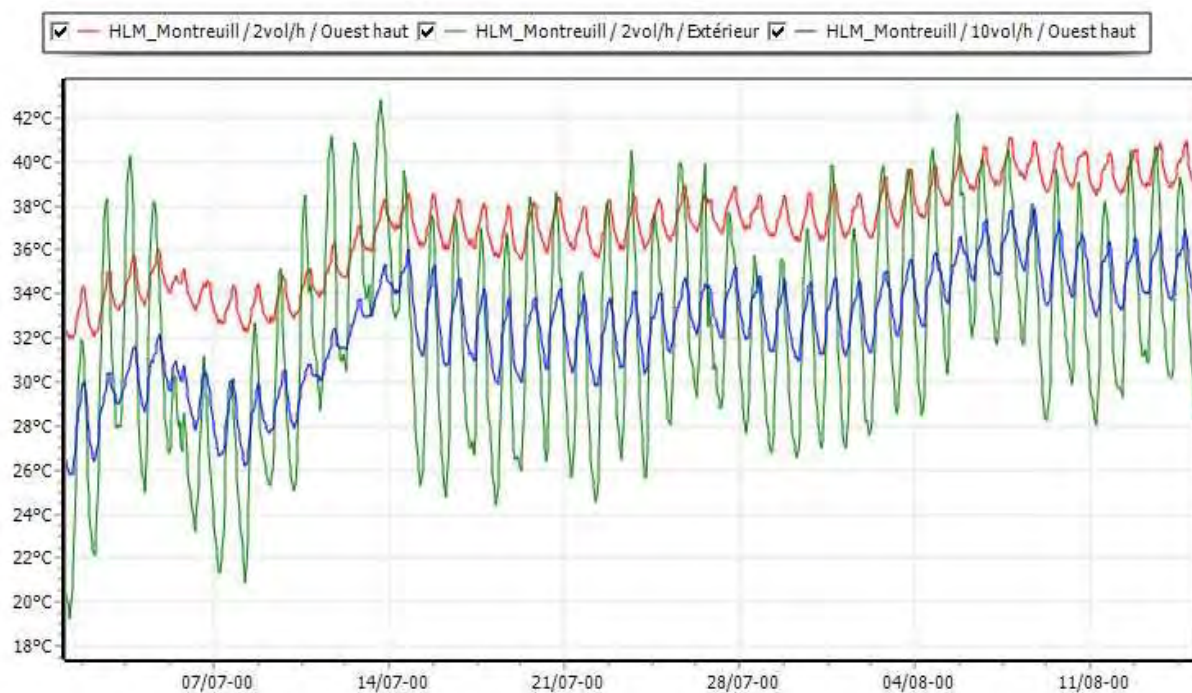


Figure 204

On remarque d'après la Figure 204 que la ventilation nocturne a bien un intérêt, on a en effet une température intérieure bien plus acceptable avec le débit de 10 vol/h par rapport à celui de 02 vol/h, on retrouve en moyenne 04 à 05 degrés de moins. Ce bâtiment en béton étant lourd, l'inertie se fait ressentir : la chaleur importante accumulée jusqu'au 14 Juillet a du mal à s'évacuer par la suite, en 02 vol/h, et ce, malgré une baisse de la température extérieure sur plusieurs semaines depuis le 15 Juillet.

5.4.4. Comparaison du confort estival : Haussmannien et HLM, Paris Urbain Lointain, vague Médiane

A présent, on étudie la différence entre les degrés heures obtenus sur un bâtiment haussmannien et un HLM. On se place de nouveau en horizon 2100 à Paris Urbain, vague médiane, le même fichier météo que dans la partie 3 : « Etude complète : Fichier Météo : Paris Urbain, Futur Lointain, Vague Médiane ».

Dans le HLM, les murs sont en béton (20 cm) et isolés par l'extérieur. Dans l'Haussmannien on est isolé par l'intérieur avec des murs en calcaire (20 cm aussi). Dans les deux cas, on considère une occultation des fenêtres toute la journée, à 80% mais aussi une occupation permanente (24h/24) donc on comptabilise des degrés heures quelle que soit l'heure de la journée. Pour rappel, on a fait varier les épaisseurs du même isolants dans les murs : du polystyrène. En toiture, on a de la laine de verre pour l'Haussmannien et du polyuréthane pour le HLM.

Là où l'on peut noter une différence sur cette comparaison c'est à propos de la zone étudiée. Pour l'haussmannien il s'agit de deux appartements de 6 occupants chacun qui occupent l'étage entier d'un immeuble, d'une surface de 224 m². Et pour le HLM, il s'agit d'une zone exposée cotée ouest et en hauteur également, avec 2 à 3 occupants en moyenne. On dispose d'une surface de 89 m² répartie entre 5 pièces.

Vous retrouverez ci-dessous les résultats, cf Figure 205 :

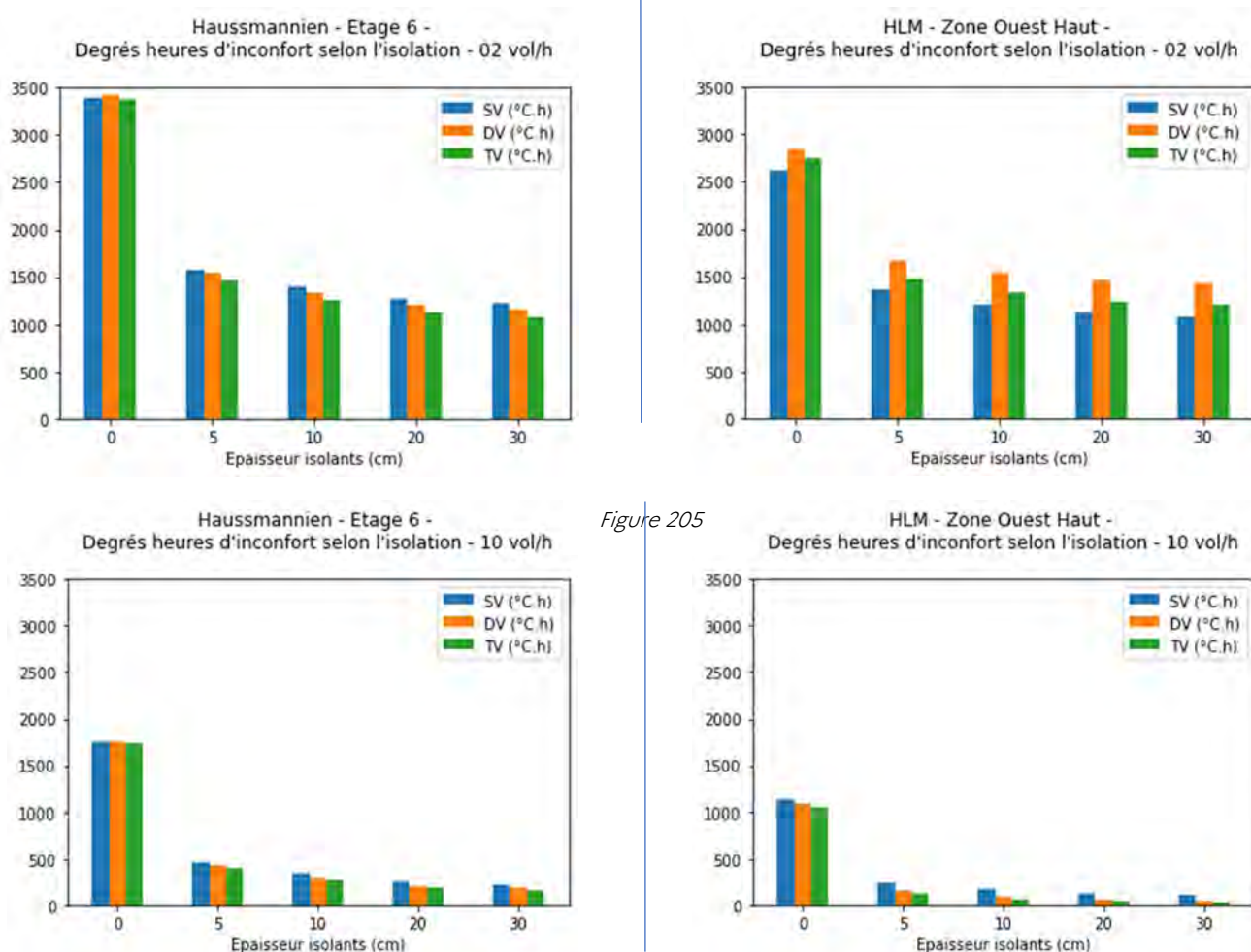


Figure 205

D'après la Figure 205, on a un bien meilleur confort avec le bâtiment HLM qui est isolé par l'extérieur et donc plus inerte. L'isolation de ces deux bâtiments est bénéfique (notamment sur les premiers

centimètres d'épaisseurs) et un haut débit de ventilation nocturne est aussi très favorable à l'amélioration du confort d'été.

5.4.5. Maison Années 50 : Nîmes Urbain, 2100, Extrême – Climatisation en zonage thermique

En considérant le fichier météo Nîmes Urbain, 2100, Extrême, il s'agit d'étudier l'intérêt de la climatisation zonage thermique, c'est-à-dire : on climatise une zone donnée et on quantifie la réduction de température des zones adjacentes et donc le gain en confort. Ceci permet notamment de faire des économies d'énergie par rapport à l'usage d'une climatisation dans plusieurs pièces. De plus, on rappelle que l'usage d'un climatiseur contribue aux phénomènes d'îlots de chaleur urbains puisque les climatiseurs dégagent de la chaleur à l'extérieur. C'est pourquoi, un minimum de climatisation devrait être utilisé si l'on veut limiter les répercussions sur l'environnement et le réchauffement climatique par conséquent.

Faire de la climatisation en zonage thermique nécessite alors de laisser ouvert les portes, pour favoriser les échanges convectifs entre les différentes pièces afin de refroidir ces dernières.

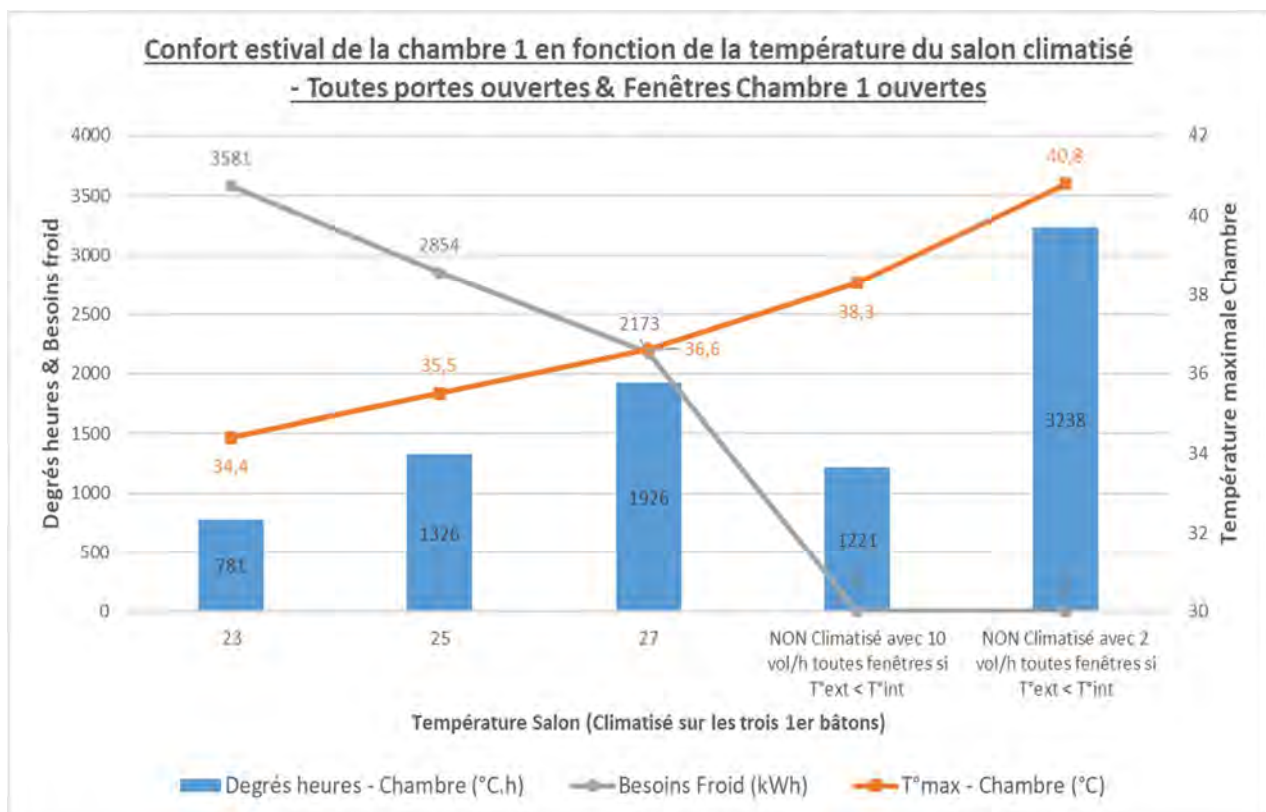
En modèle simplifié de ventilation, dans le module STD COMFIE de Pleiades, l'ouverture d'une porte est modélisée de la façon suivante :

$$P = 44 \cdot A \cdot H^{0.5} \cdot \Delta T^{1.5}$$

Avec :

- P la puissance échangée en convection naturelle (W)
- A : la surface de la porte
- H : la hauteur (m)
- ΔT : écart de température entre les deux zones

A présent, voici les résultats obtenus sur la maison des Années 50 (cf Figure 206) :



La Figure 206 est définie par quatre échelles :

- Les degrés heures et les besoins froid sur l'axe des ordonnées, sur la gauche du diagramme
- La température du salon qui est climatisé (de 23 à 27 °C) sur l'axe des abscisses
- La température maximale atteinte dans la chambre 1, sur la droite du diagramme

Cette figure permet de voir comment évolue l'inconfort de la chambre en fonction de la température du salon. Ces pièces sont séparées entre elles par un couloir. Les besoins de froid permettent quant à eux d'avoir une idée sur la consommation du climatiseur. Il suffit d'intégrer le COP de l'installation si l'on veut en déduire la consommation, par rapport aux besoins (dans le cas où l'on climatiserait constamment, à une température fixe).

Les fenêtres des pièces autres aux chambres devant rester fermées, on estime que le débit de ventilation de 02 vol/h des chambres est assurée en ouvrant les fenêtres de ces dernières durant la nuit (sous condition qu'il fait plus frais dehors). Un scénario d'occultation des fenêtres à 80%, de 7h à 20h, du 1^{er} Juin au 31 Août est aussi assuré.

Comme le montre la Figure 206, à mesure que l'on augmente la température du salon, les DH et la température maximale atteinte dans la chambre augmentent : l'inconfort se fait davantage ressentir.

Figure 206 : Climatisation en zonage thermique : Maison Années 50

Pour les deux
derniers bâtons
du diagramme, on

ne climatiser pas (aucune pièce) mais on ouvre les fenêtres dès qu'il fait plus frais dehors, afin de garantir un débit de ventilation de 02 ou 10 vol/h. Dans ce cas, on fait des économies d'énergie mais la température maximale atteinte dans la chambre est la plus élevée : 38,3°C si 02 vol/h et 40,8°C si 10 vol/h. Avec 10 vol/h de ventilation nocturne sous condition, on retrouve toutefois une équivalence sur le confort en termes de degrés heures, par rapport au cas où le salon est climatisé à 25°C. Ainsi, on a peut-être des surchauffes plus importantes à la chambre sans climatisation au salon, cependant, le nombre d'heures d'inconfort doit être plus faible (raison pour laquelle on a 1221 DH < 1326 DH).

Pour conclure, vis-à-vis de ce climat extrême de fin de siècle du sud de la France, il est difficile d'envisager que l'on se passe de climatisation pour ce genre de maison : ancienne et isolée avec 10 cm d'isolant en toiture et dans les murs. Bien entendu, on recommandera de combiner à cela des protections solaires ou autres solutions pour améliorer le confort d'été, cela contribuera à réduire les besoins de climatisation. L'objectif étant de climatiser le moins possible et non constamment, en fonction des besoins. On privilégiera dès que possible une ouverture de toutes les fenêtres (sans climatisation) pour les nuits où la température extérieure descend assez bas.

Cette Figure 206 a permis de montrer qu'une climatisation en zonage thermique (avec portes ouvertes) apporte bien un intérêt sur une amélioration du confort des pièces adjacentes à la zone climatisée.

5.5. Simulation des bâtiments tertiaires

5.5.1. Point méthodologique

Les simulations réalisées sur les bâtiments tertiaires ont été réalisées selon une approche différente que celle présentée précédemment sur les bâtiments résidentiels.

Les différences notables suivantes sont à relever :

- pas d'utilisation du script Python, les simulations sont exécutées manuellement en utilisant l'interface Pleiades (Modeleur ou Editeur) pour lancer le moteur de simulation Comfie.
- utilisation du calcul de l'indicateur DH intégré à Comfie, qui diffère de celui utilisé pour les bâtiments résidentiels. La limite de confort adaptatif est basée sur une température de confort de 26°C, qui augmente à 28°C en période de confort adaptatif, selon la courbe ci-dessous.

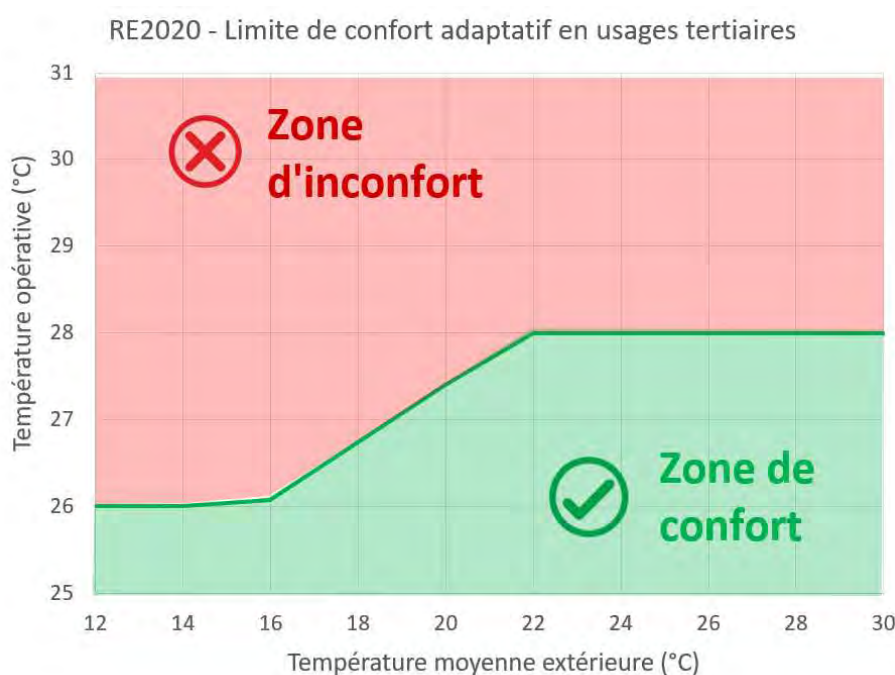


Figure 207 - Limite de confort adaptatif utilisée en bâtiments tertiaires

5.5.2. Bâtiment de bureaux

5.5.2.1. Comparatif des 16 fichiers météorologiques sur le bâtiment de base non rafraîchi

Le projet de base a dans un premier été simulé sur l'ensemble des fichiers météorologiques, afin de vérifier le comportement du bâtiment dans ces différentes conditions climatiques.

Des ajustements sur les hypothèses de simulation ont été nécessaires pour adapter les périodes d'utilisation des occultations et de l'ouverture des fenêtres aux diverses conditions climatiques.

Dans sa version de base, le bâtiment a été simulé sans son système de rafraîchissement pour quantifier l'inconfort hors apport de froid actif.

Résultats :

Pour chaque variante, les résultats suivants sont extraits de la simulation :

- nombre de DH de la zone thermique la plus pénalisée, la zone 10 « Bureau 3 personnes sud ».
- Température max de la même zone thermique
- besoins de chauffage totaux sur le bâtiment

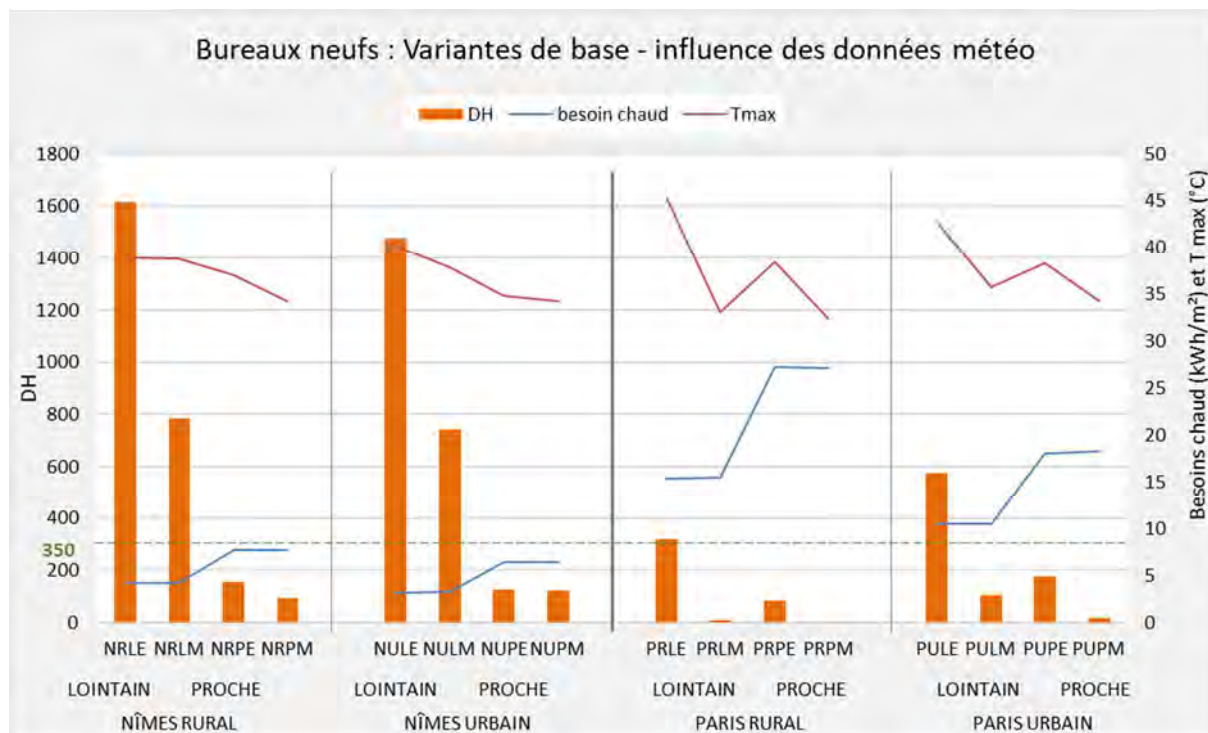


Figure 208 - Bureaux - résultats variantes de base

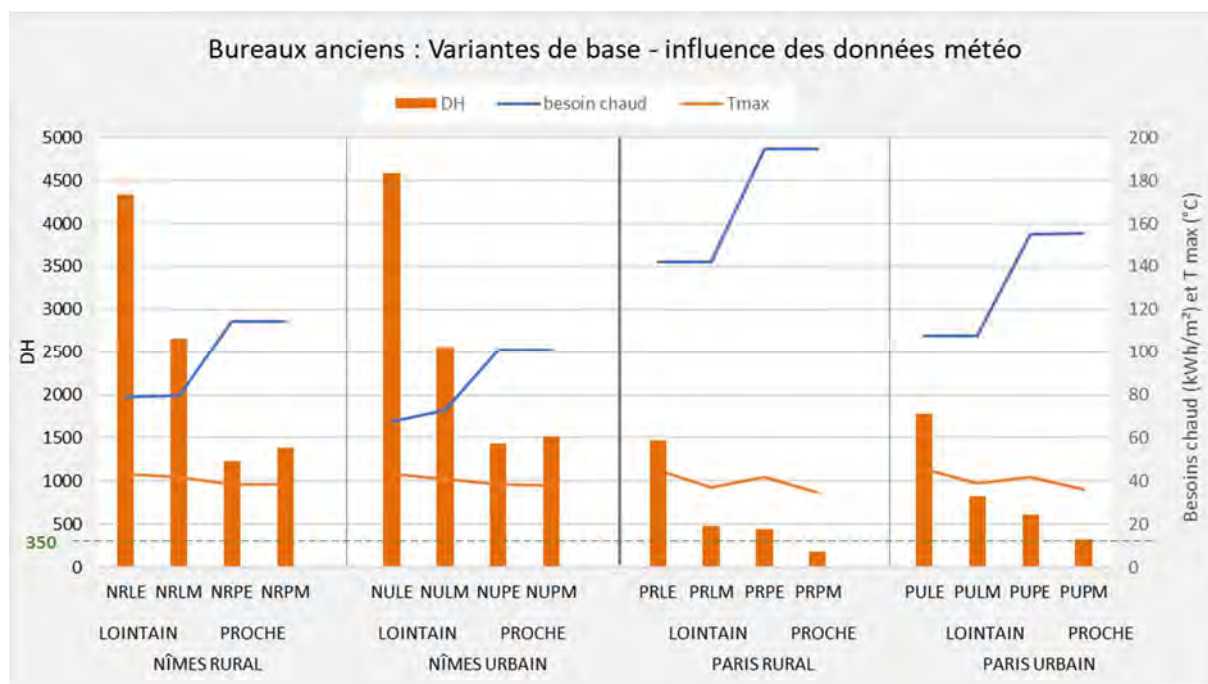


Figure 209 - Bureaux anciens - résultats variantes de base

De ces simulations de base, on peut tirer les enseignements suivants sur le comportement des bâtiments de bureaux soumis aux différentes conditions météorologiques. Ces résultats viennent valider l'analyse statistique des fichiers météorologiques présentées au § 5.2.4.

Les besoins de chauffage ont été observés pour valider la cohérence des simulations en période hivernale. Les résultats obtenus ici sont cohérents :

- avec la localisation : besoins plus importants à Paris qu'à Nîmes, besoins plus importants en rural qu'en urbain, différence plus marquée pour Paris,
- avec la période : besoins moins importants en futur lointain qu'en futur proche à cause de températures globalement plus élevées
- avec le type de vague de chaleur : pas d'influence sur les conditions hivernales donc besoins de chaleur identiques

Les températures maximales obtenues dans la zone thermique observée sont assez bien corrélées avec la température maximale du fichier météorologique correspondant.

La durée d'inconfort (ici nombre de DH) est, elle, plus logiquement corrélée à la durée et à la sévérité des périodes de chaleur du fichier météorologique :

Sur la durée d'inconfort :

- Des périodes de chaleur longues plus présentes dans les fichiers de Nîmes, notamment en futur lointain, occasionnent logiquement des durées d'inconfort plus longues qu'avec les fichiers de Paris.
- Les fichiers établis pour le futur lointain occasionnent logiquement des durées d'inconfort plus longues que les fichiers établis pour le futur proche.
- Les fichiers avec vagues de chaleur extrêmes occasionnent logiquement des durées d'inconfort plus longues qu'avec les fichiers avec vagues médianes (sauf pour Nîmes futur proche, comme vu dans l'analyse des données météorologiques).
- sur la localisation rurale ou urbaine, l'effet dépend du site : le site urbain est plus favorable au confort à Nîmes, alors qu'il est plus pénalisant à Paris.

La valeur limite de 350 DH, issue des exigences de la RE 2020 a été reportée pour information. Elle correspond à une période de deux semaines continue de dépassement d'1°C de la température limite (ou 1 semaine de dépassement de 2°C). Cette limite est largement dépassée pour les fichiers lointains sur Nîmes et pour le fichier urbain lointain extrême pour Paris.

Comparaison entre les deux bâtiments : le bâtiment ancien, non isolé, plus vitré et moins bien protégé présente logiquement des niveaux d'inconfort beaucoup plus élevés.

A partir de ces résultats de base, plusieurs variantes sont simulées pour déterminer l'apport de dispositifs d'adaptation sur le comportement thermique. Les caractéristiques du projet de base sont indiquées dans chaque tableau d'hypothèses. L'analyse a conduit soit à améliorer soit à dégrader les caractéristiques du projet de base pour étudier la sensibilité du paramètre.

5.5.2.2. Impact du type de vitrage

Hypothèses :

Variante	Caractéristiques
Simple vitrage	$U_w = 5,23 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, $S_w=0,67$
Double vitrage (Base)	$U_w = 1,33 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, $S_w=0,49$
Triple vitrage	$U_w = 0,95 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, $S_w=0,43$, toutes menuiseries remplacées

Résultats :

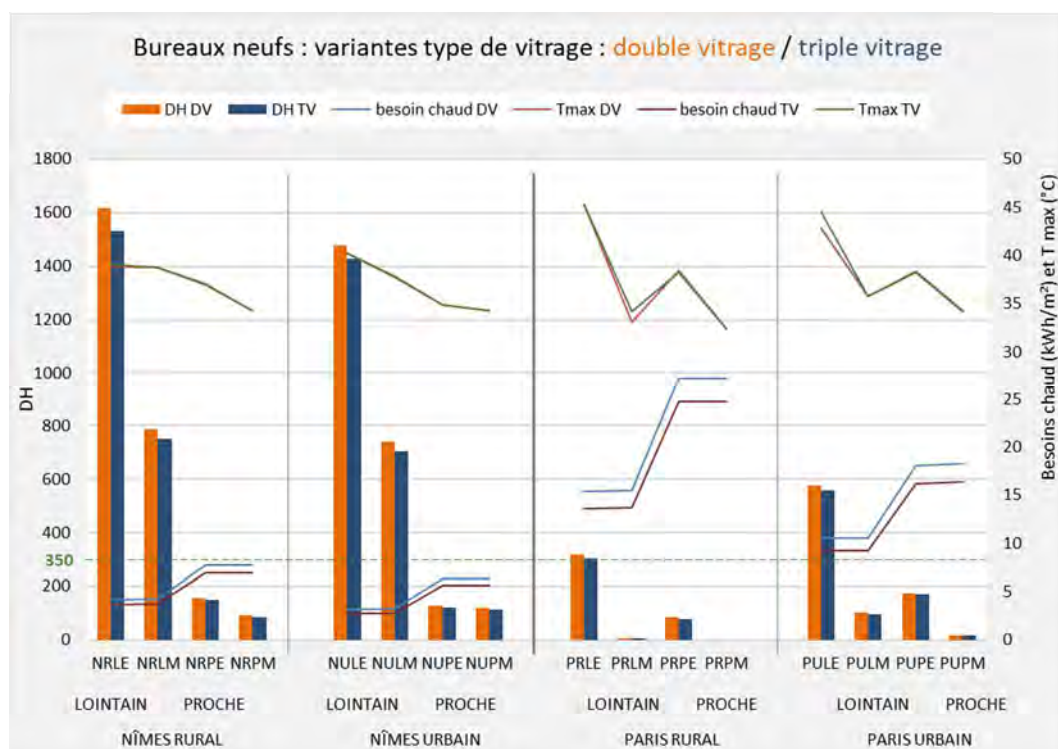


Figure 210 - Bureaux neufs - impact du type de vitrage

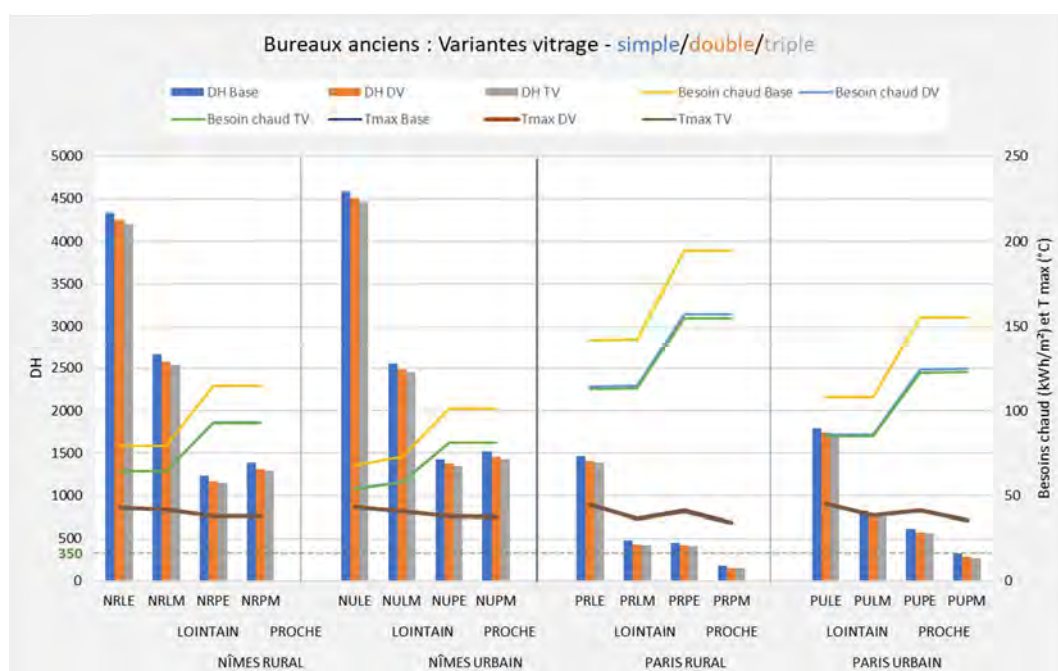


Figure 211 - Bureaux anciens - impact du type de vitrage

Pour les bureaux neufs, le choix d'un triple vitrage limite les déperditions (coefficient U_w inférieur) sans trop dégrader les apports solaires gratuits l'hiver (facteur solaire S_w légèrement inférieur).

- En hiver, le besoin de chauffage est diminué, la diminution est plus sensible sur les fichiers de Paris, présentant des hivers plus rigoureux.
- En été, le confort est légèrement amélioré (le nombre de DH diminue de 2 à 10 %, pas de modification de la température maximale), l'amélioration est plus sensible sur les fichiers présentant des étés chauds.

Pour les bureaux anciens, le remplacement des simples vitrages par du double a surtout un effet notable en hiver : au vu des déperditions thermiques importantes dans l'état initial, il permet une diminution des besoins de chauffage de l'ordre de 20% et une légère diminution des DH de 2% pour les fichiers les

plus extrêmes à 14% pour le fichier le plus clément (PRPM). L'apport du triple vitrage comparé au double est relativement limité mais permet une diminution supplémentaire des besoins chaud ainsi que des DH.

5.5.2.3. Impact de la protection solaire

Hypothèses :

Variante	Caractéristiques
Protec 0	Stores intérieurs seuls (sur double vitrage : $Sw_{ap} = 0,35$, fermeture 70 %)
Protec 1	Stores intérieurs + casquette sud + vitrage à contrôle solaire est et ouest (vitrage à contrôle solaire $U_w = 1,33 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, $Sw = 0,18$)
Protec 2	Stores extérieurs (sur DV : $Sw_{ap} = 0,02$, fermeture 70 %)
Protec 3 (Base)	Stores extérieurs + casquette sud

Résultats :

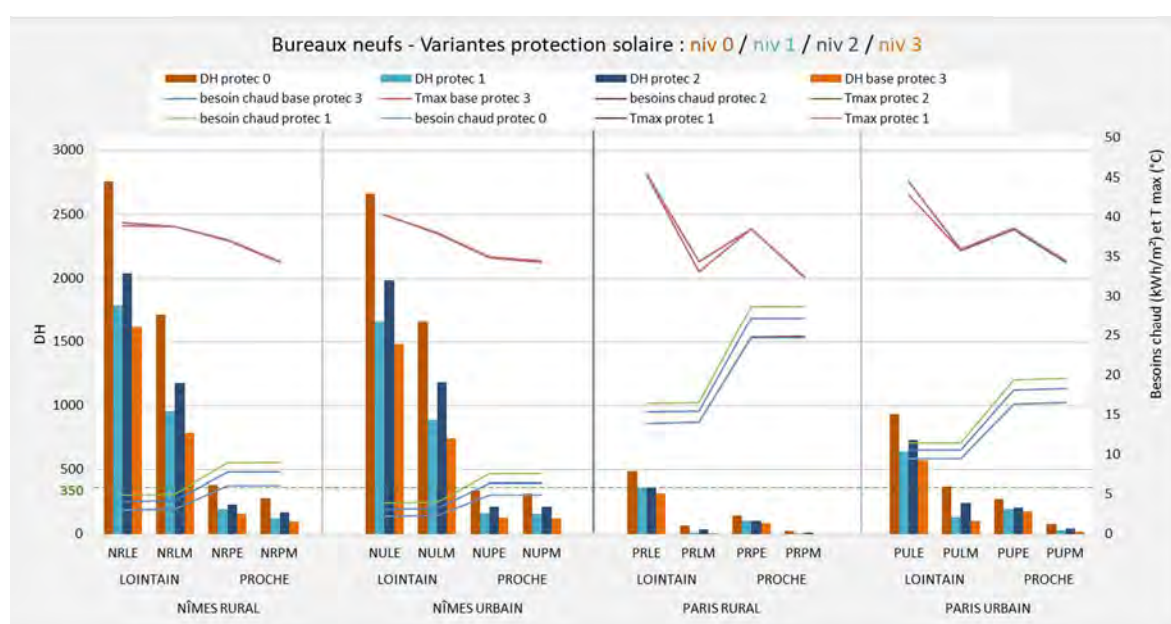


Figure 212 - Bureaux neufs - impact de la protection solaire

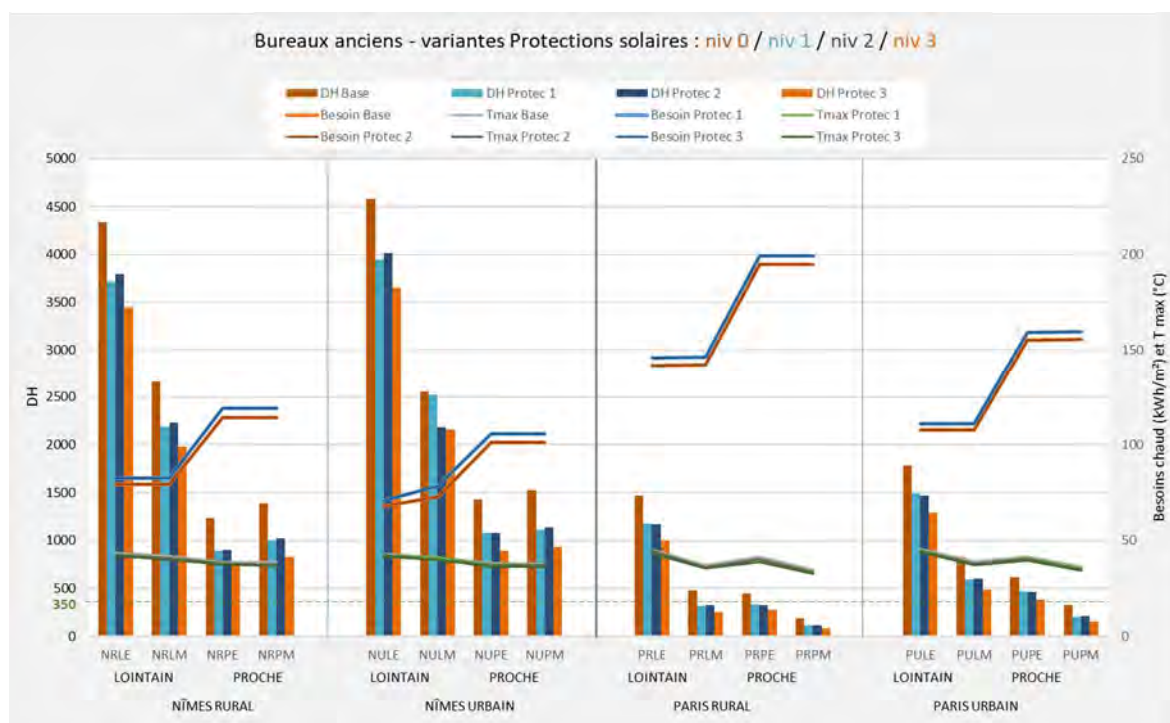


Figure 213 – Bureaux anciens – impact de la protection solaire

Les résultats montrent que la protection solaire a un impact majeur sur le confort d'été (diminution du nombre de DH, pas d'impact notable sur les températures maximales). Les niveaux de protection testés se classent du moins performant au plus performant de la façon suivante :

- une protection par stores intérieurs seuls dégrade fortement le confort, notamment sur les climats les plus chauds.
- des stores extérieurs seuls sur toutes les façades, considérés comme fermés 70% du temps offrent une bonne protection. Cependant, ces protections mobiles nécessitent soit une bonne gestion manuelle par les occupants, soit une automatisation.
- associer des stores intérieurs, des vitrages à contrôle solaire et une protection fixe par casquette au sud donne ici de bons résultats. L'orientation du bâtiment est dans ce cas favorable : la façade principale plein sud est très bien protégée par les casquettes et il y a très peu d'ouverture sur les façades est et ouest. Avec une orientation principale à l'est ou à l'ouest, les stores intérieurs associés à des vitrages à contrôle solaire sont une solution moins performante qu'une protection extérieure.
- la meilleure solution consiste à associer une protection extérieure fixe (casquette sud dans ce cas) et des protections mobiles extérieures.

La protection solaire a également un impact sur les besoins de chauffage, notamment les variantes avec des dispositifs fixes (casquette ou vitrage à contrôle solaire).

5.5.2.4. Impact de la couleur du revêtement extérieur et d'une végétalisation

Hypothèses :

Variante	Caractéristiques
Base	Absorptivité des murs 0,35 et toitures à 0,65
Faible absorptivité	Absorptivité des murs et toitures à 0,3
Végétalisation	Absorptivité des murs et toitures à 0,2 et ajout de 10 cm de terre au-dessus des toitures terrasses

Résultats :

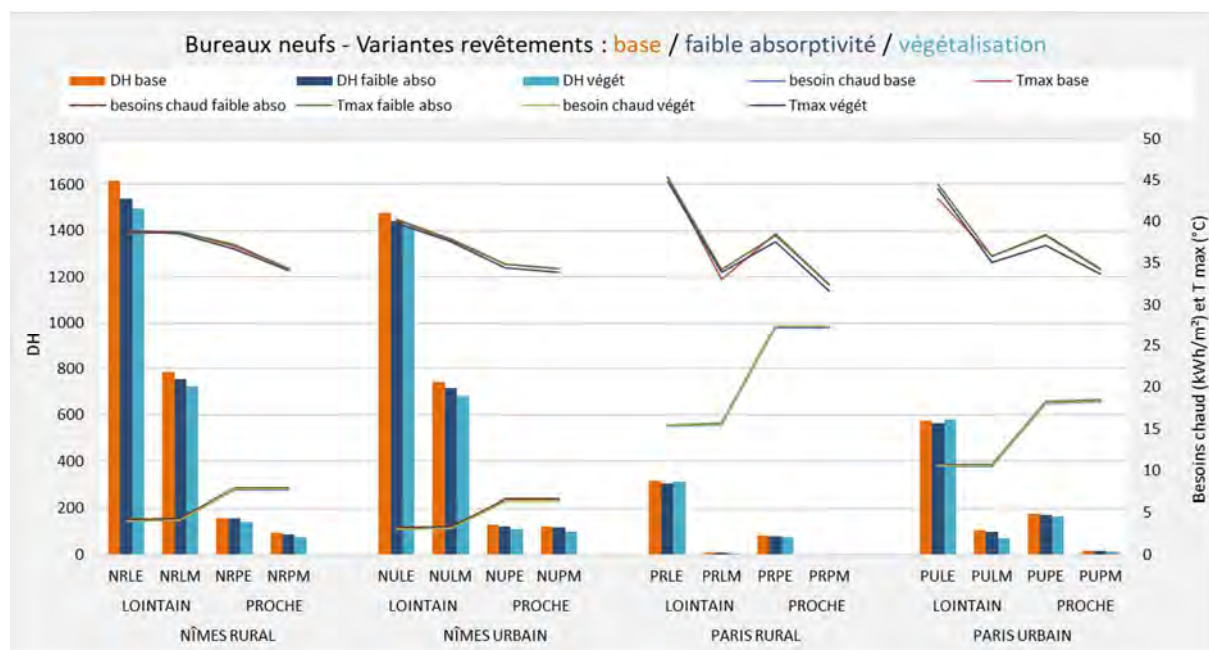


Figure 214 - Bureaux - impact de la couleur du revêtement extérieur et d'une végétalisation

La mise en œuvre d'un revêtement de couleur claire sur les toitures terrasses et murs extérieurs ou leur végétalisation apporte un gain relativement faible sur le confort d'été (pour les conditions météorologiques présentant des inconforts significatifs, le nombre de DH diminue respectivement de 2 à 4% pour la couleur claire et de 4 à 7 % pour la végétalisation).

Il est à noter que la végétalisation est ici modélisée uniquement par une diminution des apports solaires sur les parois extérieures et par l'ajout d'une couche de terre au-dessus de la toiture terrasse. Les effets d'évapotranspiration des végétaux ne sont pas simulés.

5.5.2.5. Inertie : impact du type de plancher bas

Hypothèses :

Variante	Caractéristiques
Terre-plein (Base)	Plancher bas sur terre-plein ($U_p = 0,2 \text{ W/m}^2.\text{K}$)
Vide sanitaire	Plancher bas sur VS ($U_p = 0,15 \text{ W/m}^2.\text{K}$)

Résultats :

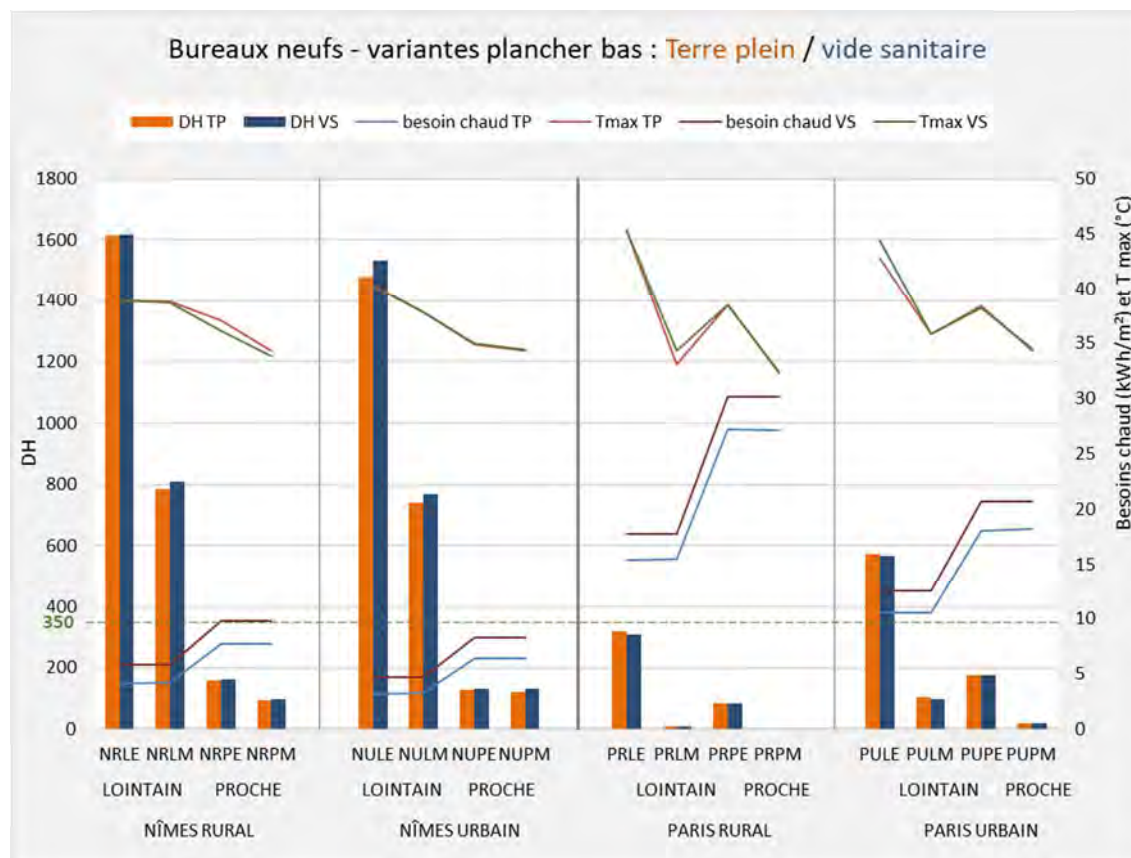


Figure 215 - Bureaux neufs - impact du type de plancher bas

Un contact du plancher bas avec le sol est plus favorable au confort d'été, même si celui-ci est isolé sur toute sa surface. La variante sur vide-sanitaire voit les durées d'inconfort s'allonger. La dégradation est cependant faible (+2 à 4 % sur les fichiers de Nîmes) ou presque insensible (sur les fichiers de Paris). Les températures maximales n'évoluent presque pas.

Les besoins de chauffage sont supérieurs pour la variante sur vide-sanitaire, le contact plus froid du vide sanitaire n'est pas compensé par le renforcement du niveau d'isolation entre les deux planchers.

5.5.2.6. Variantes isolation et inertie de l'enveloppe

Hypothèses :

Variante	Caractéristiques murs	Caractéristiques toitures	U murs ($\text{W/m}^2.\text{K}$)	U plancher TP ($\text{W/m}^2.\text{K}$)	U toiture ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
ITI Iso min	Parpaing ITI laine de verre	Toiture terrasse béton isolée par le dessus polystyrène	0,3	0,4	0,2
ITI Iso max	Parpaing ITI laine de verre		0,2	0,2	0,1
ITE Iso min	Parpaing ITE polystyrène		0,3	0,4	0,2
ITE Iso max	Parpaing ITE polystyrène		0,2	0,2	0,1
MOB Iso min	MOB laine de bois entre montants (40 kg/m^3)		0,3	0,4	0,2

MOB Iso max (Base)	MOB laine de bois entre montants (40 kg/m ³) et complément extérieur laine de bois dense (50 kg/m ³)	Toiture légère caisson bois isolé laine de verre	0,2	0,2	0,1
--------------------	--	--	-----	-----	-----

Seule l'enveloppe extérieure est modifiée dans ces variantes : la composition et le niveau d'isolation des murs extérieurs et de la toiture et le niveau d'isolation des planchers bas.

La nature du plancher bas n'est pas modifiée : dalle béton sur terre-plein isolée en sous-face.

L'inertie disponible à l'intérieur du bâtiment n'est pas modifiée : le plancher intermédiaire et les cloisons intérieures sont identiques pour toutes les variantes.

Résultats :

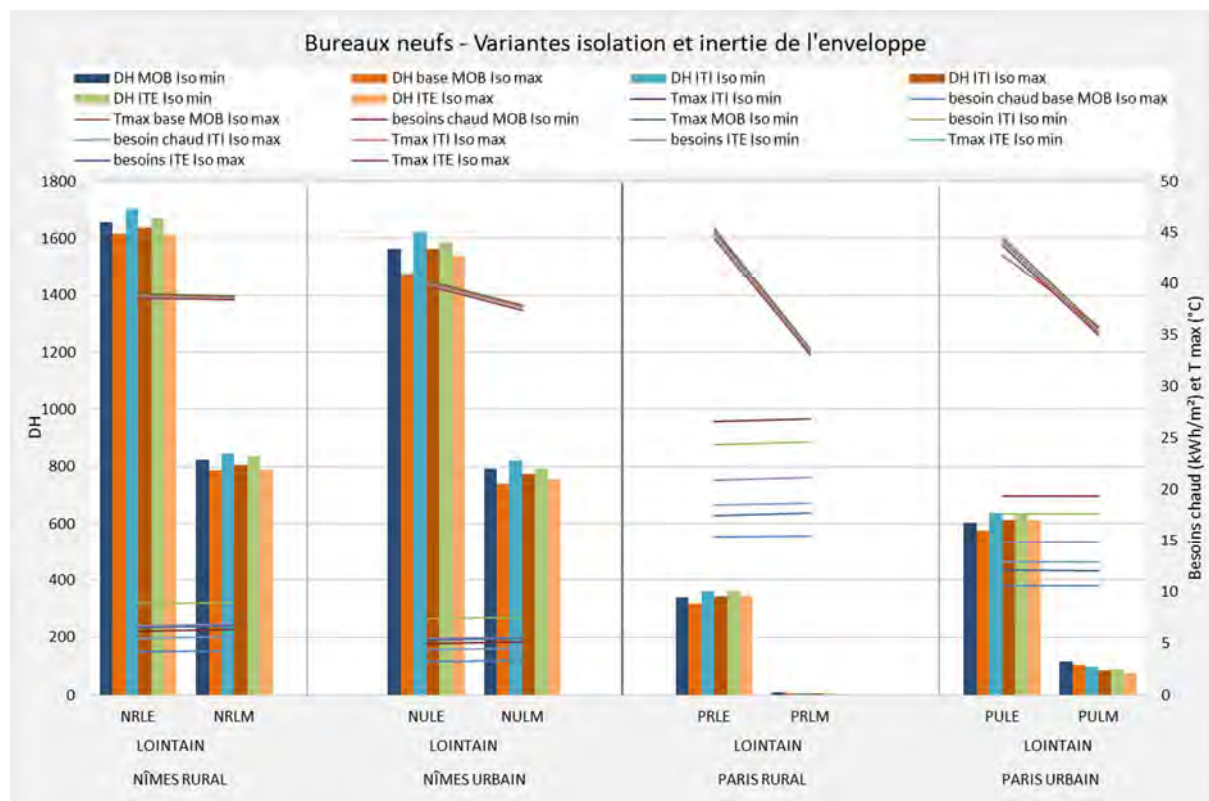


Figure 216 - Bureaux neufs - impact du niveau d'isolation et d'inertie de l'enveloppe

Les besoins de chauffage sont logiquement inférieurs pour les variantes Iso max par rapport aux variantes Iso min. Les températures maximales n'évoluent presque pas.

L'analyse des niveaux d'inconfort en termes de nombre de DH amène les conclusions suivantes :

- pour les variantes ITI / ITE, les variantes disposant du meilleur niveau d'isolation (Iso max) sont toujours plus confortables que les variantes équivalentes moins bien isolées. Renforcer l'isolation est donc dans ce cas profitable du point de vue du confort d'été.
- pour les variantes MOB, la comparaison Iso / Iso max est plus contrastée et dépend des fichiers météorologiques.

La disponibilité de l'inertie côté ambiance (variantes ITE) et l'utilisation d'un isolant de résistance thermique suffisante sont généralement plus favorables au confort.

En n'intervenant ici que sur les façades, les différences de comportement entre isolation et inertie des façades restent modérées. Dans le cadre de l'adaptation d'un bâtiment existant, seule la modification des façades est envisageable (hors structure). Dans le cas d'une conception neuve, une réflexion plus complète sur l'ensemble structure + façade devra être menée pour ajuster l'inertie nécessaire.

5.5.2.7. Impact du type d'ouverture des menuiseries

Hypothèses :

Variante	Caractéristiques
Ouverture manuelle (Base)	Ventilation nocturne par ouverture des ouvrants de 30% du 15 mai au 30 septembre de 19h à 8h. Débits de renouvellement évalués par le calcul aéraulique.
Ouverture automatique	Ventilation nocturne par ouverture automatique suivant delta T des ouvrants de 30%. Débits de renouvellement évalués par le calcul aéraulique, voir détail ci-dessous.

Note : Le taux d'ouverture maximal de 30% est dû à la géométrie de la fenêtre (dont une bonne partie est fixe). On considère donc que la partie mobile est ouverte à 100%.

Niveaux de renouvellement d'air obtenus par la simulation aéraulique

Le taux de renouvellement d'air obtenu par ouverture des fenêtres est ici évalué par le calcul aéraulique disponible dans Pleiades. Ce calcul prend en compte les données de vent issues du fichier météorologique, les surfaces ouvrantes, leur position (pression de vent sur la façade et tirage thermique) et leur gestion, la perméabilité à l'air de la façade et la description pièce par pièce de l'installation de ventilation.

Pour chaque fenêtre un débit d'air est calculé au pas de temps horaire. Cette modélisation aéraulique est couplée à la modélisation thermique.

Hors simulation aéraulique, il est fréquent d'utiliser en simulation thermique dynamique une hypothèse pour le renouvellement d'air par ouverture de fenêtres : dans les simulations réalisées sur les logements deux hypothèses à 2 et 10 vol/h ont par exemple été testées, sur le bâtiment d'enseignement neuf, les taux de 2, 5 et 10 vol/h ont été testés.

Il nous a semblé utile de présenter ici les niveaux de ventilation obtenus, pour comparaison avec les hypothèses retenues dans les autres modélisations.

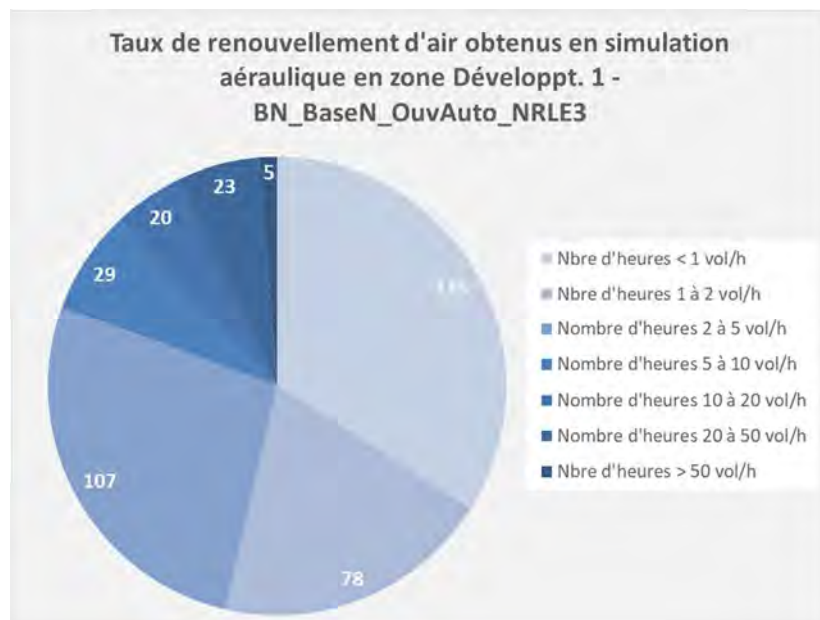


Figure 217 - Bâtiment de bureaux - taux de renouvellement d'air obtenus en simulation aéraulique

Dans la simulation présentée ici, les taux de renouvellement obtenus par ouverture des fenêtres sont la plupart du temps inférieurs à 5 vol/h. Les taux peuvent atteindre des valeurs plus importantes, quand les conditions de vent le permettent, mais ces cas restent exceptionnels.

Résultats :

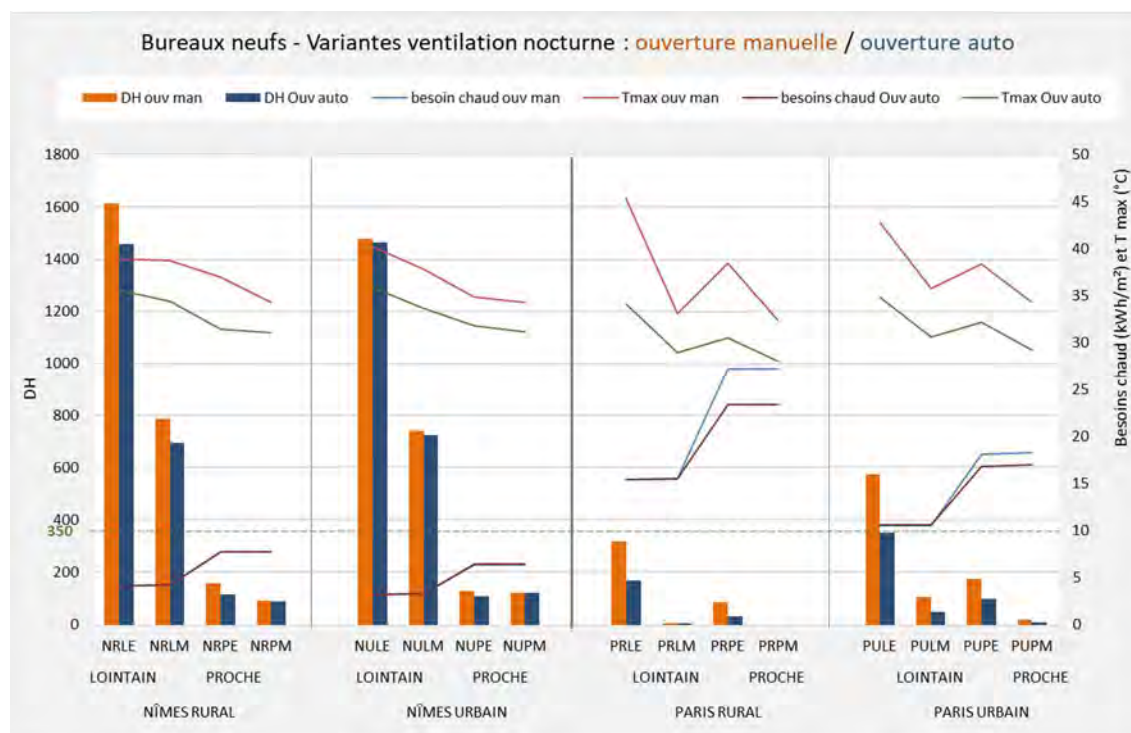


Figure 218 - Bureaux neufs - impact du type d'ouverture des menuiseries

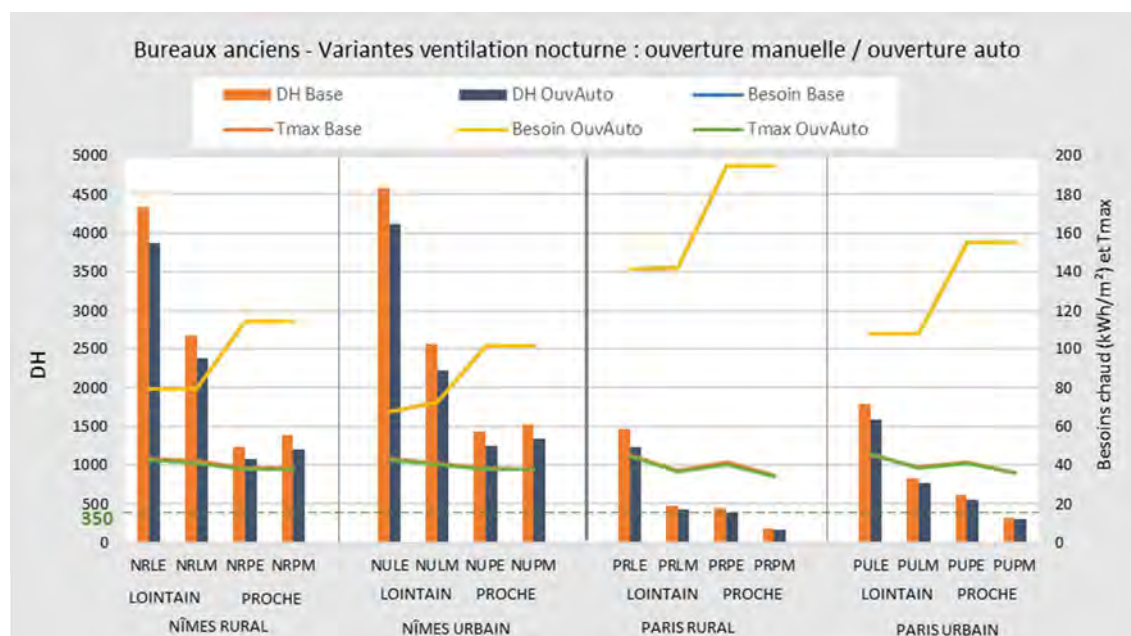


Figure 219 - Bureaux anciens : impact du type d'ouverture des menuiseries

L'ouverture automatique des menuiseries basée sur une mesure de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur permet de maximiser la ventilation naturelle des locaux dès que les conditions sont favorables, même en journée (free-cooling). Ce pilotage en fonction des conditions est particulièrement important dans le cas de bâtiments de bureau, inoccupés les week-ends et la nuit : on voit que le comportement stéréotypé de la variante de base qui ne considère qu'une ouverture en soirée en été est nettement moins performant.

Pour les bureaux neufs, l'inconfort diminue notablement sur presque tous les fichiers météorologiques. Pour les fichiers météorologiques présentant en base des inconforts significatifs, la diminution du nombre de DH va de 11 à 16 % sur Nîmes. Elle est même plus importante sur Paris (48 % sur PRLE). Les températures maximales atteintes sont diminuées de 2 à 5 °C sur Nîmes et de 4 à 10°C sur Paris.

Pour les bureaux anciens, l'effet d'une gestion automatique est moindre, du fait de la mauvaise enveloppe du bâtiment. En effet la diminution des DH va de 10 à 13% à Nîmes, et de 5 à 16% à Paris. Les températures maximales diminuent également plus légèrement.

Les besoins de chauffage ne sont la plupart du temps pas affectés, sauf sur les fichiers Paris futur proche, qui sont les moins chauds. La simulation a cherché ici à maximiser l'effet de rafraîchissement de la surventilation nocturne, ce qui a peut conduire à une trop forte ventilation des locaux en mi-saison : on passe alors sous la consigne de chauffage, d'où les besoins de chauffage complémentaires qui sont évitables par un meilleur réglage de l'automatisme.

5.5.2.8. Synthèse des variantes bâti

Le graphe ci-dessous récapitule la sensibilité de chacun des paramètres testés sur le confort, sur la base du fichier météorologique le plus impactant : NRLE. Il permet de comparer la sensibilité de chacun des paramètres testés. L'analyse conduit à distinguer deux familles de paramètres testés :

- paramètres à forte sensibilité : protection solaire et ventilation
- paramètres à plus faible sensibilité : apports solaires par les parois opaques, niveau d'isolation et inertie de la façade

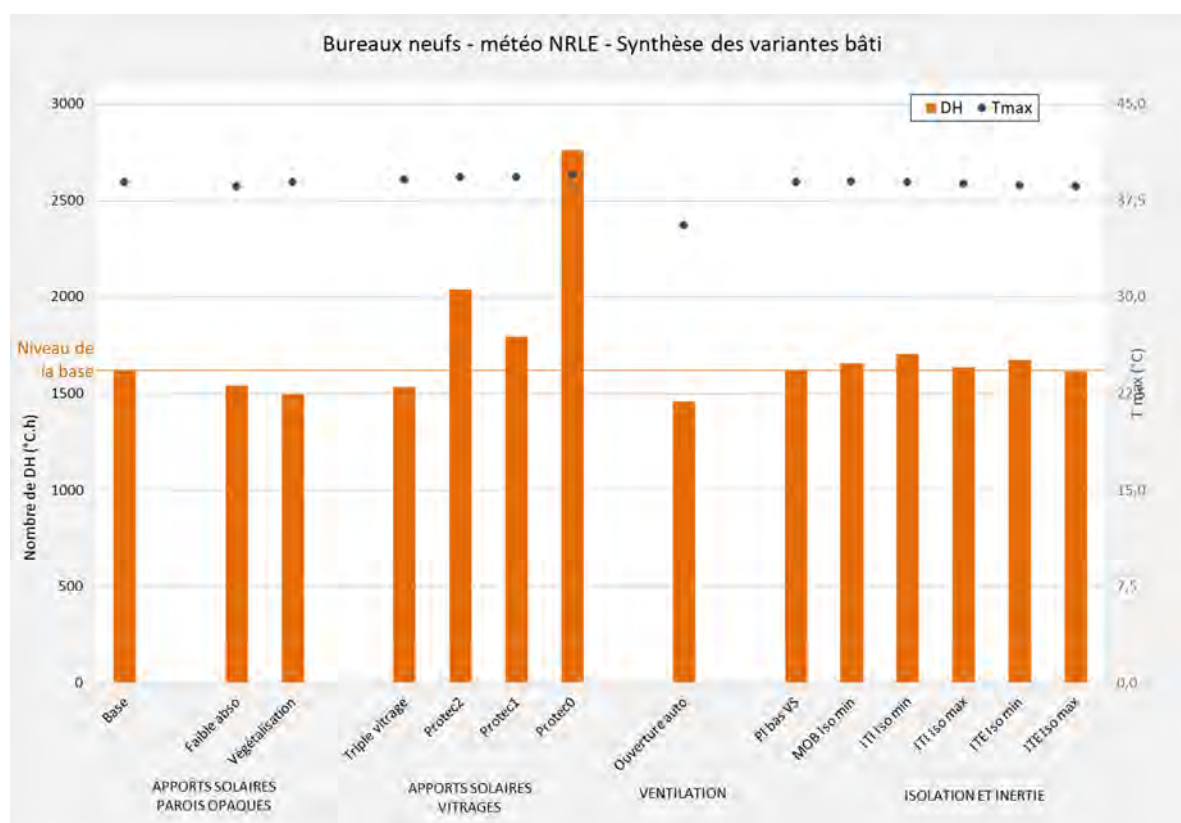


Figure 220 - Bureaux neufs : synthèse des variantes bâti, sensibilité comparée des paramètres testés sur le confort, fichier NRLE

5.5.2.9. Variante optimale bâti bureau neufs

Hypothèses :

Cette variante cumule les mesures d'adaptation présentant les résultats les plus favorables sur le confort d'été, issues des études de sensibilité des paragraphes précédents.

Variante	Menuiseries	Revêtements	Ouverture des menuiseries
Base	Double vitrage	Absorptivités initiales	Ouverture manuelle
Optimale bâti	Triple vitrage	Végétalisation des murs et de la toiture terrasse	Ouverture automatique des menuiseries

Résultats :

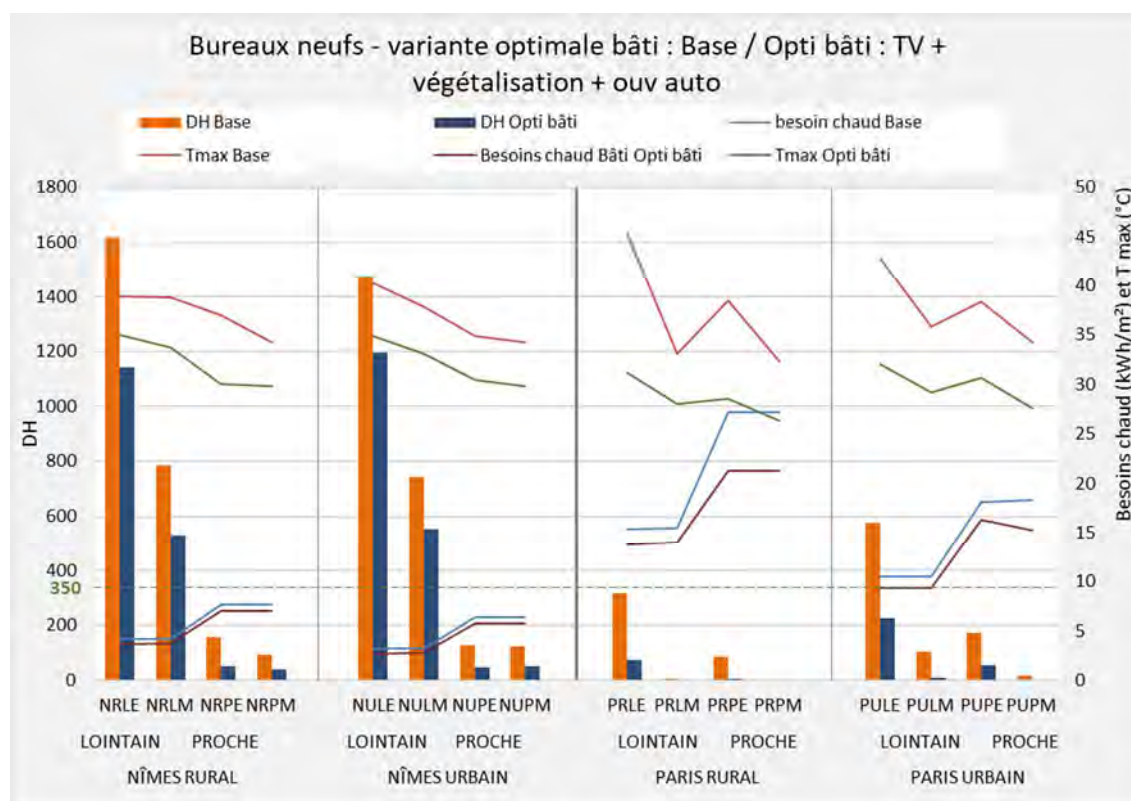


Figure 221 - Bureaux - variante optimale bâti

L'objectif de cette série de simulations est de voir le meilleur niveau atteignable en agissant uniquement sur le bâti. Elle sert également de base aux simulations faisant intervenir des systèmes de rafraîchissement actifs dans le paragraphe suivant.

A partir des variantes cumulées ici on peut lister les caractéristiques suivantes mises en œuvre dans cette variante :

- un bâtiment bien orienté, très peu vitrée est ou ouest et au taux de vitrage modéré.
- une enveloppe très isolée et modérément inerte : isolation MOB Iso max et triple vitrage, plancher bas sur terre-plein.
- une protection maximale des apports solaires : stores extérieurs et casquettes au sud, végétalisation des murs et de la toiture terrasse
- une ventilation naturelle maximisée et pilotée par un automatisme.

Dans cette configuration, pour les conditions météorologiques présentant en base des inconforts significatifs :

- un niveau de confort satisfaisant est atteint pour les fichiers Paris en futur lointain et vague de chaleur extrême

- malgré une baisse significative, l'inconfort reste important pour les fichiers de Nîmes en futur lointain.
Il faudra ici un dispositif de rafraîchissement complémentaire.

5.5.2.10. Variante optimale bâti bureaux anciens

Hypothèses :

Cette variante cumule les mesures d'adaptation présentant les résultats les plus favorables sur le confort d'été, issues des études de sensibilité des paragraphes précédents.

Variante	Menuiseries	Isolation	Ouverture des menuiseries
Base	Simple vitrage	Pas d'isolation	Ouverture manuelle
Optimale bâti	Triple vitrage	ITE Iso max	Ouverture automatique des menuiseries

Résultats :

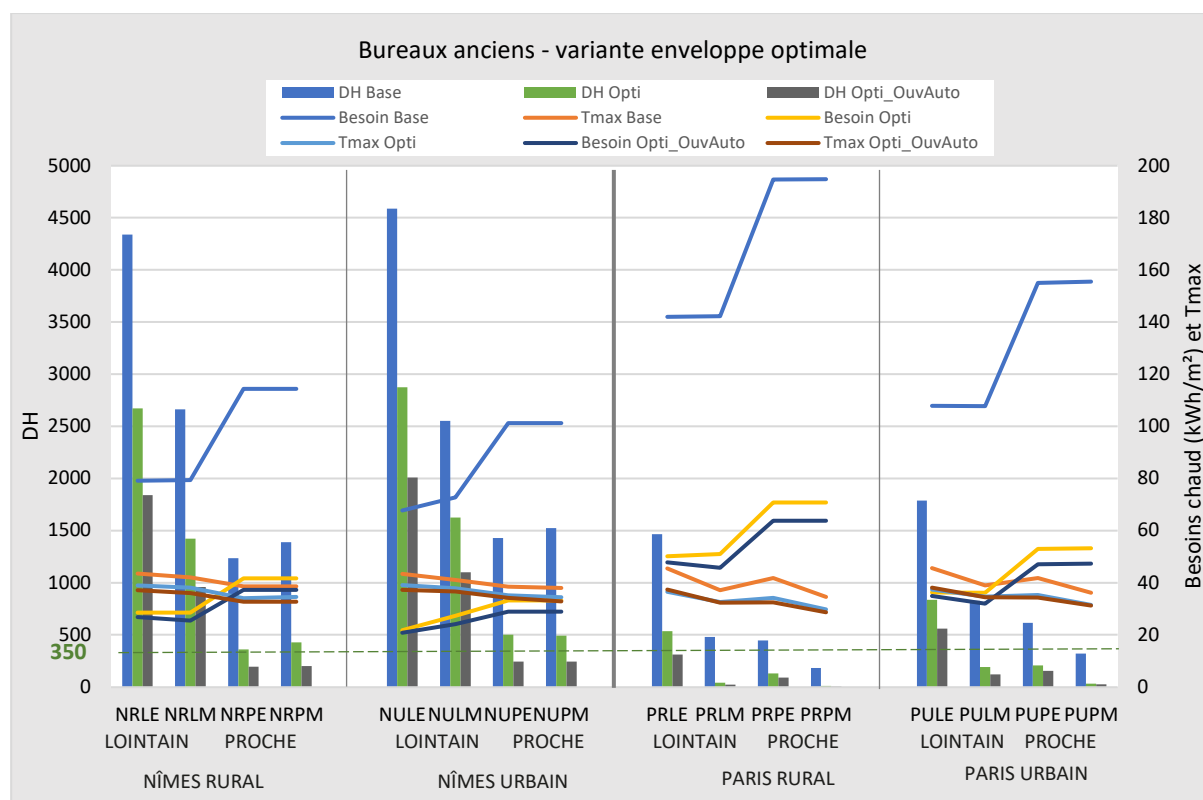


Figure 222 - Bureaux anciens – variante optimale bâti

En complément des résultats obtenus sur les bureaux neufs, cette variante nous permet de voir le meilleur niveau de confort atteignable en partant d'un bureau existant de très mauvaises caractéristiques thermiques et en travaillant uniquement sur l'enveloppe. Les niveaux d'inconfort des bases est ici beaucoup plus élevé que pour les bureaux neufs.

Le nombre de DH diminue de 70 à plus de 95% pour Paris et de 55 à 85% pour Nîmes. La température maximale connaît une diminution qui atteint 9°C. Les besoins de chaleur quant à eux diminuent de près de 70%, quel que soit le scénario météo.

Les améliorations sont donc significatives et le seuil des 350 DH défini par la RE2020 est atteint pour 11 des 16 fichiers météo :

- Tous les fichiers « futur proche » atteignent un niveau de confort satisfaisant.
- Tous les fichiers de Paris, hors Paris urbain lointain extrême atteignent un niveau de confort satisfaisant.
- Le niveau d'inconfort reste notable pour les fichiers Nîmes lointain et Paris urbain lointain extrême, ces climats nécessiteront un dispositif de rafraîchissement complémentaire qui est étudié dans les paragraphes suivants.

5.5.2.11. Variantes systèmes de rafraîchissement des bureaux neufs

Hypothèses :

Les systèmes étudiés ici le sont en fonction de la possibilité de les modéliser dans l'outil de simulation Pleiades STD Comfie, dans le contexte d'une saisie des ventilations via une enveloppe aéraulique. Le brassage d'air est modélisé par une modification de la limite haute de confort calculée en fonction de la vitesse d'air et des conditions de température et d'humidité du local.

Variante	Caractéristiques
Optimale bâti	Voir description ci-dessus, aucun système de rafraîchissement actif
Rafraîchissement adiabatique direct	Humidification directe de l'air soufflé modélisée au niveau de la CTA double flux (efficacité de 0.8, température de consigne de soufflage 23°C)
Rafraîchissement adiabatique indirect	Humidification indirecte de l'air soufflé modélisée au niveau de la CTA double flux (efficacité de 0.8, température de consigne de soufflage 23°C)
Brasseur d'air 0,5 m/s	Brassage d'air 0,5 m/s dans tous les locaux occupés
Brasseur d'air 1 m/s	Brassage d'air 1 m/s dans tous les locaux occupés

Résultats :

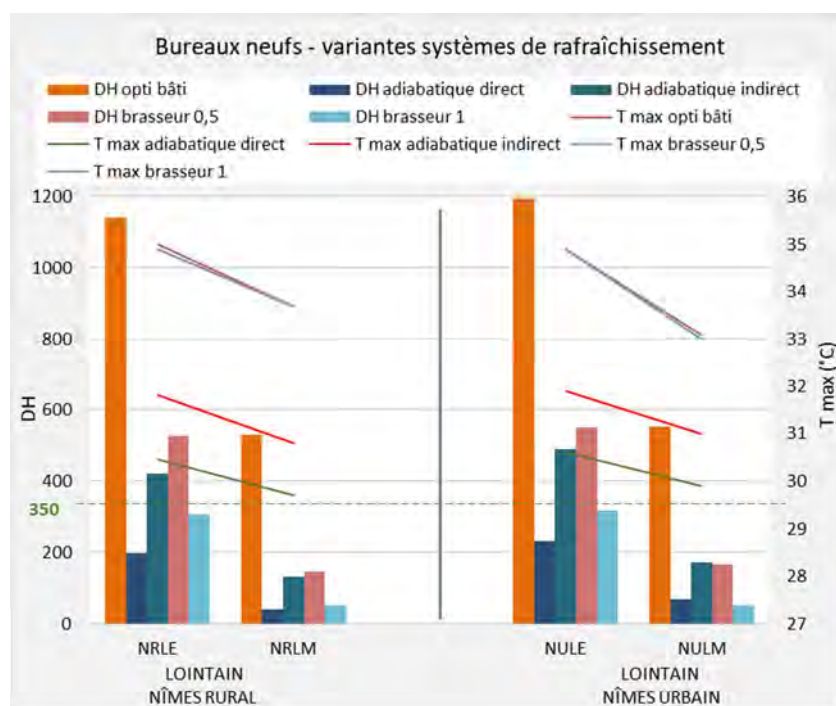


Figure 223 - Bureaux - variantes systèmes de rafraîchissement

Les systèmes de rafraîchissement proposés permettent d'abaisser significativement le niveau d'inconfort :

- le nombre de DH d'inconfort passe en dessous de 350 pour tous les fichiers étudiés ici, pour le rafraîchissement adiabatique direct et le brassage d'air à 1 m/s.
- un dépassement modéré subsiste pour les fichiers Nîmes futur lointain et vague de chaleur extrême pour le rafraîchissement adiabatique indirect et le brassage d'air à 0,5 m/s.

Il est à noter les températures maximales diminuent fortement pour les deux variantes en rafraîchissement adiabatique (de l'ordre de - 3°C en adiabatique indirect et - 4.5 °C en adiabatique direct). Les températures maximales n'évoluent pas dans le cas du brassage d'air : c'est le ressenti de l'occupant qui est modifié.

Il est important de noter à ce stade que l'atteinte d'un niveau de confort jugé satisfaisant est ici permise par la bonne conception initiale du bâtiment, le cumul des actions sur le bâti puis grâce à la mise en place d'un équipement de rafraîchissement.

5.5.2.12. Variantes brasseurs d'air des bureaux anciens

Hypothèses :

On étudie dans le cas du bâtiment de bureaux ancien uniquement l'effet du brassage d'air, modélisé par une modification de la limite haute de confort calculée en fonction de la vitesse d'air et des conditions de température et d'humidité du local.

Variante	Caractéristiques
Optimale bâti	Voir description ci-dessus, aucun système de rafraîchissement actif
Brasseur d'air 0,5 m/s	Brassage d'air 0,5 m/s dans tous les locaux occupés
Brasseur d'air 1 m/s	Brassage d'air 1 m/s dans tous les locaux occupés

Résultats :

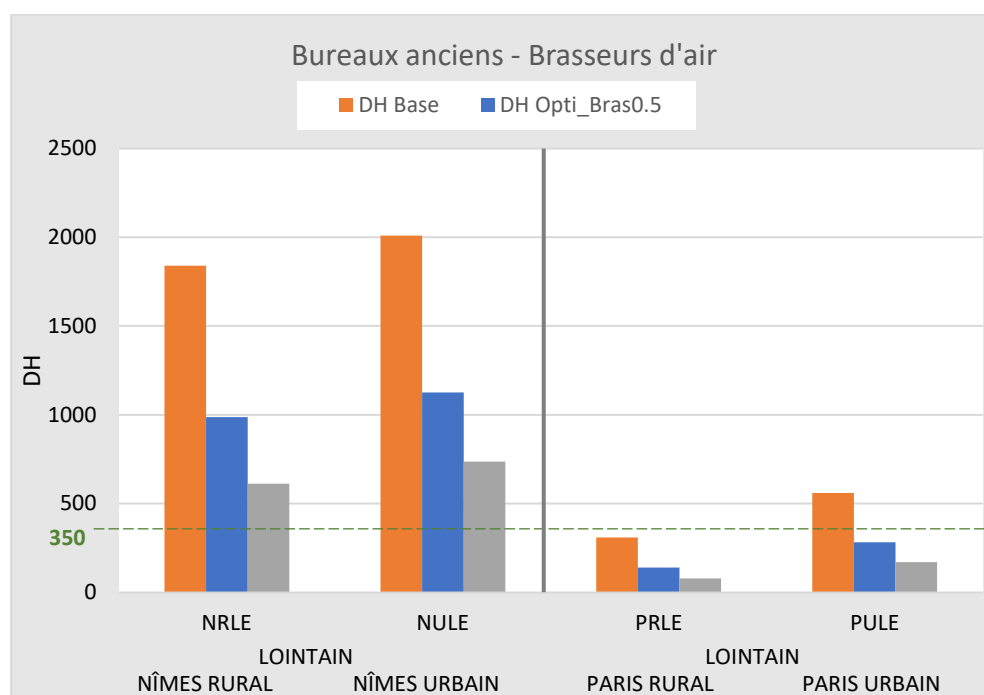


Figure 224 - Etude de l'effet des brasseurs d'air sur les bureaux anciens

Comme pour le bâtiment de bureaux neuf, l'effet des brasseurs d'air est notable : on observe une diminution des DH de 45 à 55% pour un brassage d'air à 0.5m/s et de 63 à 74% pour 1m/s.

Ce dispositif de rafraîchissement est suffisant pour atteindre un bon niveau de confort sur les fichiers de Paris.

Sur les fichiers de Nîmes, les niveaux atteints même avec 1 m/s sont encore élevés. Un dispositif de type rafraîchissement adiabatique ou la combinaison de plusieurs dispositifs de rafraîchissement permettrait d'atteindre un niveau de confort plus acceptable.

5.5.3. Bâtiments d'enseignement

5.5.3.1. Comparatif des 16 fichiers météorologiques sur les bâtiments de base non rafraîchi

Comme pour le bâtiment de bureaux, les bâtiments scolaires de base ont dans un premier été simulés sur l'ensemble des fichiers météorologiques, afin de vérifier le comportement du bâtiment dans ces différentes conditions climatiques. Dans ces versions de base, les bâtiments ont été simulés sans système de rafraîchissement pour quantifier l'inconfort hors apport de froid actif.

Résultats :

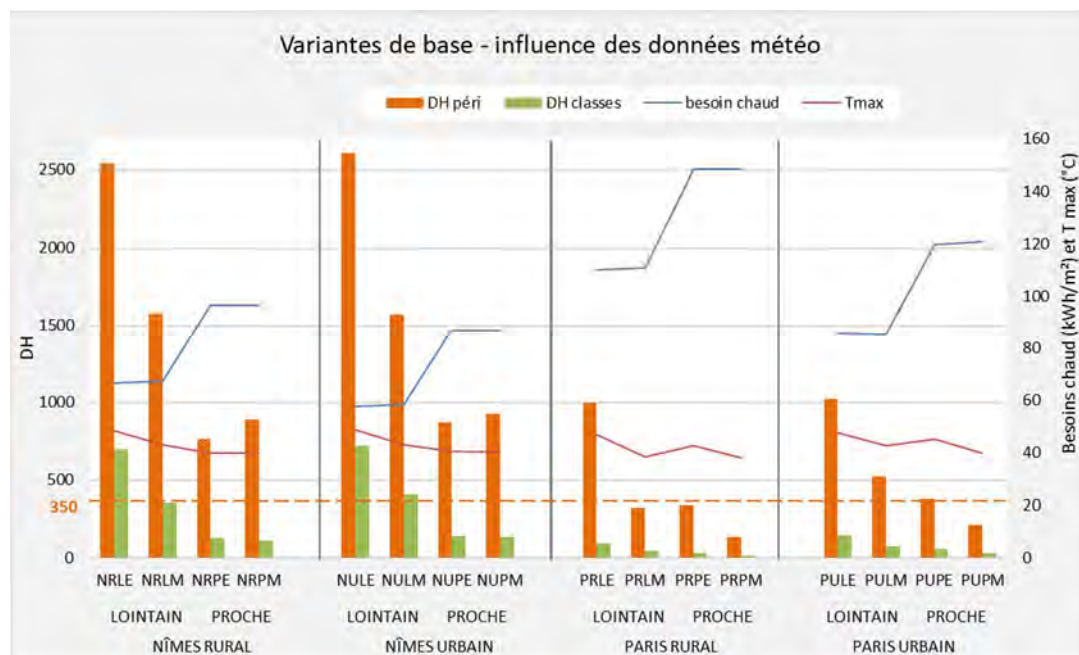


Figure 225 - École ancienne - résultats simulations des bases

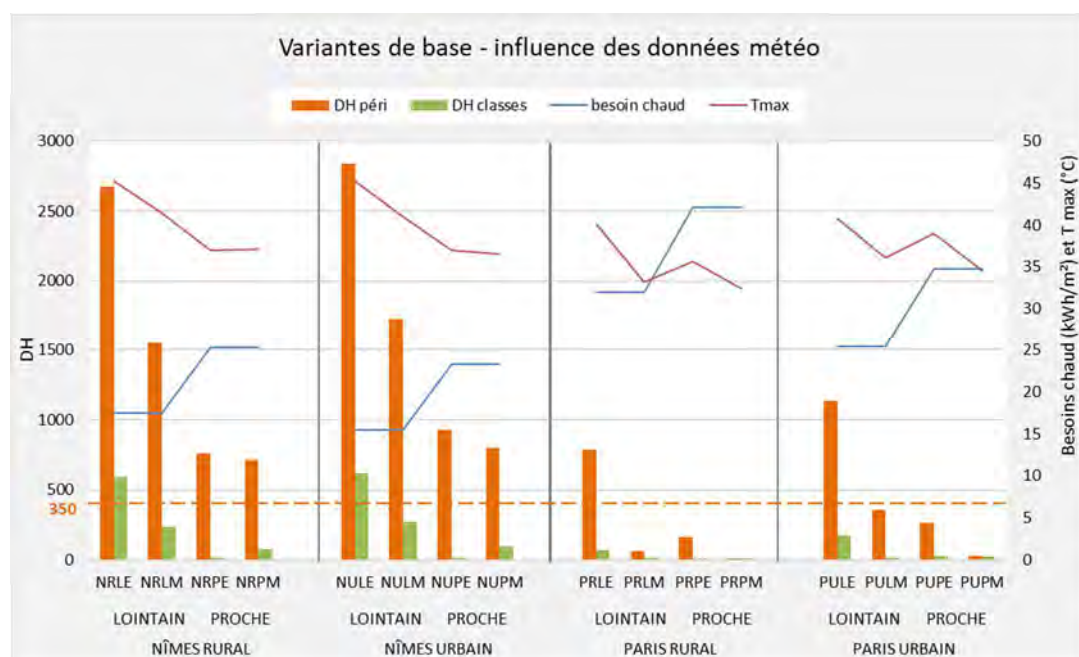


Figure 226 - École neuve - résultats simulations des bases

Pour chaque variante, les résultats suivants sont extraits de la simulation :

- nombre de DH de la salle de classe la plus pénalisée et de la zone utilisée pour des usages périscolaires la plus pénalisée.
- Température max de la zone thermique la plus pénalisée
- besoins de chauffage totaux sur le bâtiment

De ces simulations de base, on peut tirer les enseignements suivants :

- la réaction comparée des bâtiments d'enseignement par rapport à la rigueur de chaque fichier météorologique suit les mêmes tendances que les bâtiments de bureaux.
- les deux « sous-usages » observés dans ces établissements scolaires présentent des niveaux de confort très différents :
 - les zones de salle de classe présentent d'emblée un inconfort modéré ou faible (0 à 700 DH) : ses locaux ne sont pas occupés en juillet et août lorsque surviennent les vagues de chaleur.
 - les zones périscolaires présentent des niveaux d'inconfort plus importants (jusqu'à près de 2700 DH), elles sont utilisées toute l'année y compris pendant les vacances scolaires et donc également en juillet et août lors des vagues de chaleur.

Cette observation interroge sur la pertinence d'utiliser une référence absolue pour juger du niveau d'inconfort d'un local. La référence devrait être différenciée pour tenir compte du nombre d'heures d'utilisation du local.

Dans les résultats présentés dans les simulations suivantes, seule la zone périscolaire est observée.

5.5.3.2. Impact du type de vitrage

Hypothèses :

Variante	Caractéristiques	Localisation école ancienne	Localisation école nouvelle
Simple vitrage (Base EA)	$U_w = 5,23 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, $S_w = 0,6$ DV ancien $U_w = 3 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, $S_w = 0,55$	SV fenêtre Nord DV ancien autres façades	<i>Non simulé</i>
Double vitrage (Base EN)	$U_w = 1,33 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, $S_w = 0,49$	Toutes TV au sud	Toutes
Triple vitrage	$U_w = 0,95 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, $S_w = 0,43$	uniquement (zones occupées)	Toutes hors murs rideau

Résultats :

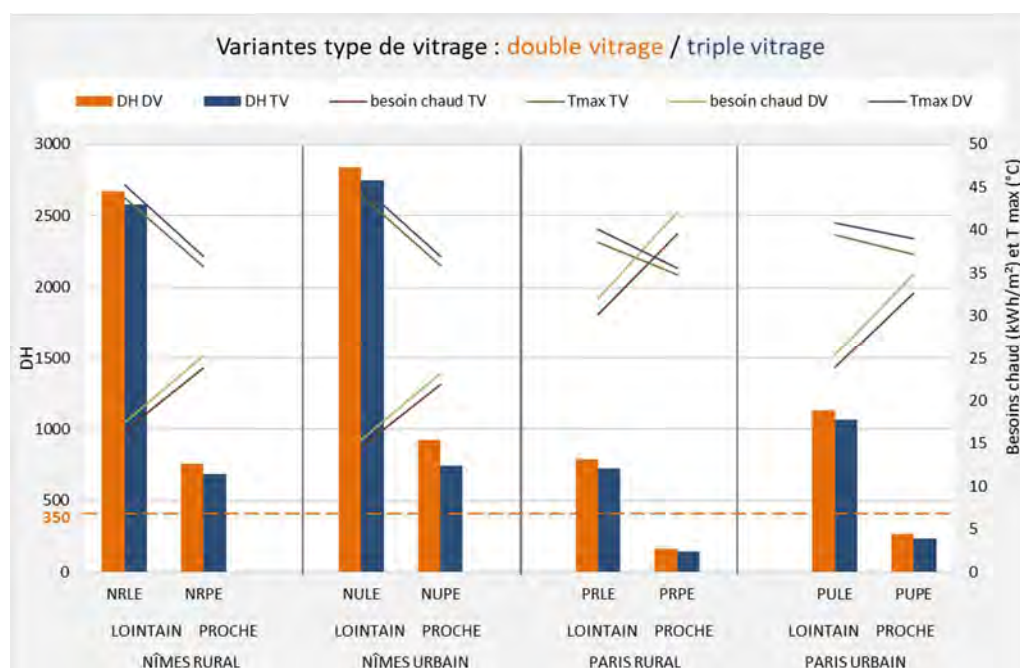


Figure 227 - École neuve - impact du type de vitrage

Les simulations sur l'école neuve confirment les observations faites sur le bâtiment de bureau :

- le triple vitrage améliore légèrement le confort d'été (le nombre de DH diminue de 3 à 20%).
- les besoins de chauffage sont également diminués, plus sensiblement sur les fichiers de Paris.

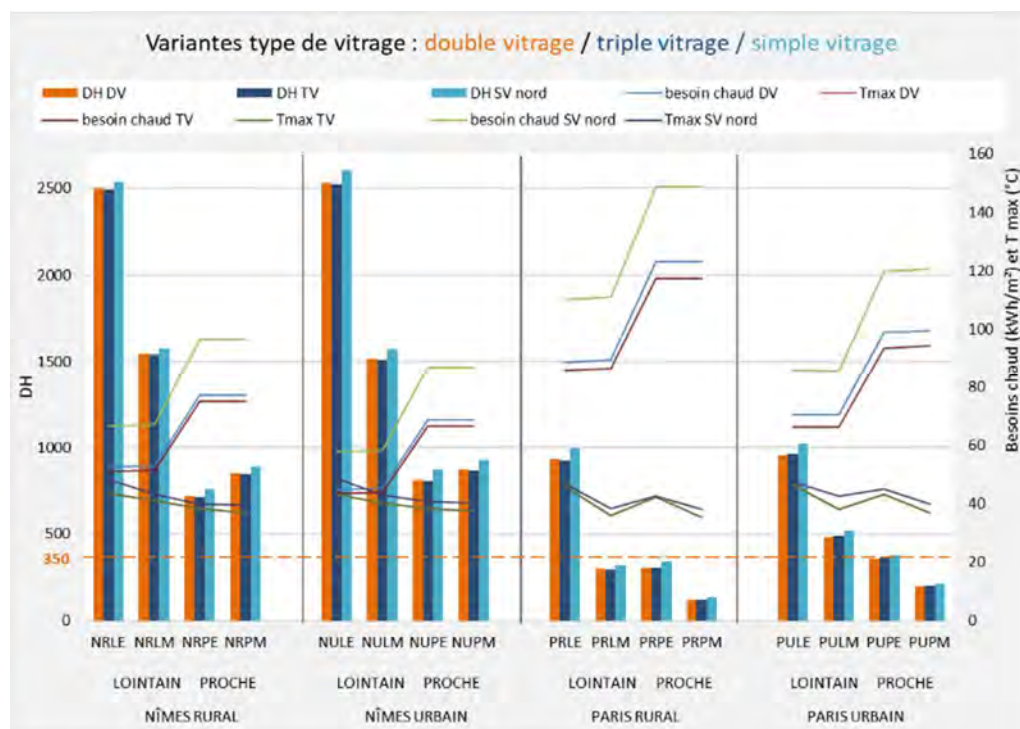


Figure 228 - École ancienne - impact du type de vitrage

Sur l'école ancienne :

- le triple vitrage n'a été testé que sur les menuiseries sud des zones de vie (classes et salle polyvalente), son apport est moindre sur une menuiserie moins exposée au rayonnement solaire direct en été.
- la conservation du simple vitrage au nord est logiquement pénalisante : les apports solaires et les apports par transmission sont plus importants.

5.5.3.3. Impact de la protection solaire

Hypothèses :

Variante	Caractéristiques école ancienne	Caractéristiques école nouvelle
Protec 0	Rideaux intérieurs seuls (taux d'occultation de 15%)	Sans lames verticales, mais avec casquettes
Protec 1 (Base)	Rideaux intérieurs + casquette sud	Casquettes et lames verticales extérieures (sauf nord niveau 1)
Protec 2	Stores extérieurs (taux d'occultation de 90%)	<i>Non simulé</i>
Protec 3	Stores extérieurs + casquette sud + vitrage à contrôle solaire bureau 3	Casquettes et lames verticales ext

Résultats :

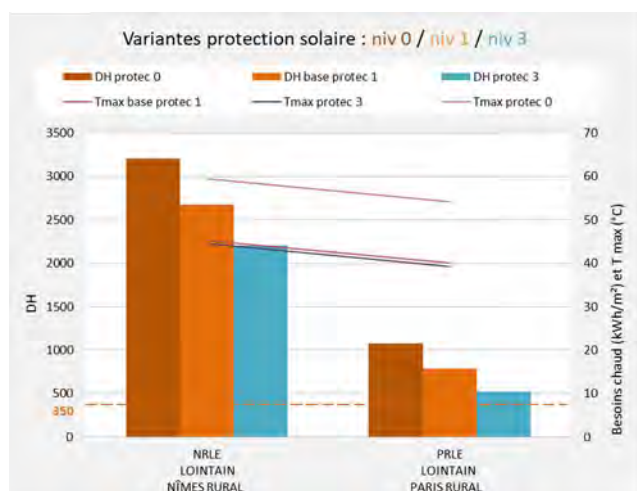


Figure 229 - École neuve - impact de la protection solaire

Les résultats sur l'école neuve confirment l'importance de la protection solaire sur le confort d'été. Le nombre de DH diminue de 31 à 51 % entre le niveau de protection 0 (casquettes seules) et le niveau 3 (casquettes et lames verticales généralisées).

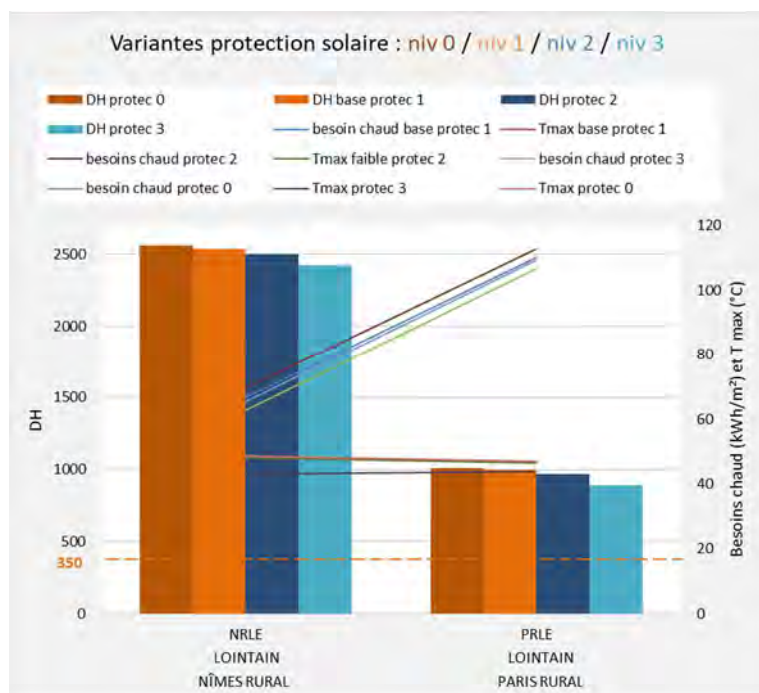


Figure 230 - École ancienne - impact de la protection solaire

Sur l'école ancienne, l'impact est moins important, mais reste notable. Le nombre de DH diminue de 5 à 12 % entre le niveau de protection 0 (rideaux intérieurs seuls) et le niveau 3 (stores, casquettes et contrôle solaire).

La présence d'arbres contre la façade Sud, conservée dans l'ensemble des modélisations, filtre une partie des apports et atténue les différences entre niveaux de protection solaire complémentaire.

5.5.3.4. Impact de la couleur du revêtement extérieur et d'une végétalisation

Hypothèses :

Variante	Caractéristiques école ancienne	Caractéristiques école nouvelle
Absorptivité standard	Absorptivité des murs 0,6 et toitures à 0,6 (Base)	Absorptivité des murs 0,6 et toitures à 0,6
Faible absorptivité	Absorptivité des murs et toitures à 0,3	Absorptivité des murs et toitures à 0,35
Végétalisation	Absorptivité des murs à 0,2 (toiture tuiles non modifiée)	Absorptivité des murs et toitures à 0,2 et ajout de 10 cm de terre au-dessus des toitures terrasses (Base)

Résultats :

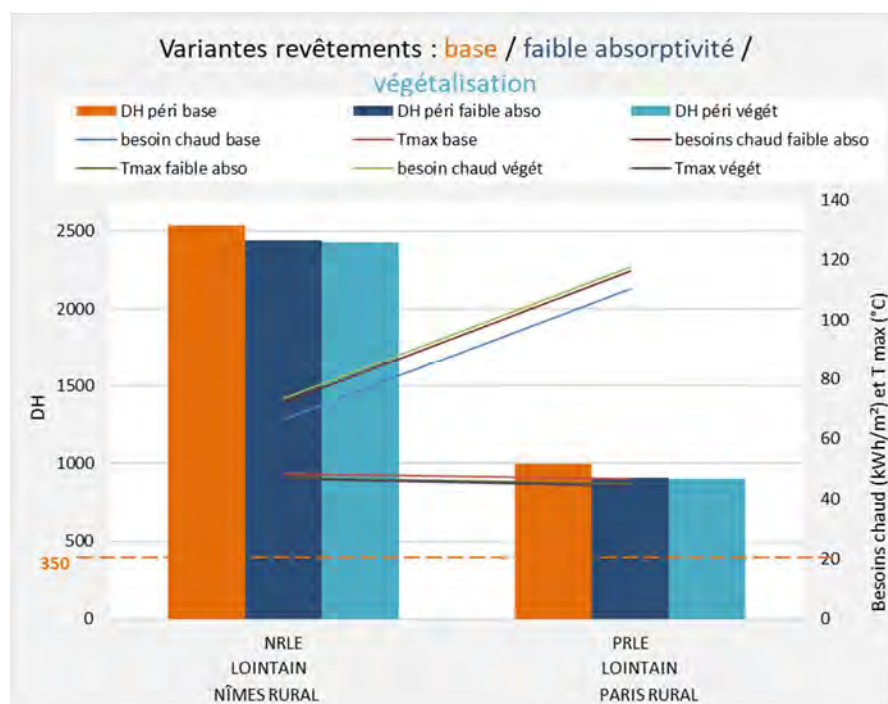


Figure 231 - École ancienne - impact de la couleur du revêtement extérieur et d'une végétalisation

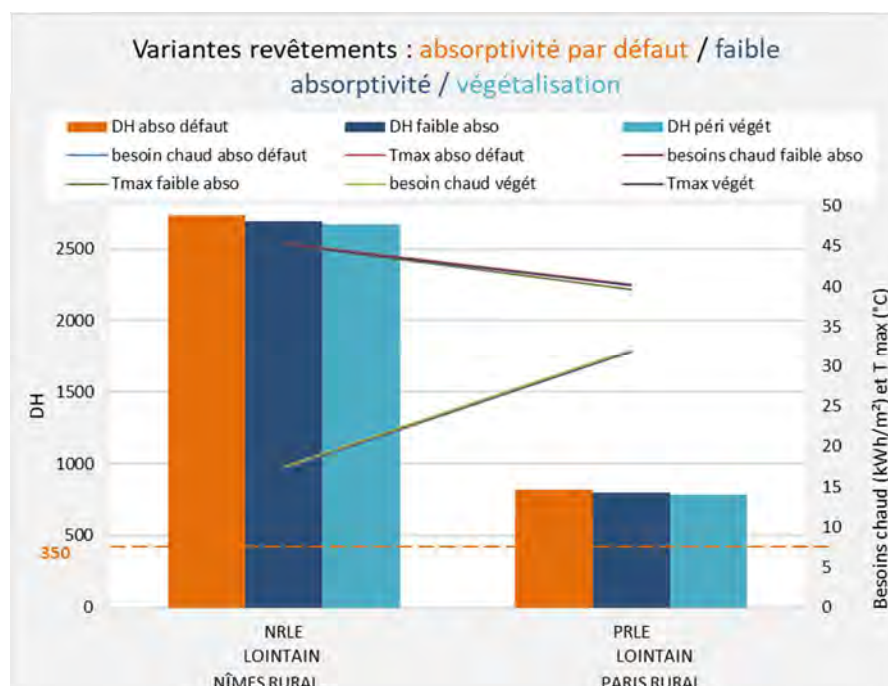


Figure 232 - École neuve - impact de la couleur du revêtement extérieur

Les résultats sur les bâtiments d'enseignement confirment l'apport relativement faible pour le confort d'été de la mise en place d'un revêtement de couleur claire sur les toitures terrasses et murs extérieurs ou leur végétalisation. Le nombre de DH diminue de 2 à 4% pour la végétalisation.

5.5.3.5. Impact du type d'ouverture des menuiseries

Hypothèses :

Variante	Caractéristiques école ancienne
Ouverture manuelle (Base)	Ventilation nocturne par ouverture des ouvrants de 40% du 15 mai au 30 septembre de 19h à 8h. Débits de renouvellement évalués par le calcul aéraulique.
Ouverture automatique	Ventilation nocturne par ouverture automatique suivant delta T des ouvrants de 40%. Débits de renouvellement évalués par le calcul aéraulique.

Note : Le taux d'ouverture maximal de 40% s'explique par la géométrie de la fenêtre (soubassement non ouvrable, fenêtre coulissante). On considère donc que la partie mobile est ouverte à 100%.

Résultats :

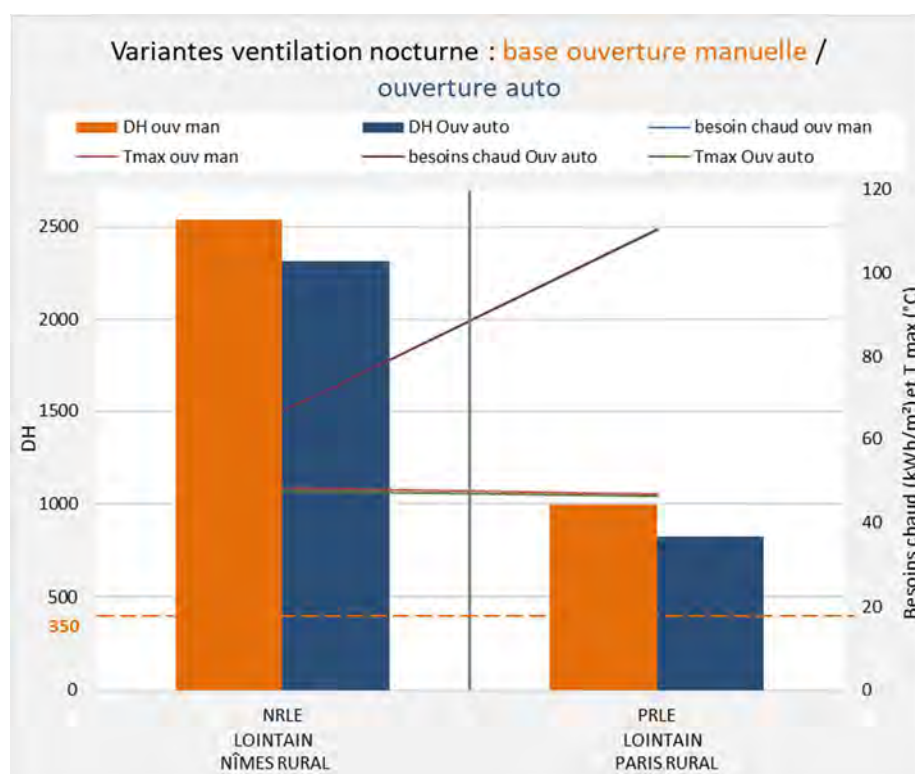


Figure 233 - École ancienne - impact du type d'ouverture des menuiseries

Les résultats sur l'école ancienne confirment l'apport notable pour le confort d'été de la mise en place d'une ouverture automatique des menuiseries pour maximiser la ventilation naturelle des locaux dès que les conditions sont favorables, même en journée (free-cooling). La diminution du nombre de DH va de 9 à 17 % sur les fichiers météorologiques testés.

5.5.3.6. Impact du débit de ventilation nocturne

Hypothèses :

Dans le cas de l'école nouvelle, la simulation est conduite sans utilisation du calcul aéralique. Les débits de ventilation nocturne font dans ce cas l'objet d'une estimation. La sensibilité des résultats à cette hypothèse de modélisation a été étudiée.

Variante

2 / 5 / 10 vol/h

Caractéristiques école nouvelle

Ventilation nocturne de 20h à 8h. Des conditions de température assurent que cette ventilation est mise en œuvre quand les conditions de température sont favorables. Trois hypothèses de débit de renouvellement d'air sont testées : 2, 5 et 10 vol/h.

Résultats :

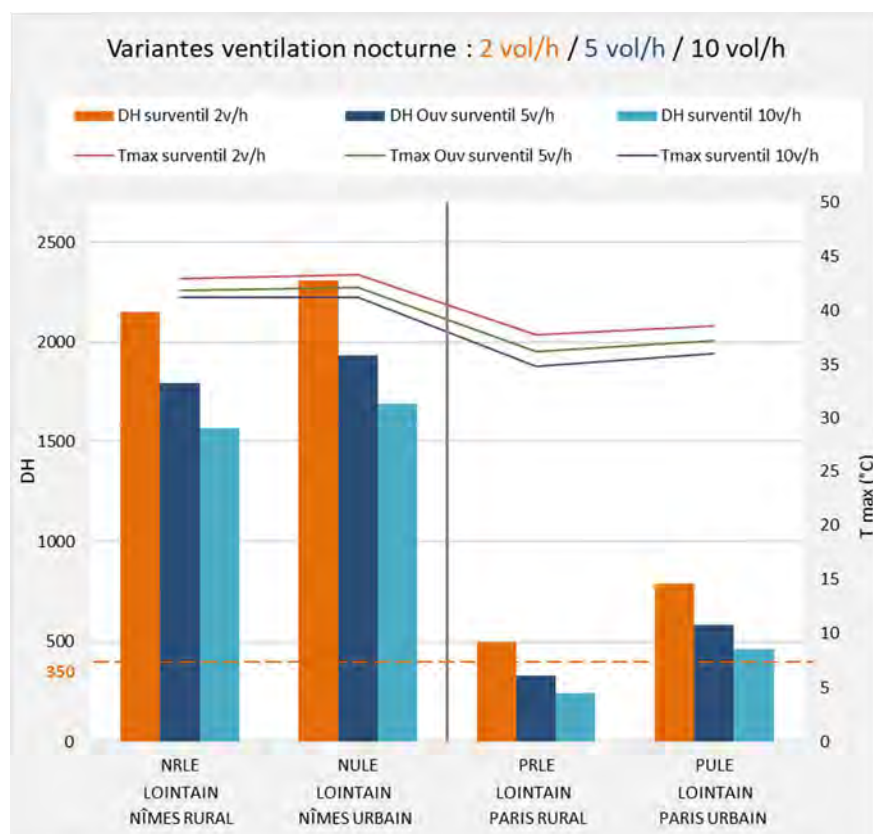


Figure 234 - École neuve - impact du débit de ventilation nocturne

Les résultats obtenus sur l'école neuve montrent la forte sensibilité des résultats à l'hypothèse retenue pour le débit de renouvellement d'air utilisé pour la simulation de la surventilation nocturne.

Par rapport à l'hypothèse conservatrice de la variante de base (2 vol/h), les débits de 5 et 10 vol/h abaissent le nombre de DH de respectivement de 32 à 58% et de 40 à 92%.

La mise en œuvre réelle d'un débit de ventilation nocturne important est envisageable si les surfaces ouvrantes sont suffisantes et un mobilisant une ventilation traversante (ouvertures sur plusieurs façades et portes intérieures ouvertes) ou le tirage thermique (ouvertures basses et hautes).

De plus, de nombreuses contraintes pratiques peuvent s'opposer à cette mise en œuvre pratique : présence et sensibilisation des occupants pour manipuler les ouvrants à bon escient, problématiques d'intrusion, de pluie, obstacles intérieurs (présence de rideaux intérieurs bloquant le passage de l'air).

Il conviendra donc de rester prudent sur l'hypothèse de débit retenue et de s'assurer que les diverses contraintes sont anticipées.

5.5.3.7. Impact du niveau d'isolation et d'inertie de l'enveloppe

Hypothèses :

Variante	Caractéristiques murs	Caractéristiques toitures	U murs (W/m ² .K)	U plancher TP (W/m ² .K)	U toiture (W/m ² .K)
ITI Iso min	Parpaing ITI laine de verre		0,3	0,4	0,2
ITI Iso max	Parpaing ITI laine de verre		0,2	0,2	0,1
ITE Iso min	Parpaing ITE polystyrène		0,3	0,4	0,2
ITE Iso max	Parpaing ITE polystyrène		0,2	0,2	0,1
ITR Iso min	Siporex	Plafond sous comble isolé laine de verre	0,3	0,4	0,2
ITR Iso max	Siporex		0,3	0,2	0,1
MOB Iso min	MOB laine de bois entre montants (40 kg/m ³)		0,3	0,4	0,2
MOB Iso max (Base)	MOB laine de bois entre montants (40 kg/m ³) et complément extérieur laine de bois dense (50 kg/m ³)		0,2	0,2	0,1

Seule l'enveloppe extérieure est modifiée dans ces variantes : la composition et le niveau d'isolation des murs extérieurs et de la toiture et le niveau d'isolation des planchers bas.

La nature du plancher bas n'est pas modifiée : dalle béton sur terre-plein isolée en sous-face.

L'inertie disponible à l'intérieur du bâtiment n'est pas modifiée : les cloisons intérieures sont identiques pour toutes les variantes.

Résultats :

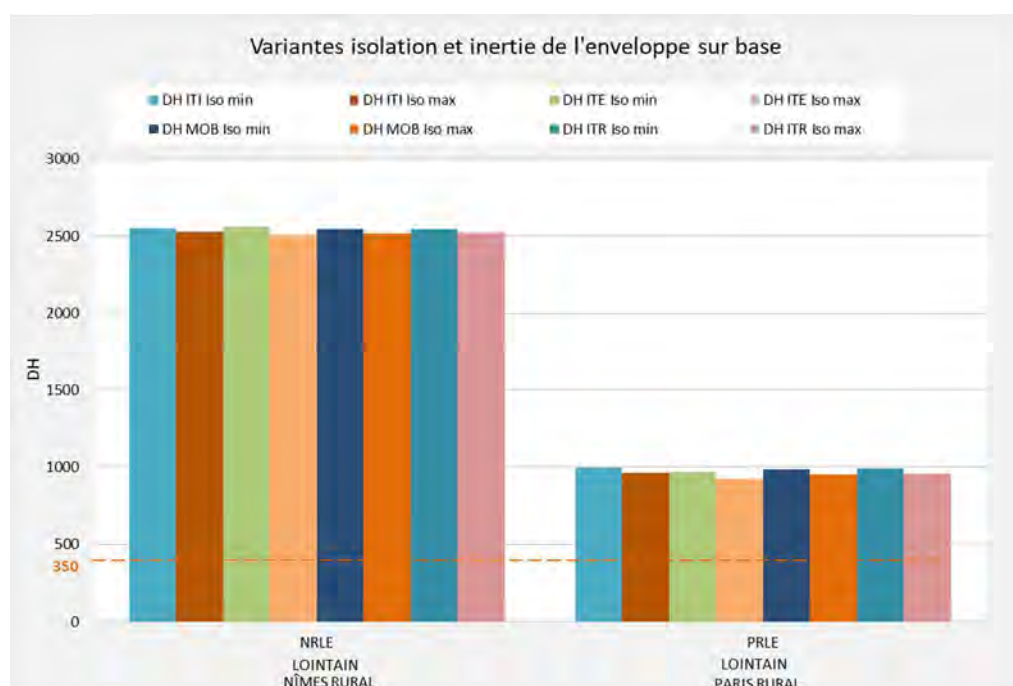


Figure 235 - École ancienne - impact du niveau d'isolation et d'inertie sur la variante de base

En ne modifiant que la façade sur l'école ancienne, les niveaux de confort restent relativement stables. La seule différence notable concerne l'impact du niveau d'isolation. Comme pour le bâtiment de bureaux, les variantes en isolation min sont légèrement moins confortables que les variantes mieux isolées.

Pour voir un effet plus important de l'inertie sur ce projet, une série de simulations a été effectuée en modifiant la nature du plafond sous combles.

Hypothèses :

Dans cette série de variantes, trois des mesures d'adaptation décrites dans les paragraphes précédents sont prise en compte : triple vitrage, niveau de protection solaire 3 et ouverture automatique des menuiseries.

De plus, la nature du plancher haut (léger – plaque de plâtre ou lourd – dalle béton) est croisée avec 4 enveloppes.

Changer le type de plancher haut n'est pas une mesure d'adaptation mobilisable en rénovation, il s'agira plutôt d'un choix de conception à favoriser pour les projets neufs.

Résultats :

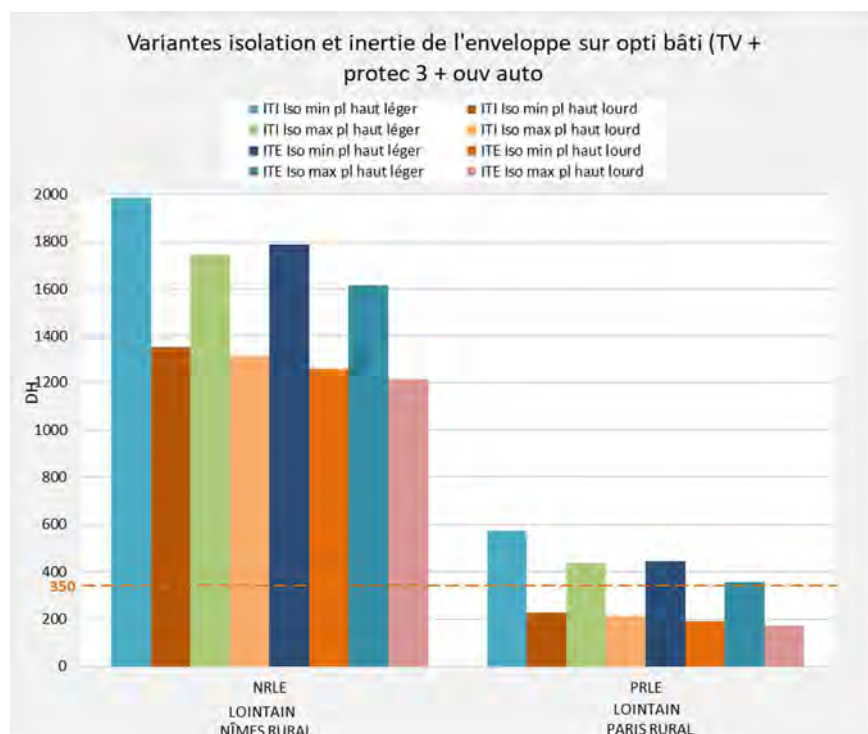


Figure 236 - École ancienne - impact du niveau d'isolation et d'inertie sur la variante opti bâti

L'analyse des niveaux d'inconfort obtenus amène les conclusions suivantes :

- la présence du plafond lourds apporte un gain notable (diminution du nombre de DH de 25 à 32% sur le fichier de Nîmes et 51 à 60 % sur le fichier de Paris).

- hors impact de la présence ou non d'un plancher haut lourd, les écarts entre solutions ITI et ITE sont plus marquées que dans la série de variantes précédentes (diminution de 19 à 38% par exemple entre ITI Iso min et ITE Iso max en plancher léger).

Ce résultat illustre le couplage existant entre disponibilité de l'inertie thermique et une ventilation nocturne efficace. Dans cette seconde série de variantes, les ouvertures de fenêtres sont automatiques, alors qu'elles sont manuelles dans la précédente. Une ventilation naturelle plus fréquente permet à l'inertie disponible de mieux jouer son rôle d'accumulateur thermique par le déstockage de la chaleur emmagasinée et le « rechargement » en fraîcheur. Le confort est ainsi favorisé.

5.5.3.8. Synthèse des variantes bâti

Le graphe ci-dessous récapitule la sensibilité de chacun des paramètres testés sur le confort, sur la base du fichier météorologique le plus impactant : NRLE. Il permet de comparer la sensibilité de chacun des paramètres testés :

- paramètres à forte sensibilité : apports solaires sur les parois opaques (non isolées dans la variante de base), protection solaire et ventilation
- paramètres à plus faible sensibilité : niveau d'isolation et inertie de la façade

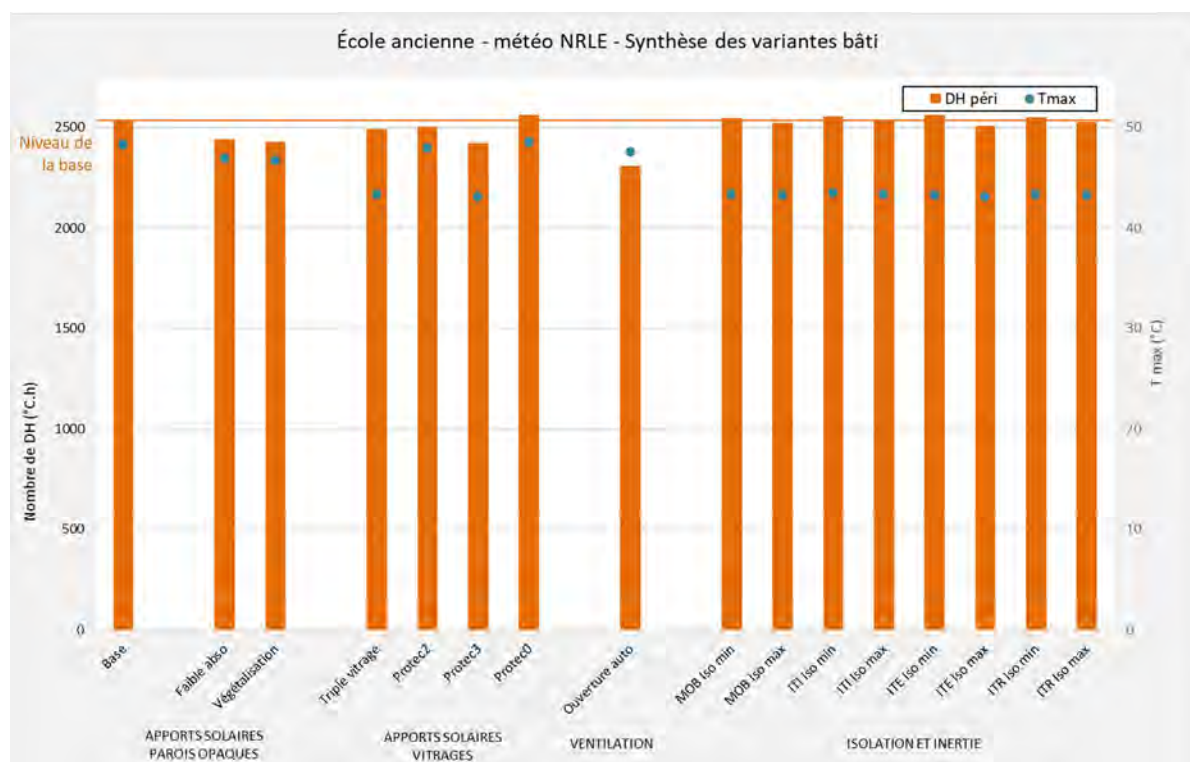


Figure 237 - École ancienne - synthèse des variantes bâti, sensibilité comparée des paramètres testés sur le confort, fichier NRLE

5.5.3.9. Variante optimale bâti

Cette variante cumule les mesures d'adaptation et choix de conception présentant les résultats les plus favorables sur le confort d'été, issues des études de sensibilité des paragraphes précédents. L'objectif est de voir le meilleur niveau atteignable en agissant uniquement sur le bâti. Elle sert également de base aux simulations faisant intervenir des systèmes de rafraîchissement actifs dans le paragraphe suivant.

Hypothèses école ancienne :

Variante	Menuiseries	Protection solaire	Ouverture des menuiseries	Façades	Plancher haut sous combles
Base	Double vitrage	Rideau intérieur + casquette sud	Ouverture manuelle	Mur non isolé	Léger non isolé
Optimale bâti	Triple vitrage	Store extérieur + casquette sud + contrôle solaire bureau 3	Ouverture automatique des menuiseries	ITE Iso max	Lourd Iso max

Résultats :

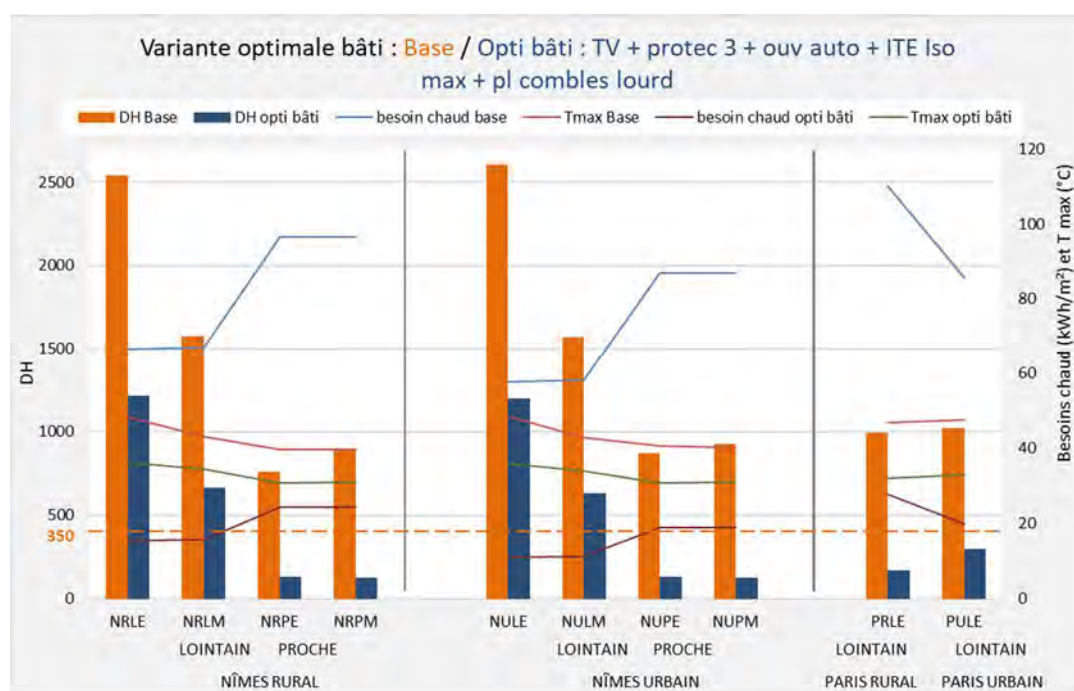


Figure 238 - École ancienne - variante optimale bâti

La majorité des conditions météorologiques présentent en base des inconforts significatifs pour la zone péri-scolaire. Dans cette nouvelle configuration optimale bâti :

- un niveau de confort satisfaisant est atteint pour les fichiers Paris et pour les fichiers Nîmes en futur proche.
- malgré une baisse significative, l'inconfort reste important pour les fichiers de Nîmes en futur lointain. Il faudra ici un dispositif de rafraîchissement complémentaire.

Hypothèses école nouvelle :

Variante	Menuiseries	Protection solaire	Ouverture des menuiseries
Base	Double vitrage	Casquettes et lames verticales extérieures (hors nord niv 1)	Ouverture manuelle

Optimale
bâti

Triple vitrage

Casquettes et
lames verticales
extérieures

Ouverture
automatique des
menuiseries

Résultats :

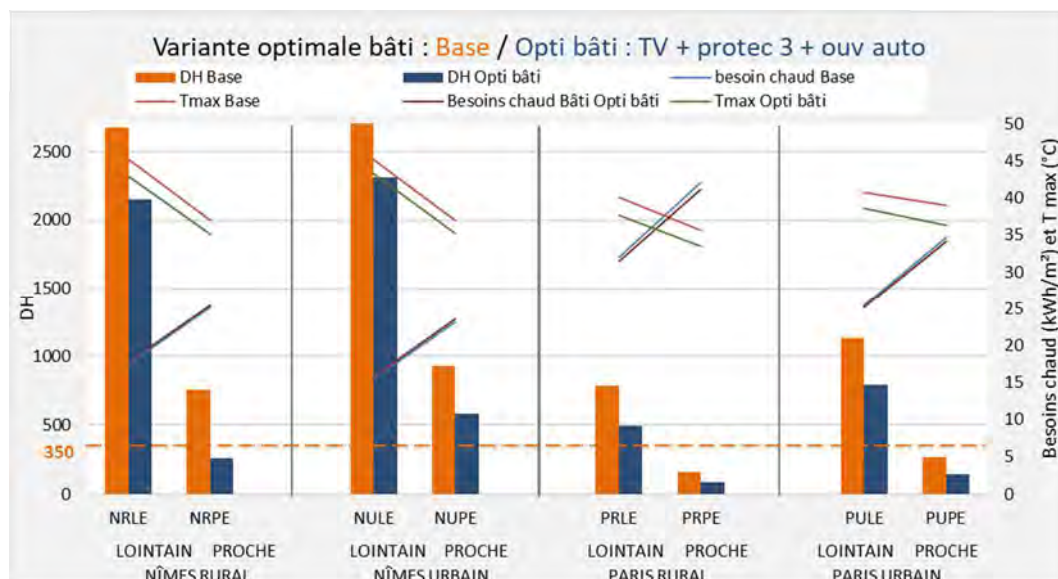


Figure 239 - École neuve - variante optimale bâti

La majorité des conditions météorologiques présentent en base des inconforts significatifs pour la zone périscolaire.

Dans cette nouvelle configuration optimale bâti :

- pour les conditions météorologiques en futur proche, le niveau de confort est presque toujours atteint, soit parce qu'il l'était déjà en base soit grâce aux adaptations sur le bâti.
- pour les conditions météorologiques en futur lointain, les gains ne permettent pas d'atteindre un niveau de confort satisfaisant. Il faudra dans tous ces cas un dispositif de rafraîchissement complémentaire.

5.5.3.10. Variantes systèmes de rafraîchissement

Hypothèses école ancienne :

Pour l'école ancienne seul le brassage d'air a été testés. La simulation d'un rafraîchissement adiabatique n'a pas été retenu, car elle nécessiterait la mise en place d'une centrale de ventilation, alors que l'école est ventilée naturellement. Le brassage d'air est modélisé par une modification de la limite haute de confort calculée en fonction de la vitesse d'air et des conditions de température et d'humidité du local.

Variante	Caractéristiques
Optimale bâti	Voir description ci-dessus, aucun système de rafraîchissement actif
Brasseur d'air 0,5 m/s	Brassage d'air 0,5 m/s dans tous les locaux occupés
Brasseur d'air 1 m/s	Brassage d'air 1 m/s dans tous les locaux occupés

Résultats :

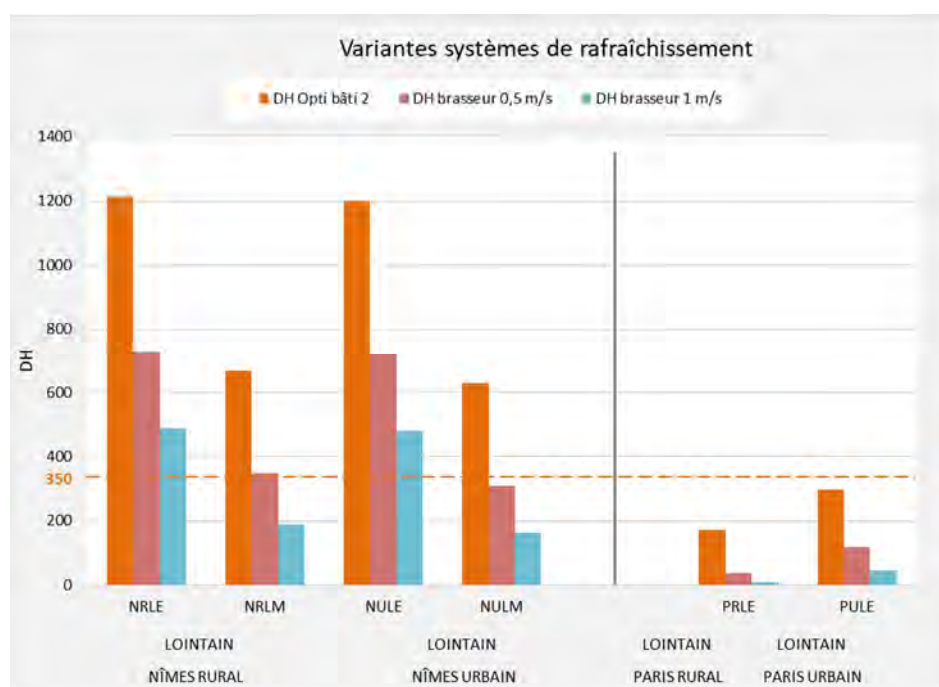


Figure 240 - École ancienne - variantes systèmes de rafraîchissement

Pour l'école ancienne, le brassage d'air à 1 m/s permet d'abaisser significativement le niveau d'inconfort et de :

- s'approcher de la limite de 350 DH pour les fichiers Nîmes en futur lointain.
- passer en dessous de 350 DH pour toutes les autres conditions météorologiques.

Hypothèses école nouvelle :

Pour l'école nouvelle, en plus du brassage d'air, un puits climatique a pu être modélisé. Il est en effet modélisable dans le contexte d'une modélisation des ventilations par scénario comme c'est le cas pour ce bâtiment.

Variante	Caractéristiques
Optimale bâti	Voir description ci-dessus, aucun système de rafraîchissement actif
Puits climatique (PC)	Puits climatique constitué de 3 tubes de 40m de long, diamètre 315 mm, à une profondeur de 2 m traitant 1500 m ³ /h et associés aux seules zones périscolaires.
PC et surventil 10 v/h	Le même puits climatique associé à une surventilation nocturne à 10 vol/h
Brasseur d'air 0,5 m/s	Brassage d'air 0,5 m/s dans tous les locaux occupés
Brasseur d'air 1 m/s	Brassage d'air 1 m/s dans tous les locaux occupés
PC surventil 10v/h brasseur 1 m/s	Cumul des trois dispositifs

Résultats :

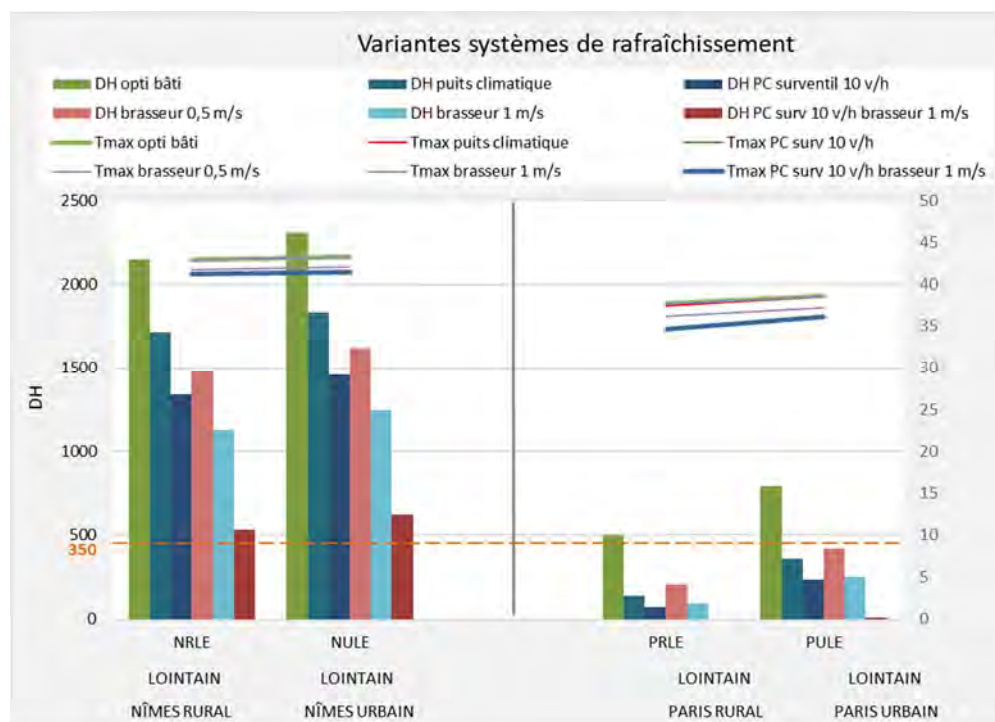


Figure 241 - École neuve - variantes systèmes de rafraîchissement

Ici encore, les systèmes de rafraîchissement proposés permettent d'abaisser significativement le niveau d'inconfort.

- pour les fichiers de Paris en futur lointain et vague de chaleur extrême, le nombre de DH d'inconfort passe en dessous de 350 pour tous les dispositifs étudiés individuellement : puits climatique, brassage d'air à 0.5 m/s et 1 m/s.

- pour les fichiers de Nîmes en futur lointain et vague de chaleur extrême, chaque dispositif pris individuellement n'est pas suffisant. Il faut les cumuler pour approcher de la limite de 350 DH. Il existe notamment une bonne complémentarité entre le puits climatique et la ventilation nocturne : le puits permet de disposer d'une ressource de fraîcheur quand l'air extérieur est trop chaud. Dès que la température extérieure redescend, basculer sur le free-cooling permet de maximiser le rafraîchissement des locaux.

Il est rappelé, comme pour le bâtiment de bureau, que l'atteinte d'un niveau de confort jugé satisfaisant est ici permise par la bonne conception initiale du bâtiment, le cumul des actions sur le bâti puis grâce à la mise en place d'un équipement de rafraîchissement.

5.6. Conclusion

Pour conclure, l'avènement du réchauffement climatique nous amène à repenser notre façon de concevoir et de rénover les bâtiments, mais aussi de sensibiliser les occupants sur l'influence de leurs comportements. Dans ce rapport, nous avons pu mettre en avant l'intérêt de l'isolation (double voire triple vitrage, et ITE de préférence à ITI) associée à la surventilation nocturne et aux protections solaires. On recommandera l'ouverture des fenêtres quand il fait plus frais dehors et l'occultation de ces fenêtres, en journée, sur la période estivale. La végétalisation des façades et l'utilisation de puits climatique représentent aussi des solutions pour améliorer le confort estival des bâtiments. Cependant, d'après nos résultats, la végétalisation des façades ne limiterait pas les surchauffes importantes, excepté pour les bâtiments très peu isolés. Beaucoup de ces solutions sont complémentaires et leur utilisation corrélée laisse de l'espoir quant à la possibilité d'avoir un confort acceptable, l'été, malgré des épisodes caniculaires.

Les simulations menées sur les bâtiments tertiaires ont permis de déterminer un ordre de priorité sur les actions de rénovation à mener sur ces bâtiments : il faut agir en priorité sur la protection solaire et une ventilation efficace des locaux. Les revêtements extérieurs (végétalisation, revêtements clairs), le niveau d'inertie et d'isolation de la façade ont une influence plus mesurée.

En agissant sur le bâti, des niveaux de confort satisfaisants peuvent être obtenus pour les fichiers de milieu de siècle. Pour les fichiers de fin de siècle, l'action sur l'enveloppe seule n'est plus suffisante, des systèmes de rafraîchissement actifs doivent être mis en place.

On a constaté que la période estivale se voit de plus en plus rallongée sur le temps, avec des températures constamment plus élevées et qui descendent moins bas la nuit, notamment à Nîmes. La climatisation en zonage thermique avec une source d'électricité renouvelable représenterait, peut-être, une solution alternative pour faire face aux canicules du sud de la France, tout en limitant les répercussions environnementales par rapport à l'usage d'un climatiseur sur plusieurs pièces. Par ailleurs, la climatisation doit être minimisée dans les grandes villes afin de réduire au maximum les phénomènes d'îlots de chaleur qui ne font qu'aggraver les problèmes de hautes températures extérieures en été.

Bien entendu, l'ensemble des impacts environnementaux des solutions qui ont été proposées seront étudiées dans le cadre d'une analyse de cycle de vie. Il est en effet important de connaître quelles sont les émissions CO₂ associées et autres dégradations sur l'environnement. L'aspect économique de ces solutions sera aussi étudié dans le cadre du projet.

Enfin, on peut être amené à élargir cette étude en étudiant les impacts des canicules sur la santé. Une étude de la London School of Hygiene & Tropical Medicine (Armstrong et al. 2010) a élaboré une corrélation linéaire entre les décès dans quelques régions du Royaume-Uni et les hausses de températures. Une autre étude de 2019 parue dans The Lancet Planetary Health estime qu'à l'heure actuelle, 300 000 décès par an serait causé dans le monde en raison de fortes chaleurs. En France, on estime à 19 000 les décès dus à la canicule de 2003. Ces chiffres pourraient malheureusement augmenter considérablement à l'avenir...

6. Analyses de cycle de vie

6.1. Objectifs

Il s'agit de vérifier que les mesures d'adaptation au changement climatique proposées n'entraînent pas d'impacts environnementaux adverses sur le cycle de vie des bâtiments. En effet il faut éviter par exemple que les effets bénéfiques sur la santé liés à la réduction des surchauffes ne soient annihilés par des émissions toxiques liées à la fabrication des produits de construction mis en œuvre.

Le programme de travail est le suivant :

- Collecte de données sur les matériaux et équipements mis en œuvre

L'étude étant réalisée sur un échantillon de bâtiments archétypes, des données génériques seront considérées (par exemple isolation de type laine de verre, polystyrène etc.) et non des données spécifiques à un fabricant particulier. Ces données devront permettre d'évaluer des indicateurs concernant la santé, donc le choix s'orientera plutôt sur une base d'inventaires de cycle de vie détaillés, par exemple ecoinvent.

- Mise en œuvre de l'analyse de cycle de vie

Des variantes pourront être étudiées en ce qui concerne par exemple l'usage de matériaux d'isolation bio-sourcés ou de terre crue pour l'inertie thermique.

Une synthèse sera rédigée afin de préparer la communication et les échanges avec le groupe d'experts externes.

6.2. Méthodologie d'ACV et collecte de données

Dans l'optique de pouvoir quantifier les impacts environnementaux et d'aider à la prise de décision environnementale à diverses échelles, on utilise une méthodologie standardisée et valide scientifiquement. L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation normalisée (ISO 14040 et 14044). Elle permet de prendre en considération l'ensemble du cycle de vie d'un produit, de l'extraction et de l'acquisition de la matière première, à l'utilisation, au traitement en fin de vie et à l'élimination finale des déchets en passant par la production d'énergie et de matière et la fabrication. Grâce à cette méthode, le déplacement de charges environnementales potentielles entre les différentes étapes du cycle de vie ou entre processus particuliers peut être identifié et évité. L'ACV permet donc également de comparer d'un point de vue environnemental, et en ayant défini au préalable les critères, deux systèmes ou variantes ayant la même fonction, avec le service rendu étant égal.

6.2.1. Logiciel utilisé

Les ACV ont été réalisées avec Equer, le module ACV du logiciel Pleiades.

La base de données utilisée par le logiciel EQUER est la base ecoinvent3.4.

6.2.2. Périmètre étudié pour les ACV en rénovation

6.2.2.1. Approche comparative pour les bâtiments tertiaires

En bâtiments tertiaires, puisque l'étude porte sur les impacts environnementaux liés à l'adaptation au changement climatique des bâtiments, une approche comparative entre deux types de modélisations a été adoptée. Afin de comparer deux bâtiments ayant des conditions de confort semblables, le bâtiment qui a fait l'objet d'adaptations « Bâtiment adapté » est comparé au bâtiment de base, non adapté, mais équipé de la climatisation.

Variante	Description	Etape fin de vie des éléments rénovés	Etape construction	Etape rénovation	Etape fin de vie
Bâtiment de base climatisé	Le bâtiment existant non adapté mais équipé d'une climatisation pour maintenir un niveau de confort acceptable dans les conditions météorologiques futures considérées.		Fabrication de la clim	Remplacements réguliers de tous les éléments du bâtiment selon leur DVT	Fin de vie de tous les éléments du bâtiment

Bâtiment adapté	Le bâtiment adapté (plusieurs variantes sont testées), avec mesures d'adaptation sur l'enveloppe et les systèmes	Fin de vie des éléments remplacés	Fabrication des éléments d'adaptation	Remplacements réguliers de tous les éléments du bâtiment selon leur DVT	Fin de vie de tous les éléments du bâtiment
-----------------	--	-----------------------------------	---------------------------------------	---	---

6.2.2.2. Etapes considérées en logement

Pour prendre en compte la fin de vie des éléments remplacés, pour les bâtiments **avant rénovation** (non isolés), dans l'interface « Association du projet », tous les impacts de fabrication sont associés à zéro car la construction des bâtiments, bien antérieure à la réhabilitation et qui ne peut plus être modifiée, n'est pas prise en compte ici. On associe cependant un impact d'élimination des anciennes fenêtres, qui sont déposées lors de la réhabilitation. Par exemple, le tableau ci-dessous correspond à la variante non isolée avec simple vitrage du bâtiment HLM.

Nom	DVT	Fabrication	Elimination
Béton lourd	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
Carreau plâtre 50	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
Défaut	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
Enduit extérieur	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
Enduit plâtre	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
Fenêtre Montreuil	30	Zero MAT - m2	PVC simple vitrage - m2 - incinération
Placoplatre BA 13	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance

Figure 242 : Association des éléments pour la variante non isolée du HLM (Pléiades ACV)

Pour les bâtiments **après rénovation**, pour prendre le même exemple du bâtiment HLM, dans l'interface « Association du projet », tous les impacts de fabrication sont de même associés à zéro, mis à part les éléments nouveaux (fenêtres et isolants) qui sont mis en œuvre lors de la réhabilitation. Aucun impact d'élimination n'a été pris en compte dans ce calcul, car la plupart des impacts ne sont pas liés à la réhabilitation (structure existante). Par exemple, le tableau ci-dessous correspond à la variante isolée avec 10 cm d'isolant (polystyrène expansé pour les murs et polyuréthane pour le toit) avec du double vitrage.

Nom	DVT	Fabrication	Elimination
Béton lourd	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
Carreau plâtre 50	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
Défaut	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
Enduit extérieur	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
Enduit plâtre	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
Fenêtre Montreuil	100	PVC double vitrage	Aucune correspondance
Placoplatre BA 13	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
Polystyrène expansé	100	Polystyrène expansé	Aucune correspondance
Polyuréthane	100	Polyuréthane	Aucune correspondance

Figure 243 : Association des éléments pour une variante isolée du HLM (10cm + DV)

6.2.3. Optimisation multicritère en logements

Pour les logements, l'idée a été d'appliquer une méthodologie d'optimisation multi-critères pour minimiser à la fois les degrés-heures d'inconfort et le coût environnemental des travaux.

Les bâtiments considérés sont les trois bâtiments anciens individuels et collectifs décrits dans le livrable 1 (maison phénix, Haussmannien et HLM). L'objectif est d'évaluer dans un premier temps l'impact des travaux de rénovation, et donc l'impact de fin de vie des éléments déjà présents, ainsi que les impacts de fabrication, au transport et à la mise en œuvre des nouveaux éléments (à savoir les nouvelles fenêtres et isolants). L'utilisation des bâtiments est ensuite modélisée selon les scénarios correspondant à l'étude par simulation thermique dynamique (STD). Une durée d'utilisation de 100 ans est prise en compte.

6.2.4. Choix méthodologiques pour l'étape d'utilisation

La durée de vie du bâtiment prise en compte est de 80 années dans le cas du tertiaire, et de 100 ans pour les logements. Les consommations énergétiques prises en compte sont issues des simulations thermiques dynamique réalisées dans le cadre de la tâche 4.

Dans le cas du tertiaire, le fichier climatique retenu ici est le fichier NULM (Nîmes urbain lointain médian). Puisque l'ACV était réalisée sur 80 ans, il n'était pas raisonnable de retenir le fichier NULE (vague de chaleur extrême). La vague de chaleur

extrême censée se produire en 2100 ne surviendra pas durant les 80 années de l'étude. Une vague de chaleur médiane paraît alors être un bon compromis.

En ce qui concerne les logements, le fichier climatique correspondant à une vague de chaleur médiane à Paris à l'horizon 2100 a été considérée.

Une approche conséquentielle du mix énergétique a été choisie, avec variation horaire du mix énergétique.

6.2.5. Indicateurs environnementaux

Pour les ACV qui vont suivre, 8 indicateurs ont été sélectionnés :

6.2.5.1. Indicateurs midpoint

n°	Indicateur	Méthode	Unité	Source
1	Effet de serre (100 ans) Changement climatique, total	IPCC 2013 : climate change GWP 100a	kg CO ₂ eq.	(IPCC, 2013)
2	Demande cumulative d'énergie Consommation totale d'énergie primaire	CED : fossils and renewables	MJ	(Hischier et al., 2010)
3	Eau utilisée Utilisation nette d'eau douce	données d'inventaire	m ³	Manuel d'utilisation EQUER
4	Déchets produits Déchets éliminés, total	données d'inventaire	Kg	Manuel d'utilisation EQUER
5	Déchets radioactifs Déchets radioactifs éliminés	données d'inventaire	Kg	Manuel d'utilisation EQUER

6.2.5.2. Indicateurs de dommages (endpoints)

n°	Indicateur	Méthode	Unité	Source
6	Épuisement ressources abiotiques Epuisement des ressources minérales et des métaux	CML IA : elements and fossils, ultimate reserve (<i>as recommended by authors</i>)	kg antimoine eq.	(Oers, 2016)
7	Domage à la biodiversité Domage total écosystème, hiérarchiste	Recipe	PDF.m ² .an	(Huijbregts et al., 2016)
8	Domage à la santé Domage total santé humaine, hiérarchiste	Recipe	DALYs	(Huijbregts et al., 2016)

6.2.5.3. Définitions des indicateurs

- **Effet de serre** (t CO₂ eq) : la tonne équivalent CO₂ est une unité introduite par le GIEC, elle permet de mesurer l'effet cumulé des différents gaz à effet de serre sur le forçage radiatif. Les différents gaz à effet de serre ont une capacité d'absorption de l'énergie et une durée de vie différentes. Par exemple, une émission d'une tonne de méthane sur une période de 100 ans correspond à 28 tonnes équivalent CO₂.
- **Demande cumulative d'énergie** (GJ) : elle correspond à la demande totale d'énergie du bâtiment durant l'entièreté de son cycle de vie, exprimée en énergie primaire.
- **Eau utilisée** (m³) : elle correspond aux prélèvements d'eau dans le milieu naturel et prend en compte la totalité du cycle de vie du bâtiment.

- **Déchets produits** (t CO₂ eq) : la quantité de déchets produits durant le cycle de vie du bâtiment est convertie en tonne équivalent CO₂, tous types de déchets confondus.
- **Déchets radioactifs** (dm³) : correspond au volume de déchets radioactifs produits par le bâtiment.
- **Epuisement ressources abiotiques** (kg d'antimoine eq) : les ressources abiotiques sont des ressources non vivantes et qui se trouvent naturellement dans la nature, sans qu'elles ne soient créées ou produites par l'homme. Cet indicateur témoigne de l'appauvrissement de l'environnement en ressources minérales et fossiles. Le calcul est réalisé en fonction des stocks restants et du taux de consommation de l'économie actuelle.

Domage à la biodiversité (PDF.m².an) : Cet indicateur correspond à la fraction d'espèce (PDF pour Potentially Disappeared Fraction of species) qui pourrait disparaître sur un certain territoire (surface en m²) et pendant une certaine durée (exprimée en années), à cause des travaux de rénovations dans la présente étude. Une fraction de 10% potentiellement disparue sur un territoire de 10 m² pendant 10 ans équivaut donc à 1000 PDF.m².an. **Domage à la santé** (DALYs) : le DALY (pour Disability Adjusted Life Years) ou EVCI en français (Espérance de Vie Corrigée de l'Incapacité) correspond au nombre d'années perdues due à la maladie, au handicap ou à une mort précoce. Il correspond ici à l'effet sur la santé des travaux de rénovation.

6.3. Résultats des ACV

6.3.1. Logements

Dans cette partie, nous allons considérer les résultats obtenus pour les bâtiments HLM, Haussmannien ainsi que maison 1950. Pour cela, on décide d'utiliser l'outil Editeur de Pléiades. Le but est de quantifier les impacts ACV liés à la rénovation de ces bâtiments dans un premier temps, et ensuite les impacts liés à l'utilisation après rénovation. On pourra par la suite envisager de rajouter différentes mesures d'adaptation tels que de la végétalisation des façades etc.

6.3.1.1. Hypothèses complémentaires

On considère 5% de surplus de matériaux lors du chantier, qui correspondent aux différentes pertes que l'on peut avoir (chutes, matériaux endommagés...). Le site de production des éléments de rénovation est considéré distant de 100 km, pour pouvoir calculer l'impact lié aux transports des matériaux.

La durée de vie de l'isolation utilisée est considérée identique à celle du bâtiment (100 ans dans le cadre de nos simulations), et les vitrages ont une durée de vie de 30 ans.

☒ Prendre en compte le transport des occupants
☐ Simplifier en considérant tous les matériaux comme des déchets inertes en fin de vie
Surplus de matériaux lors du chantier : 5 %
Durées de Vie Typique par défaut des familles d'élément
Intérieur : Portes 30 ans, Vitrages 30 ans, Revêtements 10 ans
Extérieur : Portes 30 ans, Vitrages 30 ans, Revêtements 10 ans
Global : Equipements 20 ans, Autres ☒ Identique à celle du bâtiment
Distances de transport
Site de production vers chantier : 100 km, Site vers décharge inerte en fin de vie : 20 km

Figure 244: Paramètres du calcul utilisés pour le HLM de Montreuil

6.3.1.2. Bâtiment HLM (Montreuil)

Le premier bâtiment que nous considérons est le logement collectif HLM situé à Montreuil. Les scénarios d'occupation, de température, de puissance dissipée, d'occultation des vitrages et de ventilation sont rigoureusement identiques à ceux considérés dans la simulation thermique (livrable 4).

Impacts de déconstruction des anciens éléments

Afin de rénover le bâtiment en termes d'isolation et de vitrages, il faut d'abord commencer par déposer les vitrages existants (simples vitrages). Ces travaux de déconstruction engendrent des impacts environnementaux. Dans l'interface Pléiades ACV, Association du projet, on sélectionne l'incinération en fin de vie.

Type	Composition	Nom	DVT	Fabrication	Elimination
		Béton lourd	---	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Cerreau plâtre 50	---	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Défauc	---	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Enduit extérieur	---	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Enduit plâtre	---	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Occultation SV	---	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Placoplatre BA 13	---	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		SV	100	Zero MAT - m2	PVC simple vitrage - m2 - incinération

Figure 245 : Fin de vie du vitrage existant pour le HLM de Montreuil

Les impacts en changement climatique total (kgCO₂eq) liés à la déconstruction seule des anciennes fenêtres en simple vitrage (incinération) correspondent à 19 830 kgCO₂eq.

	Impact	Total
Changement climatique, total (kg CO2 eq.)		19 829.56
Épuisement des ressources minérales et des métaux (kg antimoine eq.)		0.01
Consommation totale d'énergie primaire (MJ)		37 917.27
Utilisation nette d'eau douce (m3)		1 030.21
Déchets éliminés, total (kg)		13 957.46
Déchets radioactifs éliminés (kg)		0.17
Domage total écosystème, hiérarchiste (PDF.m².an)		4 576.76
Domage total santé humaine, hiérarchiste (DALY)		0.02

Figure 246 : Impacts de l'élimination du vitrage existant pour le HLM de Montreuil

Impact de construction des nouveaux éléments

Ensuite, il faut estimer l'impact de fabrication et de transport des nouveaux éléments mis en œuvre en rénovation, à savoir le double vitrage (ou triple vitrage dans certaines variantes), et l'isolation.

Pour chaque épaisseur d'isolant que l'on veut calculer (5, 10, 20 et 30 cm), nous créons une variante à l'aide de l'Editeur, puis nous faisons une simulation STD en vue de créer les fichiers adéquats. Puis nous décrivons dans Pléiades ACV, pour chacune des variantes, la fabrication des nouveaux matériaux de rénovation.

Pour la toiture du bâtiment HLM, on considère du polyuréthane ; du polystyrène expansé pour les façades, ainsi que du double vitrage en PVC.

Type	Composition	Nom	DVT	Fabrication	Elimination
		Béton lourd	—	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Carreau plâtre 50	—	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		DV	100	PVC double vitrage	Aucune correspondance
		Défaut	—	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Enduit extérieur	—	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Enduit plâtre	—	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Occultation DV	—	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Pacoplatre SA 13	—	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Polystyrène expansé	100	Polystyrène expansé	Aucune correspondance
		Polyuréthane	100	Polyuréthane	Aucune correspondance

Figure 247 : Fabrication des matériaux de rénovation pour le HLM de Montreuil

Enfin, on lance le calcul, et on obtient les impacts en changement climatique total (kgCO2éq) lié à la fabrication des nouveaux éléments (isolation des façades, de la toiture, le double vitrage). Dans les figures suivantes, il s'agit de polystyrène expansé pour les façades, de polyuréthane pour la toiture, ainsi que du double vitrage en PVC pour les fenêtres (variante 5 cm d'isolation).

	Impact	Total
Changement climatique, total (kg CO2 eq.)		15 937.28
Épuisement des ressources minérales et des métaux (kg antimoine eq.)		0.00
Consommation totale d'énergie primaire (MJ)		347 288.09
Utilisation nette d'eau douce (m3)		754.52
Déchets éliminés, total (kg)		2 311.56
Déchets radioactifs éliminés (kg)		0.14
Domage total écosystème, hiérarchiste (PDF.m².an)		4 352.19
Domage total santé humaine, hiérarchiste (DALY)		0.03

Figure 248 : Impacts de fabrication de 5cm d'isolation pour les façades, pour le HLM de Montreuil

	Impact	Total
Changement climatique, total (kg CO2 eq.)		10 530.24
Épuisement des ressources minérales et des métaux (kg antimoine eq.)		0.01
Consommation totale d'énergie primaire (MJ)		228 093.92
Utilisation nette d'eau douce (m3)		839.58
Déchets éliminés, total (kg)		846.23
Déchets radioactifs éliminés (kg)		0.09
Domage total écosystème, hiérarchiste (PDF.m².an)		3 089.60
Domage total santé humaine, hiérarchiste (DALY)		0.02

Figure 249 - Impacts de fabrication de 5cm d'isolation pour la toiture, pour le HLM de Montreuil

	Impact	Total
Changement climatique, total (kg CO2 eq.)		45 611.72
Épuisement des ressources minérales et des métaux (kg antimoine eq.)		0.14
Consommation totale d'énergie primaire (MJ)		956 192.57
Utilisation nette d'eau douce (m3)		6 042.87
Déchets éliminés, total (kg)		11 790.36
Déchets radioactifs éliminés (kg)		0.89
Domage total écosystème, hiérarchiste (PDF.m².an)		15 482.54
Domage total santé humaine, hiérarchiste (DALY)		0.10

Figure 250 : Impacts de fabrication du double vitrage en PVC, pour le HLM de Montreuil

Impacts de l'incinération du surplus de matériaux

L'impact de l'incinération des 5% de surplus du chantier doit également être pris en compte afin de compléter l'étude.

Connaissant la surface des façades ainsi que de la toiture à isoler (respectivement 3485 m² et 1216 m²), ainsi que l'épaisseur d'isolant, on en déduit le volume total d'isolant utilisé. Dans la bibliothèque du projet, on peut également extraire les caractéristiques des matériaux, et notamment leurs masses volumiques. On peut ainsi obtenir la masse totale d'isolant utilisée par variante.

Par exemple, pour la variante comprenant 5 cm d'isolation les façades, on a :

$$2484 \times 0.05 \times 25 = 3105 \text{ kg d'isolation utilisée}$$

Avec :

- surface façades à isoler : 2484 m²
- épaisseur d'isolant : 0.05 m
- masse volumique du polystyrène expansé : 25 kg/m³

Cette valeur correspond par ailleurs à celle indiquée dans le rapport détaillé, généré par Pléiades ACV. On rajoute donc 5% de cette valeur pour avoir le surplus de polystyrène expansé :

$$3105 \times 0.05 = 155 \text{ kg de surplus d'isolation à incinérer}$$

Une fois cette valeur obtenue, on obtient dans la bibliothèque environnementale de Pléiades ACV la valeur du changement climatique total pour l'incinération du polystyrène :

Indicateurs environnementaux		
Polystyrène - kg - incinération		
Unité	kg	
Procédé	Incinérateur ordures ménagères	
Etape	Elimination	
Catégorie	Matériau	
Indicateur	Unité	Valeur
Changement climatique, total	kg CO2 eq.	3.191115
Changement climatique, biogénique	kg CO2 eq.	0.000022
Changement climatique, fossile	kg CO2 eq.	3.191089
Changement climatique, usage des sols	kg CO2 eq.	0.000004
Acidification aquatique et terrestre	mol H+ eq.	0.000388
Épuisement des ressources	kg PO4 eq.	0.000000

Figure 251 : Changement climatique total (kgCO₂eq) pour l'incinération du polystyrène

Donc le surplus incinéré de polystyrène produit :

$$3.19 \times 155 = 494,45 \text{ kgCO}_2\text{eq}$$

Pour finir, on quantifie cet impact par m² :

$$494/2484 = 0.20 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2.$$

On obtient ainsi l'impact lié à l'incinération du surplus de polystyrène expansé (pour 5 cm d'isolation), pour le bâtiment HLM.

De manière analogue, on calcule l'impact pour l'incinération du surplus de polyuréthane utilisé sur le toit, et on obtient, pour 5 cm d'isolation $285/1215 = 0.23 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$.

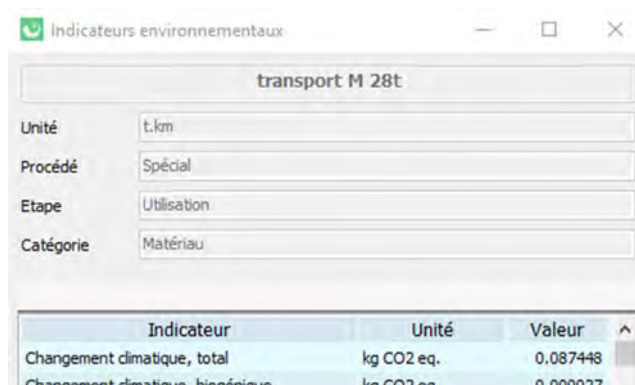
On ne considère pas de surplus pour les vitrages : on suppose qu'il n'y a pas de pertes ni de casse lors du chantier. Ces impacts liés à l'incinération du surplus seront à ajouter aux impacts de déconstruction des anciens éléments et de fabrication des nouveaux éléments, ainsi qu'à ceux liés au transport des matériaux. Les calculs pour les autres variantes suivent rigoureusement la même démarche.

Impacts liés au transport des matériaux

Afin de compléter l'étude des impacts liés aux travaux de rénovation, il nous faut prendre en compte l'impact lié au transport des matériaux.

Pour quantifier l'impact CO₂ lié au transport, pour l'isolation, on considère le poids total transporté : 3,1 tonnes de polystyrène expansé et 2,1 tonnes polyuréthane.

Ensuite, dans la bibliothèque environnementale de Pléiades ACV, on considère le transport de matériaux « transport M 28t ». La valeur du changement climatique total (kgCO₂eq) indiqué est celui qui est produit en transportant une tonne sur un kilomètre (t.km) :



transport M 28t		
Unité	t.km	
Procédé	Spécial	
Etape	Utilisation	
Catégorie	Matériau	
Indicateur	Unité	Valeur
Changement climatique, total	kg CO2 eq.	0.087448
Changement climatique, hiérarchique	kg CO2 eq.	0.000027

Figure 252 : Changement climatique total (kgCO₂eq) pour le transport d'une tonne de matériaux sur 1 km

On réalise donc le calcul suivant pour estimer les impacts liés au transport du polystyrène expansé (pour la variante 5 cm) :

$$3,1 \text{ tonnes} * 0.09 \text{ kgCO}_2\text{eq} = 0.279 \text{ kgCO}_2\text{eq}, \text{ pour 1km parcouru avec le polystyrène}$$

On multiplie par 100, parce qu'on considère que le camion parcourt 100km du lieu de production jusqu'au chantier, et on obtient : **27,9 kgCO₂eq émis pour le transport de polystyrène expansé, sur 100 km.**

Enfin, on divise par la surface totale du mur à isoler, pour se ramener à un impact par mètre carré :

$$27,9/2484 = 0.01 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2, \text{ pour le polystyrène expansé (variante 5cm).}$$

De manière analogue, on calcule l'impact par mètre carré pour l'isolation du toit :

$$18,9/1215 = 0.02 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2, \text{ pour le polyuréthane (variante 5 cm).}$$

Les calculs se font de manière similaire pour toutes les variantes (toutes les épaisseurs d'isolant).

Calculons désormais l'impact lié au transport du double vitrage en PVC. Pour cela, on commence par extraire le poids par mètre carré du double vitrage en PVC, à l'aide encore une fois de la bibliothèque environnementale de Pléiades ACV.

Indicateurs environnementaux		
PVC double vitrage - m2 - décharge		
Unité	m ²	
Procédé	Décharge type II	
Etape	Elimination	
Catégorie	Composant	
Indicateur	Unité	Valeur
Déchets éliminés, total	kg	27.423011

Figure 253 : Poids d'un mètre carré de PVC double vitrage (bibliothèque Pléiades ACV)

On prend donc 27 kg/m² pour le double vitrage en PVC. Sachant que la surface vitrée à remplacer est égale à 1001 m², on a la masse de vitrage à transporter jusqu'au chantier :

$$1001 \times 27 = 27 \text{ tonnes de double vitrage en PVC à transporter jusqu'au chantier}$$

Ensuite, on multiplie comme pour l'isolation par l'impact CO₂ lié au transport de matériaux sur 100 km :

$$27 \times 0.09 \times 100 = 225 \text{ kgCO}_2\text{éq, au total pour le transport du double vitrage en PVC.}$$

Enfin, on divise par la surface totale du vitrage à remplacer, pour se ramener à un impact par mètre carré :

$$225 / 1001 = 0,22 \text{ kgCO}_2\text{éq/m}^2, \text{ pour le transport du double vitrage en PVC.}$$

Ces impacts liés au transport des matériaux sont à ajouter à ceux des parties précédentes, pour avoir enfin l'impact total en kgCO₂éq de la rénovation du bâtiment HLM.

Paramétrage de l'outil "Amapola" pour les fronts de Pareto

L'outil d'optimisation Amapola permet de considérer des critères de performance énergétique, de confort et de coût mais sa version actuelle n'intègre pas l'ACV. Les données de coût en € ont alors été remplacées par des données de coût environnemental. L'indicateur de changement climatique est considéré dans cette étude, mais la démarche pourrait être appliquée à d'autres indicateurs. Tous les calculs effectués dans les § précédents ont été réalisés pour les épaisseurs d'isolation suivantes : 5 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm.

De même, on a décidé de calculer les impacts liés à du double vitrage mais également au triple vitrage, afin de voir si l'un ou l'autre était préférable en termes de réduction des degrés heures d'inconfort (°C.h), tout en considérant leur impact en terme de changement climatique total (kgCO₂éq).

Nous avons vu dans le livrable 4 que le débit de sur-ventilation nocturne influence très fortement le confort d'été : les calculs ont alors été effectués pour une sur-ventilation de 2 vol/h ainsi que de 10 vol/h.

Une fois tous les impacts obtenus, on peut tracer des diagrammes de Pareto afin de mieux visualiser sur deux axes d'une part l'impact des travaux de rénovation (changement climatique total causé par les rénovations, en kgCO₂éq) et d'autre part les degrés heures d'inconfort (°C.h d'inconfort) et ainsi définir un front correspondant aux solutions non dominées. Une solution est dite non dominée si pour le même indicateur en CO₂ il n'existe aucune solution plus confortable (DH moins élevés) et si pour un même niveau de confort (même nombre de DH) il n'existe pas de solution à moindre impact sur le changement climatique.

Pour cela, on utilise l'outil « Amapola » de Pleiades. Chaque jeu de simulations correspond à 5 épaisseurs d'isolant différentes dans les façades, 5 épaisseurs d'isolant différentes sur la toiture, ainsi que 3 types de vitrages différents (simple, double et triple vitrage). Il y a donc 75 points sur les diagrammes de Pareto, correspondant à la combinaison des variantes.

Dans Amapola, on vient rentrer dans les paramètres d'optimisation les coûts en kgCO₂éq/m² pour les façades, la toiture ainsi que les menuiseries (fenêtres). Ces coûts comprennent, pour chacune des variantes (exceptées celles correspondant à 0 cm d'isolation et au simple vitrage qui représentent l'état

initial, donc aucun impact de rénovation) : les impacts de déconstruction (du simple vitrage), les impacts de construction (isolation + vitrages), les impacts liés à l'incinération du surplus (isolation) ainsi que les impacts liés au transport des matériaux (isolation + vitrages). Tous ces impacts sont ramenés au mètre carré.

Systèmes constructifs

Matériaux/éléments

Taille des menuiseries

Menuiseries

Systèmes photovoltaïques

Éclairages

Masques intégrés

Etats de surface

Composition	N°	Type	Composant	Epaiss	Nb cas
☒ Toiture terrasse Montreuil	1	M	Polyuréthane	5.0	5
☐ Toiture terrasse Montreuil	2	M	Béton lourd	20.0	0
☐ Toiture terrasse Montreuil	3	E	Placoplatre BA 13	1.3	0
☐ Refend Montreuil	1	M	Enduit plâtre	1.0	0
☐ Refend Montreuil	2	M	Béton lourd	20.0	0
☐ Refend Montreuil	3	M	Enduit plâtre	1.0	0
☐ Plancher Montreuil	1	M	Béton lourd	20.0	0
☐ Plancher Montreuil	2	M	Enduit plâtre	1.5	0
☐ Mur extérieur Montreuil	1	M	Enduit extérieur	1.5	0
☒ Mur extérieur Montreuil	2	M	Polystyrène expansé	5.0	5
☐ Mur extérieur Montreuil	3	M	Béton lourd	20.0	0
☐ Mur extérieur Montreuil	4	M	Enduit plâtre	1.0	0
☐ Cloison Montreuil	1	E	Carreau plâtre 50	5.0	0

Coût de la composition

0

€/m²

Cas original

Type	Composant	Epaisseur	€/m²
M	Polystyrène expansé	5	0

Nombre de cas simulés

5

Type	Composant	Epaisseur	€/m²
M	Polystyrène expansé	0	0.00
M	Polystyrène expansé	5	4.72
M	Polystyrène expansé	10	9.45
M	Polystyrène expansé	20	18.89
M	Polystyrène expansé	30	28.34

Figure 254 : Paramètres d'optimisation Amapola, pour la simulation des digrammes de Pareto (polystyrène expansé)

Systèmes constructifs

Matériaux/éléments

Taille des menuiseries

Menuiseries

Systèmes photovoltaïques

Éclairages

Masques intégrés

Etats de surface

Composition	N°	Type	Composant	Epaiss	Nb cas
☒ Toiture terrasse Montreuil	1	M	Polyuréthane	5.0	5
☐ Toiture terrasse Montreuil	2	M	Béton lourd	20.0	0
☐ Toiture terrasse Montreuil	3	E	Placoplatre BA 13	1.3	0
☐ Refend Montreuil	1	M	Enduit plâtre	1.0	0
☐ Refend Montreuil	2	M	Béton lourd	20.0	0
☐ Refend Montreuil	3	M	Enduit plâtre	1.0	0
☐ Plancher Montreuil	1	M	Béton lourd	20.0	0
☐ Plancher Montreuil	2	M	Enduit plâtre	1.5	0
☐ Mur extérieur Montreuil	1	M	Enduit extérieur	1.5	0
☒ Mur extérieur Montreuil	2	M	Polystyrène expansé	5.0	5
☐ Mur extérieur Montreuil	3	M	Béton lourd	20.0	0
☐ Mur extérieur Montreuil	4	M	Enduit plâtre	1.0	0
☐ Cloison Montreuil	1	E	Carreau plâtre 50	5.0	0

Coût de la composition

0

€/m²

Cas original

Type	Composant	Epaisseur	€/m²
M	Polyuréthane	5	0

Nombre de cas simulés

5

Type	Composant	Epaisseur	€/m²
M	Polyuréthane	0	0.00
M	Polyuréthane	5	8.95
M	Polyuréthane	10	17.80
M	Polyuréthane	20	35.40
M	Polyuréthane	30	53.50

Figure 255 : Paramètres d'optimisation Amapola, pour la simulation des digrammes de Pareto (polyuréthane).

Systèmes constructifs

Matériaux/éléments

Taille des menuiseries

Menuiseries

Systèmes photovoltaïques

Éclairages

Masques intégrés

Etats de surface

Baie	Nb cas
☐ Fenetre Montreuil	0
☐ SV	1
☐ DV	3
☒ TV	3

☐ Modifier la taille des menuiseries avant d'en changer le type

Cas original

Cas	€/m²
TV	76.92

Nombre de cas simulés

3

Cas	€/m²
SV	0.00
DV	63.42
TV	76.92

Figure 256 : Paramètres d'optimisation Amapola, pour la simulation des digrammes de Pareto (vitrages)

Résultats pour les variantes : polystyrène expansé, polyuréthane, double et triple vitrage, 2 et 10 vol/h

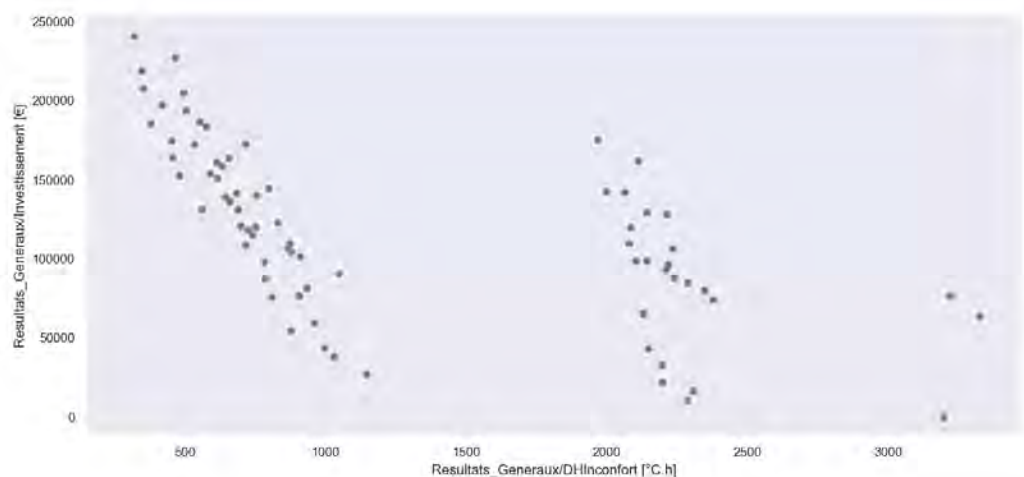


Figure 257 : Front de Pareto pour la variante : polystyrène expansé, polyuréthane, SV/DV/TV, 2 vol/h

Ce front de Pareto peut être lu de droite à gauche : chacun des “paquets” correspond à des cas différents : les 3 points sur le **paquet** de droite correspondent au simple changement de vitrage sans rajouter d’isolation ni sur les façades ni sur la toiture (le point à 0 kgCO₂éq correspond au fait de laisser le simple vitrage et de ne rajouter aucune isolation : cas initial). Ce sont les cas où l’on a le plus de degrés heures d’inconfort (plus de 3000).

Le paquet du milieu correspond au cas suivant : le toit n’est pas isolé ou alors les façades ne sont pas isolées (l’un des deux). Il est intéressant de remarquer (grâce aux coordonnées parallèles de Pleiades Résultats) que c’est l’isolation du toit qui est la plus importante dans la réduction des degrés heures d’inconfort, plus que celle des façades. Ceci est lié au choix de la grandeur à optimiser, les DH correspondant à la zone la plus chaude qui est situés sous la toiture. Enfin, le triple vitrage réduit également les degrés heures d’inconfort.

Le paquet de gauche correspond au cas suivant : le toit comme les façades sont isolés, et les points correspondants au minimum de degrés heures d’inconfort sont ceux qui sont le plus isolés, avec du triple vitrage.

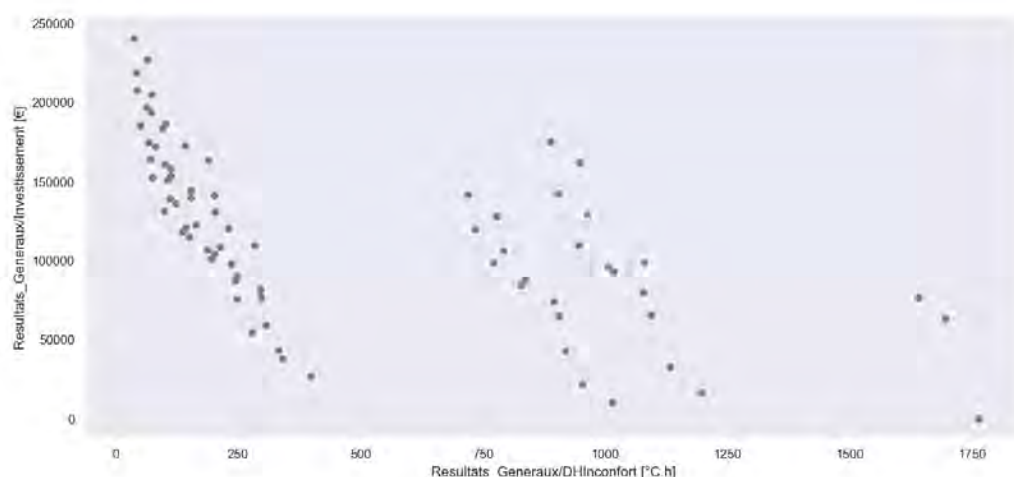


Figure 258 : Front de Pareto pour la variante : polystyrène expansé, polyuréthane, SV/DV/TV, 10 vol/h

Dans le cas où le scénario de ventilation est de 10 vol/h, on remarque qu’il y a une forte réduction des degrés heures d’inconfort (réduction de plus de la moitié pour les paquets du milieu et à gauche). On confirme ainsi que la sur-ventilation nocturne doit être un paramètre primordial sur lequel concentrer les efforts pour combattre les fortes chaleurs.

Le reste de l'analyse est similaire au cas 2vol/h, les paquets correspondants aux mêmes cas, bien que l'on remarque sur le paquet du milieu une plus forte séparation entre l'isolation du toit et des façades (isoler le toit est toujours plus intéressant).

6.3.1.3. Bâtiment Haussmannien (Paris)

Le second bâtiment que nous considérons est un logement collectif de type Haussmannien situé à Paris. Les scénarios d'occupation, de température, de puissance dissipée, d'occultation des vitrages et de ventilation sont rigoureusement identiques à ceux considérés dans le livrable 4.

Impacts de déconstruction des anciens éléments

Afin de rénover le bâtiment en termes d'isolation et de vitrages, il faut d'abord commencer par déposer les vitrages existants (simples vitrages), tout comme dans le cas du HLM de Montreuil. Ces travaux de déconstruction engendrent des impacts environnementaux. Dans l'interface Pléiades ACV, Association du projet, on sélectionne l'incinération en fin de vie.

Type	Composition	Nom	DVT	Fabrication	Elimination
		Bos lourd	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Calcaire ferme	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Carrelage	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Défilé	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Enduit plâtre	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Laine de verre	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Laine d'air > 1.3 cm	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Mortier	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Occultation SV	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Placoplatre BA 13	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Polystyrène expansé	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Porte bois massif	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		SV	100	Zero MAT - m2	PVC simple vitrage - m2 - incinération
		Zinc (générique)	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance

Figure 259 : Fin de vie du vitrage existant pour le bâtiment Haussmannien

Les impacts en changement climatique total (kgCO₂eq) liés à la déconstruction seule des anciennes fenêtres en simple vitrage (incinération) correspondent à 2065 kgCO₂eq.

Impact		Total
Changement climatique, total (kg CO ₂ eq.)		2 065.00
Épuisement des ressources minérales et des métaux (kg antimoine eq.)		0.00
Consommation totale d'énergie primaire (MJ)		3 948.61
Utilisation nette d'eau douce (m ³)		107.28
Déchets éliminés, total (kg)		1 453.50
Déchets radioactifs éliminés (kg)		0.02
Donnages total écosystème, hiérarchiste (PDF.m³.an)		476.61
Donnages total santé humaine, hiérarchiste (DALY)		0.00

Figure 260 : Impacts de l'élimination du vitrage existant pour le bâtiment Haussmannien

Impact de construction des nouveaux éléments

L'impact de fabrication et de transport des nouveaux éléments mis en œuvre en rénovation, à savoir le double vitrage (puis triple vitrage dans certaines variantes), et l'isolation. Pour ce bâtiment uniquement, en raison de l'architecture des bâtiments Haussmannien, nous sommes contraints à isoler par l'intérieur.

Pour chaque épaisseur d'isolant que l'on veut calculer (5, 10, 20 et 30 cm), nous créons une variante à l'aide de l'Editeur, puis nous faisons une simulation STD en vue de créer les fichiers adéquats. Puis nous décrivons dans Pléiades ACV, pour chacune des variantes, la fabrication des nouveaux matériaux de rénovation.

La toiture du bâtiment Haussmannien étant étanche, la laine de verre est utilisée, et du polystyrène expansé pour les façades, ainsi que du double vitrage en PVC (et triple vitrage dans certaines variantes).

Type	Composition	Nom	DVT	Fabrication	Elimination
		Bos lourd	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Calcaire finie	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Cerrage	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		DV	100	PVC double vitrage	Aucune correspondance
		Déaut	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Enduit plâtre	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Laine de verre	100	Laine de verre	Aucune correspondance
		Laine d'air > 1.3 cm	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Mortier	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Occultation DV	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Placoplatre BA 13	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Polystyrène expansé	100	Polystyrène expansé	Aucune correspondance
		Porte bois massif	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Zinc (générique)	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance

Figure 261 : Fabrication des matériaux de rénovation pour le bâtiment Haussmannien

Enfin, on lance le calcul, et on obtient les impacts en changement climatique total (kgCO₂éq) lié à la fabrication des nouveaux éléments (isolation des façades, de la toiture, le double vitrage). Dans les figures suivantes, il s'agit de polystyrène expansé pour les façades, de laine de verre pour la toiture, ainsi que du double vitrage en PVC pour les fenêtres (variante 5 cm d'isolation).

	Impact	Total
Changement climatique, total (kg CO ₂ eq.)		4 196.13
Épuisement des ressources minérales et des métaux (kg antimoine eq.)		0.00
Consommation totale d'énergie primaire (MJ)		91 437.65
Utilisation nette d'eau douce (m ³)		198.66
Déchets éliminés, total (kg)		608.61
Déchets radioactifs éliminés (kg)		0.04
Domage total écosystème, hiérarchiste (PDF.m ² .an)		1 145.89
Domage total santé humaine, hiérarchiste (DALY)		0.01

Figure 262 : Impacts de fabrication de 5cm d'isolation pour les façades, pour bâtiment Haussmannien

	Impact	Total
Changement climatique, total (kg CO ₂ eq.)		327.85
Épuisement des ressources minérales et des métaux (kg antimoine eq.)		0.00
Consommation totale d'énergie primaire (MJ)		7 115.68
Utilisation nette d'eau douce (m ³)		38.54
Déchets éliminés, total (kg)		152.12
Déchets radioactifs éliminés (kg)		0.03
Domage total écosystème, hiérarchiste (PDF.m ² .an)		119.47
Domage total santé humaine, hiérarchiste (DALY)		0.00

Figure 263 : Impacts de fabrication de 5cm d'isolation pour la toiture, pour le bâtiment Haussmannien

	Impact	Total
Changement climatique, total (kg CO ₂ eq.)		4 749.89
Épuisement des ressources minérales et des métaux (kg antimoine eq.)		0.01
Consommation totale d'énergie primaire (MJ)		99 575.52
Utilisation nette d'eau douce (m ³)		629.29
Déchets éliminés, total (kg)		1 227.82
Déchets radioactifs éliminés (kg)		0.09
Domage total écosystème, hiérarchiste (PDF.m ² .an)		1 612.31
Domage total santé humaine, hiérarchiste (DALY)		0.01

Figure 264 : Impacts de fabrication du double vitrage en PVC, pour bâtiment Haussmannien

Impacts de l'incinération du surplus de matériaux

L'impact de l'incinération des 5% de surplus du chantier doit également être pris en compte afin de compléter l'étude.

Dans cette partie, la démarche est identique à celle effectuée pour le HLM de Montreuil : on calcule pour chaque variante la masse d'isolation utilisée (connaissant la surface à isoler, l'épaisseur d'isolant et sa masse volumique). Ensuite on rajoute 5% de surplus et on évalue l'impact de l'incinération (par m²) de ce surplus grâce à la bibliothèque environnementale de Pléiades ACV.

On obtient ainsi par exemple **0,19 kgCO₂éq/m²** pour l'incinération du surplus lié à 5 cm d'isolation des façades, avec du polystyrène expansé.

On ne considère pas de surplus pour les vitrages : on suppose qu'il n'y a pas de pertes ni de casse lors du chantier. Ces impacts liés à l'incinération du surplus seront à ajouter aux impacts de déconstruction des anciens éléments et de fabrication des nouveaux éléments, ainsi qu'à ceux liés au transport des matériaux. Les calculs pour les autres variantes suivent rigoureusement la même démarche.

Systèmes constructifs	Composition	N°	Type	Composant	Epaiss	Nb cas	Coût de la composition	
Matériaux/éléments	☐ Mur extérieur mitoyen Hau	1	M	Calcaire ferme	20.0	0	0	€/m²
Taille des menuiseries	☐ Mur extérieur mitoyen Hau	2	M	Polystyrène expansé	10.0	5		
Menuiseries	☐ Mur extérieur mitoyen Hau	3	M	Enduit plâtre	2.0	0		
Systèmes photovoltaïques	☐ Toiture Hausmann	1	M	Zinc (générique)	0.5	0		
Éclairages	☒ Toiture Hausmann	2	M	Laine de verre	10.0	5		
Masques intégrés	☐ Toiture Hausmann	3	E	Placoplatre BA 13	1.3	0		
Etats de surface	☐ Plancher bas Hausmann	1	M	Mortier	3.0	0		
	☐ Plancher bas Hausmann	2	M	Carrelage	2.0	0		
	☐ Planchers intermédiaires t	1	M	Bois lourd	2.0	0		
	☐ Planchers intermédiaires t	2	M	Mortier	3.0	0		
	☐ Planchers intermédiaires t	3	E	Lame d'air > 1.3 cm	1.5	0		
	☐ Planchers intermédiaires t	4	E	Placoplatre BA 13	1.3	0		
	☐ Cloisons Hausmann	1	E	Placoplatre BA 13	1.3	0		
	☐ Cloisons Hausmann	2	E	Lame d'air > 1.3 cm	1.5	0		
	☐ Cloisons Hausmann	3	E	Placoplatre BA 13	1.3	0		
	☐ Refends intérieur Hausmann	1	M	Enduit plâtre	2.0	0		
	☐ Refends intérieur Hausmann	2	M	Calcaire ferme	20.0	0		
	☐ Refends intérieur Hausmann	3	M	Enduit plâtre	2.0	0		
	☐ Mur extérieur Hausmann	1	M	Calcaire ferme	20.0	0		
	☒ Mur extérieur Hausmann	2	M	Polystyrène expansé	10.0	5		
	☐ Mur extérieur Hausmann	3	M	Enduit plâtre	2.0	0		

Type	Composant	Epaiss	€/m²
M	Laine de verre	10	0

Type	Composant	Epaiss	€/m²
M	Laine de verre	0	0.00
M	Laine de verre	5	1.28
M	Laine de verre	10	2.55
M	Laine de verre	20	5.11
M	Laine de verre	30	7.66

Figure 266 : Paramètres d'optimisation Amapola, pour la simulation des digrammes de Pareto (laine de verre)

Systèmes constructifs	Baie	Nb cas	Cas original	€/m²
Matériaux/éléments	☐ Porte bois massif	0		
Taille des menuiseries	☐ DV	3		
Menuiseries	☒ TV	3	TV	77.02
Systèmes photovoltaïques	☐ SV	1		

Cas	€/m²
SV	0.00
DV	67.75
TV	77.02

Figure 267 : Paramètres d'optimisation Amapola, pour la simulation des digrammes de Pareto (vitrages)

Résultats pour les variantes : polystyrène expansé, polyuréthane, double et triple vitrage, 2 et 10 vol/h

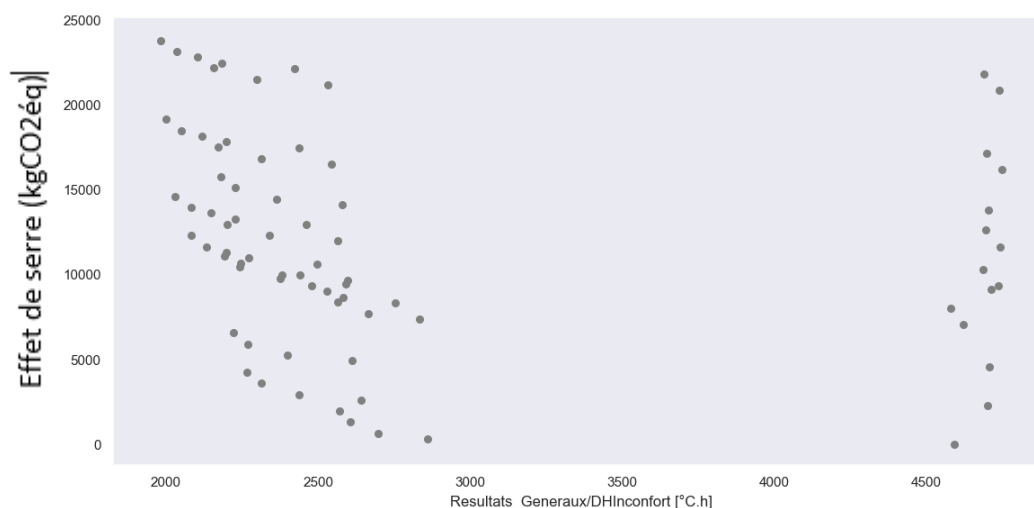


Figure 268 : Front de Pareto pour la variante : laine de verre, polystyrène expansé, SV/DV/TV, 2 vol/h

Ce front de Pareto peut être lu de droite à gauche : chacun des “paquets” correspond à des cas différents : les paquets les plus à droite correspondent aux cas où l’on n’isole pas du tout la toiture, ainsi que certaines combinaisons comprenant double et triple vitrage avec peu d’isolation des façades. Cela montre une nouvelle fois l’importance de l’isolation du toit. Le point à 0 kgCO₂eq correspond au fait de laisser le simple vitrage et de ne rajouter aucune isolation : cas initial. Ce sont les cas où l’on a le plus de degré heures d’inconfort (plus de 4700).

Les paquets de gauche correspondent aux cas suivants : le toit est isolé mais pas les façades (pour les cas avec le plus de DH d’inconfort), ou alors les deux sont isolés. Les cas avec le moins de degrés heures d’inconfort correspondent à ceux avec le plus d’isolation sur la toiture et sur les façades, avec du triple vitrage. On atteint 1993 degré heures d’inconfort dans le meilleur des cas (30 cm d’isolation du toit et des façades, avec du triple vitrage), pour un coût en kgCO₂eq maximal (23 806 kgCO₂eq).

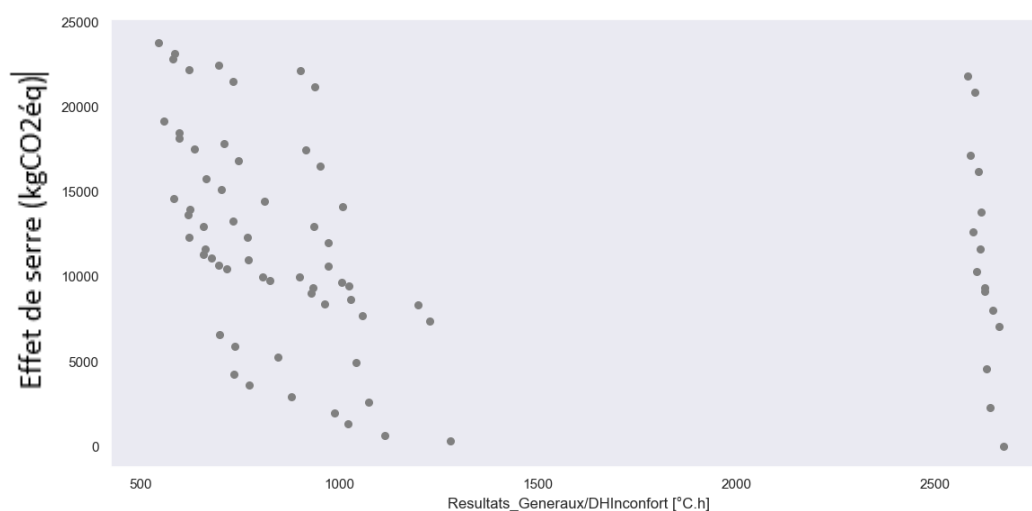


Figure 269 : Front de Pareto pour la variante : laine de verre, polystyrène expansé, SV/DV/TV, 10 vol/h

Dans le cas où le scénario de ventilation est de 10 vol/h, on remarque déjà qu’il y a une forte réduction des degrés heures d’inconfort (réduction de plus de la moitié pour les paquets du milieu et à gauche). On confirme ainsi que la ventilation doit être un paramètre primordial sur lequel concentrer les efforts pour combattre les fortes chaleurs.

Résultats pour les variantes : « ouate de cellulose (toiture et façades), double et triple vitrage, 2 et 10 vol/h »

Une variante a été étudiée en remplaçant la laine de verre par de la ouate de cellulose.

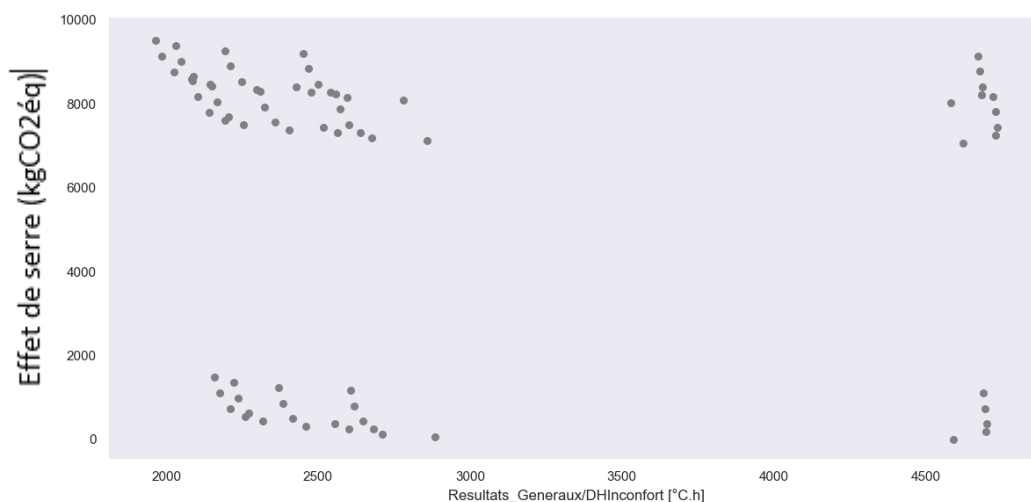


Figure 270 : Front de Pareto pour la variante : ouate de cellulose, SV/DV/TV, 2 vol/h

Tout comme pour le cas du polystyrène expansé et laine de verre, on observe pour la cellulose des paquets distincts. Cependant, étant un matériau biosourcé issu du papier, ce matériau représente un avantage conséquent en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, comme on peut le voir en échelle des ordonnées, comparé au cas du polystyrène expansé et laine de verre (impact beaucoup plus faible en terme de kgCO₂eq).

Les paquets correspondent de la même manière respectivement de droite à gauche à : pas d'isolation sur la toiture et peu sur les façades, et sur les paquets de gauche les multiples combinaisons suivantes : le toit est isolé mais pas les façades (pour les cas avec le plus de DH d'inconfort), ou alors les deux sont isolés. Les cas avec le moins de degrés heures d'inconfort correspondent à ceux avec le plus d'isolation sur la toiture et sur les façades, avec du triple vitrage. On atteint 1965 degré-heures d'inconfort dans le meilleur des cas (30 cm d'isolation du toit et des façades, avec du triple vitrage), pour un coût en kgCO₂eq maximal (9508 kgCO₂eq).

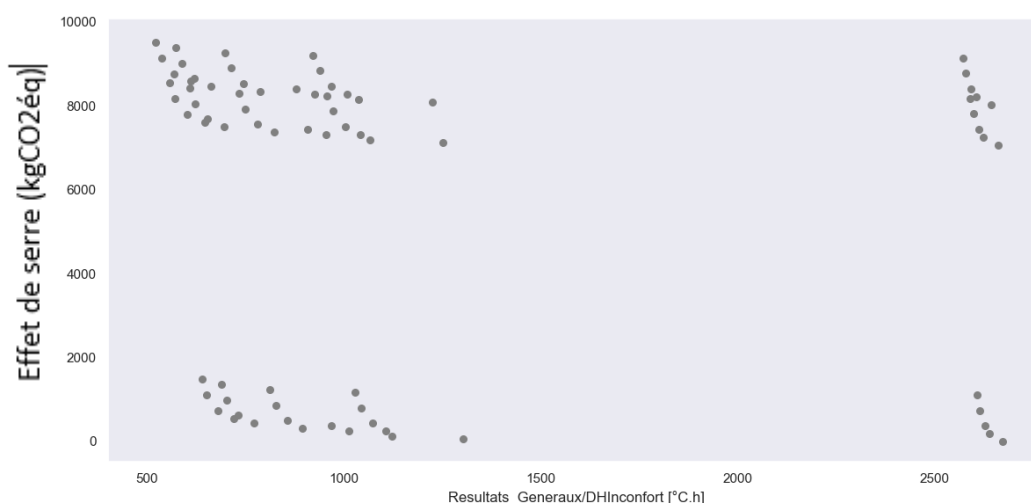


Figure 271 : Front de Pareto pour la variante : ouate de cellulose, SV/DV/TV, 10 vol/h

Dans le cas où le scénario de ventilation est de 10 vol/h, on remarque déjà qu'il y a une forte réduction des degrés heures d'inconfort (réduction de plus de la moitié pour les paquets du milieu et à gauche, voire une division des DH d'inconfort par quatre). On confirme ainsi que la ventilation doit être un paramètre primordial sur lequel concentrer les efforts pour combattre les fortes chaleurs.

Le reste de l'analyse est similaire au cas 2vol/h, les paquets correspondants aux mêmes cas. On atteint 522 degré-heures d'inconfort pour un coût de 9508 kgCO₂eq dans le meilleur des cas, qui correspond à l'isolation des façades et de la toiture avec 30 cm d'isolant, et du triple vitrage.

6.3.1.4. Maison Phénix (années 50)

Le troisième bâtiment que nous considérons est un logement individuel : il s'agit d'une maison Phénix (années 50) située en région parisienne. Les scénarios d'occupation, de température, de puissance dissipée, d'occultation des vitrages et de ventilation sont identiques à ceux considérés dans le livrable 4.

Impacts de déconstruction des anciens éléments

Afin de rénover le bâtiment en termes d'isolation et de vitrages, il faut d'abord commencer par déposer les vitrages existants (simples vitrages), tout comme dans le cas du HLM de Montreuil, et du bâtiment Haussmannien. Ces travaux de déconstruction engendrent des impacts environnementaux. Dans l'interface Pléiades ACV, Association du projet, on sélectionne l'incinération en fin de vie.

Type	Composition	Nom	DVT	Fabrication	Elimination
		Ardosse	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Béton lourd	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Béton PHENIX	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Défaut	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Enduit extérieur	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Fen SV	100	Zero MAT - m2	PVC simple vitrage - m2 - incinération
		Laine de verre	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Laine d'air > 1.3 cm	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Occultation Fen SV	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Parpaing de 20	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Placoplatre BA 10	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Placoplatre BA 13	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Pierre courant	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Polystyrène expansé	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Porte bois extérieure	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Porte bois intérieure	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Terre sèche	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance

Figure 272 : Fin de vie du vitrage existant pour la maison Phénix

Les impacts en changement climatique total (kgCO₂eq) liés à la déconstruction seule des anciennes fenêtres en simple vitrage (incinération) correspondent à 245 kgCO₂eq.

	Impact	Total
Changement climatique, total (kg CO2 eq.)		244.46
Épuisement des ressources minérales et des métaux (kg antimoine eq.)		0.00
Consommation totale d'énergie primaire (MJ)		467.45
Utilisation nette d'eau douce (m3)		12.70
Déchets éliminés, total (kg)		172.07
Déchets radioactifs éliminés (kg)		0.00
Domage total écosystème, hiérarchiste (PDF.m².an)		56.42
Domage total santé humaine, hiérarchiste (DALY)		0.00

Figure 273 : Impacts de l'élimination du vitrage existant pour la maison Phénix

Impact de construction des nouveaux éléments

Ensuite, comme pour les deux bâtiments précédents, il faut estimer l'impact de fabrication et de transport des nouveaux éléments mis en œuvre en rénovation, à savoir le double vitrage (puis triple vitrage dans certaines variantes), et l'isolation. Pour ce bâtiment, l'isolation thermique est faite par l'extérieure (ITE).

Pour chaque épaisseur d'isolant que l'on veut calculer (5, 10, 20 et 30 cm), nous créons une variante à l'aide de l'Editeur, puis nous faisons une simulation STD en vue de créer les fichiers adéquats. Puis nous décrivons dans Pléiades ACV, pour chacune des variantes, la fabrication des nouveaux matériaux de rénovation.

La toiture de la maison Phénix étant étanche, de la laine de verre est utilisée dans les combles et du polystyrène expansé pour les façades, ainsi que du double vitrage en PVC (et triple vitrage dans certaines variantes).

Type	Composition	Nom	DVT	Fabrication	Elimination
		Ardaise	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Béton lourd	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Béton PHEND	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Zéolite	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Enduit extérieur	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Fin DV	100	PVC double vitrage	Aucune correspondance
		Laine de verre	100	Laine de verre	Aucune correspondance
		Laine d'air > 1.3 cm	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Occlusion Fen DV	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Parpaing de 20	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Placoplatre BA 10	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Placoplatre BA 13	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Plâtre courant	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Polystyrène expansé	100	Polystyrène expansé	Aucune correspondance
		Porte bois extérieure	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Porte bois intérieure	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance
		Terre sèche	--	Aucune correspondance	Aucune correspondance

Figure 274 : Fabrication des matériaux de rénovation pour la maison Phénix

Enfin, comme pour les autres bâtiments, on lance le calcul, et on obtient les impacts en changement climatique total (kgCO₂éq) lié à la fabrication des nouveaux éléments (isolation des façades, de la toiture, le double vitrage). Dans les figures suivantes, il s'agit de polystyrène expansé pour les façades, de laine de verre pour la toiture, ainsi que du double vitrage en PVC pour les fenêtres (variante 5 cm d'isolation).

	Impact	Total
Changement climatique, total (kg CO ₂ eq.)		672.36
Épuisement des ressources minérales et des métaux (kg antimoine eq.)		0.00
Consommation totale d'énergie primaire (MJ)		14 651.26
Utilisation nette d'eau douce (m ³)		31.83
Déchets éliminés, total (kg)		97.52
Déchets radioactifs éliminés (kg)		0.01
Domage total écosystème, hiérarchiste (PDF.m ² .an)		183.61
Domage total santé humaine, hiérarchiste (DALY)		0.00

Figure 275 : Impacts de fabrication de 5cm d'isolation pour les façades, la maison Phénix

	Impact	Total
Changement climatique, total (kg CO ₂ eq.)		108.75
Épuisement des ressources minérales et des métaux (kg antimoine eq.)		0.00
Consommation totale d'énergie primaire (MJ)		2 360.27
Utilisation nette d'eau douce (m ³)		12.78
Déchets éliminés, total (kg)		50.46
Déchets radioactifs éliminés (kg)		0.01
Domage total écosystème, hiérarchiste (PDF.m ² .an)		39.63
Domage total santé humaine, hiérarchiste (DALY)		0.00

Figure 276 : Impacts de fabrication de 5cm d'isolation pour la toiture, pour la maison Phénix

	Impact	Total
Changement climatique, total (kg CO ₂ eq.)		562.31
Épuisement des ressources minérales et des métaux (kg antimoine eq.)		0.00
Consommation totale d'énergie primaire (MJ)		11 788.04
Utilisation nette d'eau douce (m ³)		74.50
Déchets éliminés, total (kg)		145.35
Déchets radioactifs éliminés (kg)		0.01
Domage total écosystème, hiérarchiste (PDF.m ² .an)		190.87
Domage total santé humaine, hiérarchiste (DALY)		0.00

Figure 277 : Impacts de fabrication du double vitrage en PVC, pour la maison Phénix

Impacts de l'incinération du surplus de matériaux

L'impact de l'incinération des 5% de surplus du chantier doit également être pris en compte afin de compléter l'étude.

Dans cette partie, la démarche est identique à celle effectuée pour le HLM de Montreuil et le bâtiment Haussmannien : on calcule pour chaque variante la masse d'isolation utilisée (connaissant la surface à isoler, l'épaisseur d'isolant et sa masse volumique). Ensuite on rajoute 5% de surplus et on évalue l'impact de l'incinération (par m²) de ce surplus grâce à la bibliothèque environnementale de Pléiades ACV.

On obtient ainsi par exemple **0,21 kgCO₂éq/m²** pour l'incinération du surplus lié à 5 cm d'isolation des façades, avec du polystyrène expansé.

On ne considère pas de surplus pour les vitrages : on suppose qu'il n'y a pas de pertes ni de casse lors du chantier, comme pour les autres bâtiments. Ces impacts liés à l'incinération du surplus seront à ajouter aux impacts de déconstruction des anciens éléments et de fabrication des nouveaux éléments, ainsi qu'à ceux liés au transports des matériaux. Les calculs pour les autres variantes suivent rigoureusement la même démarche.

Impacts liés au transport des matériaux

Afin de compléter l'étude des impacts liés aux travaux de rénovation, il nous faut prendre en compte, encore une fois, l'impact lié au transport des matériaux.

Dans cette partie, la démarche est identique à celle effectuée pour le HLM de Montreuil et le bâtiment Haussmannien : on considère la masse totale transportée, ensuite dans la bibliothèque environnementale de Pléiades ACV, on considère le transport de matériaux « transport M 28t » (impact pour le transport d'une tonne de matériaux sur 1 km). On multiplie ainsi la masse d'isolant ou de vitrage par cette valeur, puis par le nombre de km parcourus depuis l'usine jusqu'au chantier (ici 100 km par défaut).

On ramène enfin les impacts par m². On obtient ainsi par exemple **0.01 kgCO₂eq/m²** émis pour le transport du polystyrène expansé (variante 5cm).

Ces impacts liés au transport des matériaux sont à ajouter à ceux des parties précédentes, pour avoir enfin l'impact total en kgCO₂eq de la rénovation de la maison Phénix. Les calculs pour les autres variantes suivent rigoureusement la même démarche.

Paramétrage de l'outil "Amapola" pour les fronts de Pareto

La méthode est identique à celle utilisée pour les deux bâtiments précédents. Une variante avec de la ouate de cellulose au lieu de polystyrène a été étudiée. On obtient ainsi pour la maison Phénix :

The screenshot shows the Amapola software interface. On the left, a sidebar lists various construction systems: Systèmes constructifs, Matériaux/éléments (selected), Taille des menuiseries, Menuiseries, Systèmes photovoltaïques, Éclairages, Masques intégrés, and Etats de surface. The main area is divided into two panels. The left panel, titled 'Composition', lists various construction components with checkboxes, N° (1-4), Type (M for Mur, E for Enduit), Composant (e.g., Plâtre courant, Ardoise, Placoplatre BA 13, Enduit extérieur, Béton PHENIX, Béton lourd, Laine de verre, Parpaing, Terre sèche), Epais (thickness in cm), and Nb cas (number of cases). The right panel, titled 'Coût de la composition', shows the cost in €/m². It includes a 'Cas original' section with a table of Type, Composant, Epaisseur, and €/m². Below this, there is a 'Nombre de cas simulés' field set to 5, and another table showing the results of the simulation for different thicknesses of expanded polystyrene (Polystyrène expansé) insulation.

Type	Composant	Epaisseur	€/m²
M	Polystyrène expansé	0	0.00
M	Polystyrène expansé	5	6.45
M	Polystyrène expansé	10	12.90
M	Polystyrène expansé	20	25.81
M	Polystyrène expansé	30	38.71

Figure 278 : Paramètres d'optimisation Amapola, pour la simulation des digrammes de Pareto (polystyrène expansé)

The screenshot shows the Amapola software interface, similar to the previous one, but with the 'Laine de verre' (glass wool) variant selected. The 'Composition' panel shows the same list of components, but the 'Nb cas' for 'Laine de verre' is now 5. The 'Coût de la composition' panel shows the 'Cas original' table with 'Laine de verre' as the selected component. Below it, the 'Nombre de cas simulés' is set to 5, and the results table shows the cost in €/m² for different thicknesses of glass wool insulation.

Type	Composant	Epaisseur	€/m²
M	Laine de verre	0	0.00
M	Laine de verre	5	1.28
M	Laine de verre	10	2.55
M	Laine de verre	20	5.11
M	Laine de verre	30	7.66

Figure 279 : Paramètres d'optimisation Amapola, pour la simulation des digrammes de Pareto (laine de verre)

Systèmes constructifs	Baie	Nb cas
Matériaux/éléments	☐ Porte bois extérieure	0
Taille des menuiseries	☐ Porte bois intérieure	0
Menuiseries	☐ Fen SV	3
Systèmes photovoltaïques	☒ Fen TV	3
Éclairages	☐ Fen DV	0
Masques intégrés		
Etats de surface		

Cas original	
☐ Modifier la taille des m	
Cas	€/m ²
Fen TV	73.03
Nombre de cas simulés	3
Cas	€/m ²
Fen SV	0.00
Fen DV	62.35
Fen TV	73.03

Figure 280 : Paramètres d'optimisation Amapola, pour la simulation des digrammes de Pareto (vitrages)

Systèmes constructifs	Composition	N°	Type	Composant	Epaiss	Nb cas
Matériaux/éléments	☐ Cloison légère plâtre	1	M	Plâtre courant	5.0	0
Taille des menuiseries	☐ Toit incliné en ardoise	1	M	Ardoise	1.0	0
Menuiseries	☐ Toit incliné en ardoise	2	E	Lame d'air > 1.3 cm	1.5	0
Systèmes photovoltaïques	☐ Toit incliné en ardoise	3	E	Placoplatre BA 13	1.3	0
Éclairages	☐ St-F Mur extérieur partie F	1	M	Enduit extérieur	1.0	0
Masques intégrés	☒ St-F Mur extérieur partie F	2	M	Ouate de cellulose	5.0	5
Etats de surface	☐ St-F Mur extérieur partie F	3	M	Béton PHENIX	4.5	0
	☐ St-F Mur extérieur partie F	4	E	Placoplatre BA 10	1.0	0
	☐ Phenix Plancher	1	M	Béton lourd	8.0	0
	☒ St Fargeau Plafond 4 cm	1	M	Ouate de cellulose	5.0	5
	☐ St Fargeau Plafond 4 cm	2	E	Placoplatre BA 10	1.0	0
	☐ Parpaing	1	M	Enduit extérieur	2.0	0
	☐ Parpaing	2	E	Parpaing de 20	20.0	0
	☐ Parpaing	3	E	Placoplatre BA 13	1.3	0
	☐ Plancher 1m Terre sèche	1	M	Terre sèche	100.0	0

Coût de la composition	
	0 €/m ²
Cas original	
Type	Composant
M	Polystyrène expansé
Epaisseur	5
€/m ²	0
Nombre de cas simulés	5
Type	Composant
M	Ouate de cellulose
Epaisseur	0
€/m ²	0.00
M	Ouate de cellulose
Epaisseur	5
€/m ²	0.24
M	Ouate de cellulose
Epaisseur	10
€/m ²	0.48
M	Ouate de cellulose
Epaisseur	20
€/m ²	0.96
M	Ouate de cellulose
Epaisseur	30
€/m ²	1.44

Figure 281 : Paramètres d'optimisation Amapola, pour la simulation des digrammes de Pareto (cellulose façades)

Systèmes constructifs	Composition	N°	Type	Composant	Epaiss	Nb cas
Matériaux/éléments	☐ Cloison légère plâtre	1	M	Plâtre courant	5.0	0
Taille des menuiseries	☐ Toit incliné en ardoise	1	M	Ardoise	1.0	0
Menuiseries	☐ Toit incliné en ardoise	2	E	Lame d'air > 1.3 cm	1.5	0
Systèmes photovoltaïques	☐ Toit incliné en ardoise	3	E	Placoplatre BA 13	1.3	0
Éclairages	☐ St-F Mur extérieur partie F	1	M	Enduit extérieur	1.0	0
Masques intégrés	☒ St-F Mur extérieur partie F	2	M	Ouate de cellulose	5.0	5
Etats de surface	☐ St-F Mur extérieur partie F	3	M	Béton PHENIX	4.5	0
	☐ St-F Mur extérieur partie F	4	E	Placoplatre BA 10	1.0	0
	☐ Phenix Plancher	1	M	Béton lourd	8.0	0
	☒ St Fargeau Plafond 4 cm	1	M	Ouate de cellulose	5.0	5
	☐ St Fargeau Plafond 4 cm	2	E	Placoplatre BA 10	1.0	0
	☐ Parpaing	1	M	Enduit extérieur	2.0	0
	☐ Parpaing	2	E	Parpaing de 20	20.0	0
	☐ Parpaing	3	E	Placoplatre BA 13	1.3	0
	☐ Plancher 1m Terre sèche	1	M	Terre sèche	100.0	0

Coût de la composition	
	0 €/m ²
Cas original	
Type	Composant
M	Laine de verre
Epaisseur	5
€/m ²	0
Nombre de cas simulés	5
Type	Composant
M	Ouate de cellulose
Epaisseur	0
€/m ²	0.00
M	Ouate de cellulose
Epaisseur	5
€/m ²	0.24
M	Ouate de cellulose
Epaisseur	10
€/m ²	0.48
M	Ouate de cellulose
Epaisseur	20
€/m ²	0.96
M	Ouate de cellulose
Epaisseur	30
€/m ²	1.44

Figure 282 : Paramètres d'optimisation Amapola, pour la simulation des digrammes de Pareto (cellulose toiture)

Résultats pour les variantes : polystyrène expansé, polyuréthane, double et triple vitrage, 2 et 10 vol/h

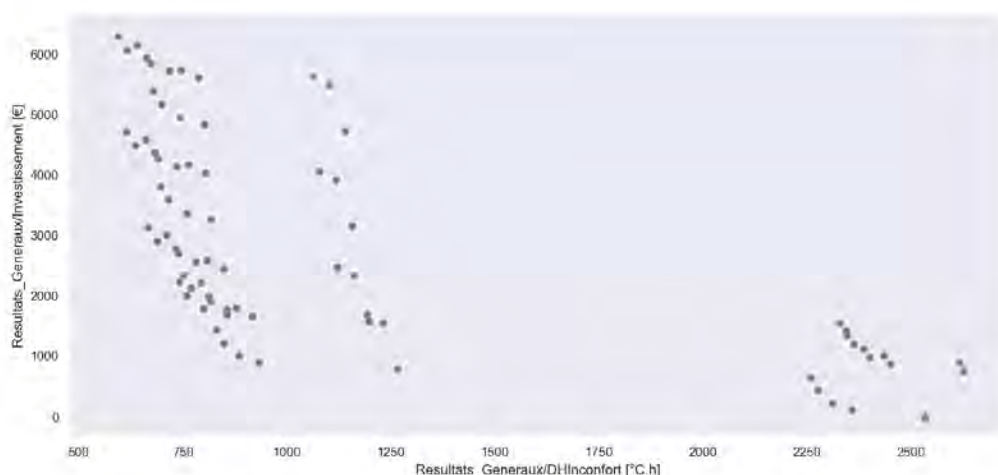


Figure 283 : Front de Pareto pour la variante : polystyrène expansé, laine de verre, SV/DV/TV, 2 vol/h

Ce front de Pareto peut être lu de droite à gauche : chacun des “paquets” correspond à des cas différents : les trois points les plus à droite correspondent aux simples changements de vitrage sans rajouter d’isolation ni sur les façades ni sur la toiture (le point à 0 kgCO₂éq correspond au fait de laisser le simple vitrage et de ne rajouter aucune isolation : cas initial). Ce sont les cas où l’on a le plus de degré heures d’inconfort (plus de 2500). Il est intéressant de remarquer que rénover simplement le vitrage en mettant du double ou triple vitrage au lieu du simple vitrage produit plus de degré heures d’inconfort que le cas initial.

Le paquet du milieu correspond au cas suivant : le toit n’est pas isolé ou alors les façades ne sont pas isolées (l’un des deux). Il est intéressant de remarquer (grâce aux coordonnées parallèles de Pléiades Résultats) que c’est l’isolation des façades qui est la plus importante dans la réduction des degrés heures d’inconfort, plus que celle de la toiture, dans ce cas (contrairement au HLM où on a pu constater l’inverse). Ceci est dû à la composition de la toiture, qui comporte avant rénovation déjà une lame d’air entre la toiture et le plafond et qui agit comme isolant. Mais surtout, la grandeur d’intérêt est le nombre de DH de l’ensemble du bâtiment, et pas seulement de la zone la plus chaude sous la toiture. Enfin, le triple vitrage réduit également les degrés heures d’inconfort dans le cas où il y a une isolation du toit ou des façades.

Le paquet de gauche correspond au cas suivant : le toit comme les façades sont isolés, et les points correspondants au minimum de degré heures d’inconfort sont ceux qui sont le plus isolés, avec du triple vitrage. On atteint 594 degré-heures d’inconfort dans le meilleur des cas (30 cm d’isolation du toit et des façades, avec du triple vitrage), pour un coût en kgCO₂éq maximal (6291 kgCO₂éq).

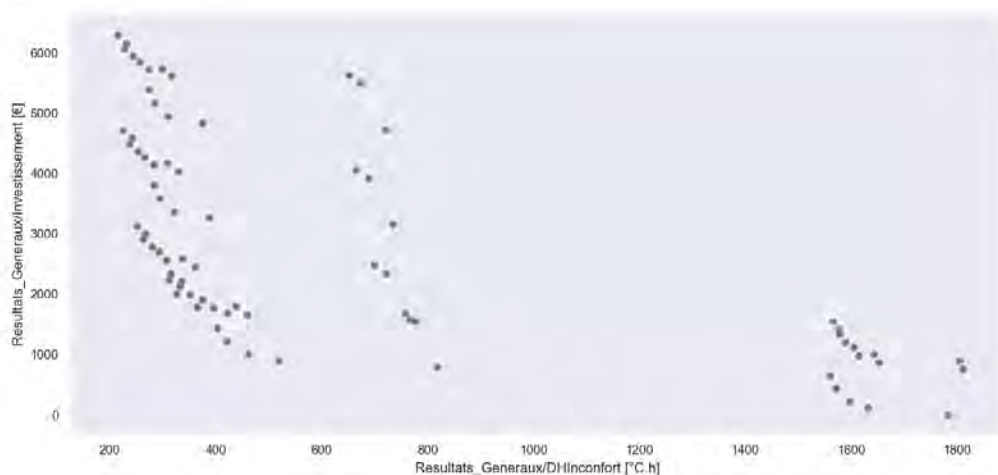


Figure 284 : Front de Pareto pour la variante : polystyrène expansé, laine de verre, SV/DV/TV, 10 vol/h

Dans le cas où le scénario de ventilation est de 10 vol/h, on remarque déjà qu'il y a une forte réduction des degrés heures d'inconfort (réduction de plus de la moitié pour les paquets du milieu et à gauche). On confirme ainsi que la ventilation doit être un paramètre primordial sur lequel concentrer les efforts pour combattre les fortes chaleurs.

Le reste de l'analyse est similaire au cas 2vol/h, les paquets correspondants aux mêmes cas (isoler les façades est toujours plus intéressant dans un premier temps). On atteint un peu plus de 200 degré heures d'inconfort pour le coût maximal en kgCO₂éq (6291 kgCO₂éq, qui correspond au même cas d'isolation et triple vitrage que pour le scénario à 2 vol/h).

Résultats pour les variantes : « ouate de cellulose (toiture et façades), double et triple vitrage, 2 et 10 vol/h »

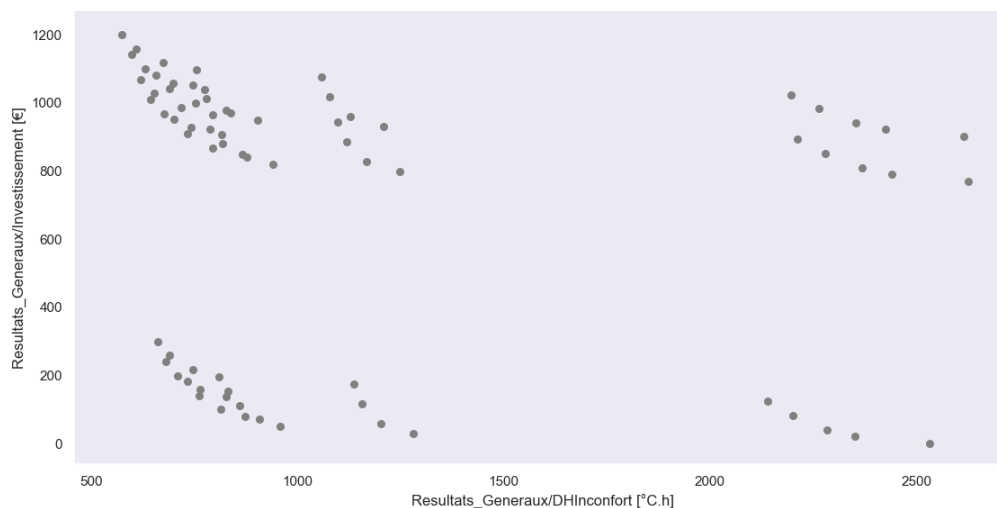


Figure 285 : Front de Pareto pour la variante : ouate de cellulose, SV/DV/TV, 2 vol/h

Tout comme pour le cas du polystyrène expansé et laine de verre, on observe pour la cellulose des paquets distincts. Cependant, étant un matériau biosourcé issu du papier, ce matériau représente un avantage conséquent en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, comme on peut le voir en échelle des ordonnées, comparé au cas du polystyrène expansé et laine de verre (impact beaucoup plus faible en termes de kgCO₂éq). Cette baisse reste toutefois limitée par rapport aux émissions sur le cycle de vie complet du bâtiment.

Les paquets correspondent de la même manière respectivement de droite à gauche à : pas d'isolation (changement de vitrages uniquement), isolation du toit ou des façades uniquement, et isolation des deux.

Les optimums correspondent encore une fois à l'isolation du toit et des façades et à l'utilisation du double ou triple vitrage.

On atteint 574 degré-heures d'inconfort pour un coût de 1201 kgCO₂éq dans le meilleur des cas, qui correspond à l'isolation des façades et de la toiture avec 30 cm d'isolant, et du triple vitrage.

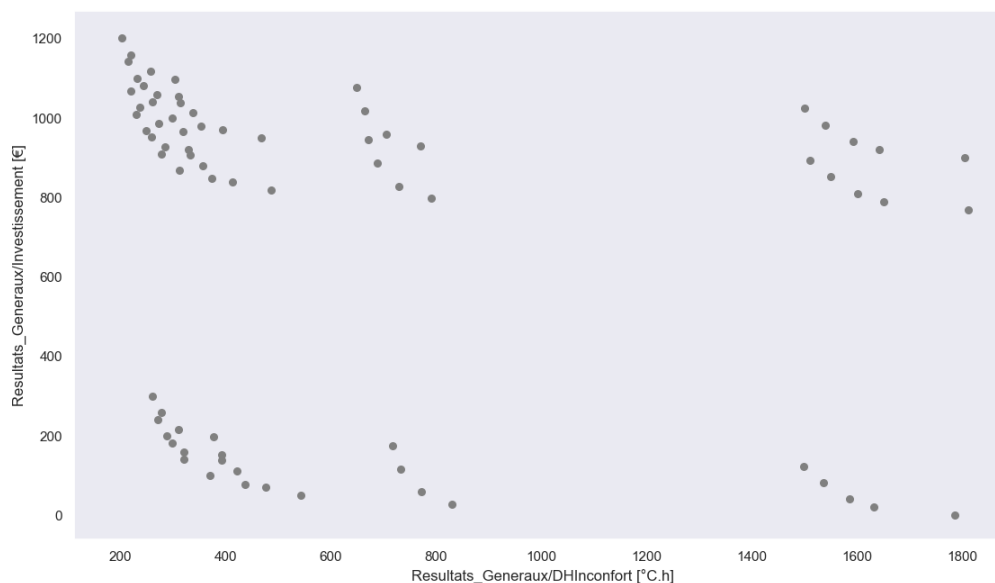


Figure 286 : Front de Pareto pour la variante : ouate de cellulose, SV/DV/TV, 10 vol/h

Dans le cas où le scénario de ventilation est de 10 vol/h, on remarque déjà qu'il y a une forte réduction des degrés heures d'inconfort (réduction de plus de la moitié pour les paquets du milieu et à gauche). On confirme ainsi que la ventilation doit être un paramètre primordial sur lequel concentrer les efforts pour combattre les fortes chaleurs.

Le reste de l'analyse est similaire au cas 2vol/h, les paquets correspondants aux mêmes cas. On atteint 203 degré-heures d'inconfort pour un coût de 1201 kgCO₂éq dans le meilleur des cas, qui correspond à l'isolation des façades et de la toiture avec 30 cm d'isolant, et du triple vitrage.

6.3.1.5.ACV des variantes optimales

La partie précédente nous a permis de mettre en lumière plusieurs éléments : premièrement, adopter un débit de sur-ventilation de 10 vol/h est beaucoup plus intéressant en termes de réduction des degrés-heures d'inconfort (c'est ce qu'on a entre autre constaté sur les diagrammes de Pareto) ; et deuxièmement grâce à ces combinaisons de simulations, on peut désormais trouver quelles sont les « variantes optimales » d'un point de vue degrés-heures d'inconfort et impact CO₂.

Pour cela, on utilise l'outil « coordonnées parallèles » de Pléiades Résultats : cet outil nous permet d'analyser plus quantitativement les diagrammes, et de voir directement quelle quantité de CO₂ est requise pour une certaine variante donnée, et le nombre de degrés-heures d'inconfort associé. En d'autres termes, on peut trouver le meilleur compromis entre la quantité de CO₂ émise et le nombre de degrés-heures, selon les exigences.

Dans notre cas, on se base sur la réglementation RE2020 : en effet, c'est cette réglementation qui a introduit les degrés-heures en tant que nouvelle exigence pour améliorer le confort d'été. Pour qu'un bâtiment résidentiel soit dans les normes et jugé confortable par la RE2020, il faut moins de 350 degrés-heures d'inconfort par an. Ce seuil correspond à un dépassement d'un degré de la limite de confort pendant de 2 semaines. Au-delà de ce seuil, la réglementation considère que le bâtiment présentera un inconfort probable.

Nous allons maintenant utiliser les résultats générés par la partie précédente afin de cette fois-ci quantifier les impacts CO₂ liés à l'utilisation des bâtiments.

La première étape consisterait, pour chaque bâtiment, à prélever dans les données générées les variantes en 10 vol/h qui respectent la réglementation (moins de 350 DH d'inconfort) avec le moins de CO₂ émis pour la construction. Cela permettrait en théorie de minimiser les coûts CO₂ liés à la construction, et donc le coût en CO₂ global (construction + utilisation + rénovation + déconstruction). Cependant lors de l'analyse, il s'est avéré que ces variantes « optimales » sont parfois performantes en été seulement, car elles ne comprennent qu'assez peu d'isolation sur les façades et/ou la toiture. La ventilation de 10 vol/h permet donc souvent d'isoler assez peu pour assurer le confort d'été.

Cependant, si on choisit de mettre trop peu d'isolation, on peut se confronter à certains problèmes lors de l'hiver : l'économie en CO₂ réalisée en isolant assez peu sera largement compensée par les coûts en

CO2 liés aux besoins de chauffage en hiver, car il y aura trop de déperditions thermiques via les façades et toitures.

C'est pourquoi il a été décidé de sélectionner et de comparer les variantes « optimales en été » (en orange) avec des variantes « optimales sur toute l'année » (en vert). Ces dernières sont simplement issues des données générées, mais en prenant en compte le fait qu'il faut assez isoler pour l'hiver, tout en restant réaliste et raisonnable sur les quantités d'isolation et sur les degrés-heures (car il faut également prendre en compte le coût de l'isolation, cf le livrable 6 du projet Résilience).

VARIANTES OPTIMALES				
HLM MONTREUIL (scénario) :	DH d'inconfort (C°.h)	kgCO2eq	Composition toiture	Composition façades Type vitrage
A) 10 vol/h bon en été	248,67	86 065	Polyuréthane (05cm)	Polystyrène expansé (05cm) DV
B) 10 vol/h bon en été	143,37	24 858	Polyuréthane (05cm)	Ouate de cellulose (30cm) DV
C) 10 vol/h optimal	50,03	166 931	Polyuréthane (20cm)	Polystyrène expansé (20cm) TV
D) 10 vol/h optimal	53,54	87 019	Polyuréthane (20cm)	Ouate de cellulose (20cm) TV
HAUSSMANNIEN (scénario) :	DH d'inconfort (C°.h)	kgCO2eq	Composition toiture	Composition façades Type vitrage
E) 10 vol/h bon en été	545,47	21 666	Laine de verre (30cm)	Polystyrène expansé (30cm) TV
F) 10 vol/h bon en été	522,03	9 335	Ouate de cellulose (30cm)	Ouate de cellulose (30cm) TV
G) 10 vol/h optimal	657,61	10 988	Laine de verre (30cm)	Polystyrène expansé (05cm) DV
H) 10 vol/h optimal	611,40	8 551	Ouate de cellulose (30cm)	Ouate de cellulose (05cm) TV
MAISON PHENIX (scénario) :	DH d'inconfort (C°.h)	kgCO2eq	Composition toiture	Composition façades Type vitrage
I) 10 vol/h bon en été	331,31	2 036	Polystyrène expansé (05cm)	Laine de verre (20cm) TV
J) 10 vol/h bon en été	313,04	862	Ouate de cellulose (10cm)	Ouate de cellulose (10cm) DV
K) 10 vol/h optimal	236,58	4 123	Polystyrène expansé (20cm)	Laine de verre (20cm) TV
L) 10 vol/h optimal	232,42	1 087	Ouate de cellulose (20cm)	Ouate de cellulose (20cm) TV
VARIANTES OPTIMALES				
HLM MONTREUIL (scénario) :	DH d'inconfort (C°.h)	kgCO2eq	Composition toiture	Composition façades Type vitrage
A) 10 vol/h bon en été	248,67	86 065	Polyuréthane (05cm)	Polystyrène expansé (05cm) DV
B) 10 vol/h bon en été	143,37	24 858	Polyuréthane (05cm)	Ouate de cellulose (30cm) DV
C) 10 vol/h optimal	50,03	166 931	Polyuréthane (20cm)	Polystyrène expansé (20cm) TV
D) 10 vol/h optimal	53,54	87 019	Polyuréthane (20cm)	Ouate de cellulose (20cm) TV
HAUSSMANNIEN (scénario) :	DH d'inconfort (C°.h)	kgCO2eq	Composition toiture	Composition façades Type vitrage
E) 10 vol/h bon en été	545,47	21 666	Polystyrène expansé (30cm)	Laine de verre (30cm) TV
F) 10 vol/h bon en été	522,03	9 335	Ouate de cellulose (30cm)	Ouate de cellulose (30cm) TV
G) 10 vol/h optimal	657,61	10 988	Polystyrène expansé (05cm)	Laine de verre (30cm) DV
H) 10 vol/h optimal	611,40	8 551	Ouate de cellulose (05cm)	Ouate de cellulose (30cm) TV
MAISON PHENIX (scénario) :	DH d'inconfort (C°.h)	kgCO2eq	Composition toiture	Composition façades Type vitrage
I) 10 vol/h bon en été	331,31	2 036	Polystyrène expansé (05cm)	Laine de verre (20cm) TV
J) 10 vol/h bon en été	313,04	862	Ouate de cellulose (10cm)	Ouate de cellulose (10cm) DV
K) 10 vol/h optimal	236,58	4 123	Polystyrène expansé (20cm)	Laine de verre (20cm) TV
L) 10 vol/h optimal	232,42	1 087	Ouate de cellulose (20cm)	Ouate de cellulose (20cm) TV

Figure 287 : Variantes « optimales » prises en compte pour les scénarios d'utilisation

Ces variantes étant définies, on peut grâce à l'éditeur de Pléiades créer les fichiers associés à ces compositions, et par la suite effectuer les ACV de ces variantes pour pouvoir intégrer l'étape d'utilisations des bâtiments, sur 100 ans. Le scénario climatique considéré correspond à Paris, sans prendre en compte l'îlot de chaleur, à l'horizon 2100 (vague de chaleur médiane).

Hypothèses concernant l'étape d'utilisation

Le mix de production d'électricité considéré est un mix horaire correspondant à une moyenne sur 100 ans (données issues d'une moyenne pondérée entre les scénarios RTE 2025, ADEME 2035 et ADEME 2050). Un scénario de climatisation a été défini pour les variantes de la figure 44 dépassant même avec l'isolation le seuil des 350 DH d'inconfort. Il s'agit d'un scénario qui abaisse la température à 25°C du début Juin à début Septembre lorsque les températures sont trop élevées à l'intérieur du bâtiment.

Pour les variantes ayant moins de 350 DH d'inconfort, le scénario de climatisation n'est pas effectif. La climatisation est définie en ACV avec un EER de 2.8.

Voici les hypothèses ACV que nous avons considérées pour les bâtiments à rénover :

- Le type d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire est le gaz naturel
- Le rendement PCI des équipements de chauffage et d'ECS est de 90%
- La consommation d'électricité des occupants (en supplément aux apports internes considérées dans les simulations thermiques) : 2 kWh/personne/jour
- La consommation de gaz des occupants : 7,5 kWh/personne/jour

- La consommation d'eau chaude des occupants : 40 litres/personne/jour
- La consommation d'eau froide des occupants : 100 litres/personne/jour
- Le poids des déchets ménagers : 1 kg/personne/jour
- La proportion de verre trié est de 60%
- La proportion de papier trié est de 60%
- Les déchets non triés sont incinérés à 100% avec valorisation énergétique
- Le rendement de valorisation de l'incinération est de 90%

On réalise ensuite les ACV de toutes les variantes à considérer, pour chacun des bâtiments.

Résultats des ACV : HLM (Montreuil)

Pour le HLM de Montreuil, 5 variantes ont été considérées pour comparer l'utilisation :

- 1) Variante 1 (B de la Figure 287) : 5 cm de polyuréthane sur la toiture, 30 cm de ouate de cellulose sur les façades, double vitrage, 10 vol/h, 143 DH d'inconfort, 24 858 kgCO₂éq émis pour la construction (optimal en été)
- 2) Variante 2 (A de la Figure 287) : 5 cm de polyuréthane sur la toiture, 5 cm de polystyrène expansé sur les façades, double vitrage, 10 vol/h, 249 DH d'inconfort, 86 065 kgCO₂éq émis pour la construction (optimal en été)
- 3) Variante 3 (D de la Figure 287) : 20 cm de polyuréthane sur la toiture, 20 cm de ouate de cellulose sur les façades, triple vitrage, 10 vol/h, 54 DH d'inconfort, 87 019 kgCO₂éq émis pour la construction (optimal sur toute l'année)
- 4) Variante 4 (C de la Figure 287) : 20 cm de polyuréthane sur la toiture, 20 cm de polystyrène expansé sur les façades, triple vitrage, 10 vol/h, 50 DH d'inconfort, 166 931 kgCO₂éq émis pour la construction (optimal sur toute l'année)
- 5) Variante 5 : Base non rénové : pas d'isolation sur les façades ou la toiture, simple vitrage, 2 vol/h, 3196 DH d'inconfort, scénario de climatisation

On remarque que la variante 5 a un scénario de climatisation contrairement aux autres variantes, car elle dépasse le seuil de 350 DH d'inconfort.

On lance les simulations ACV pour chacune des variantes, puis on extrait dans un tableau les impacts CO₂ liés à chacune des étapes du cycle de vie.

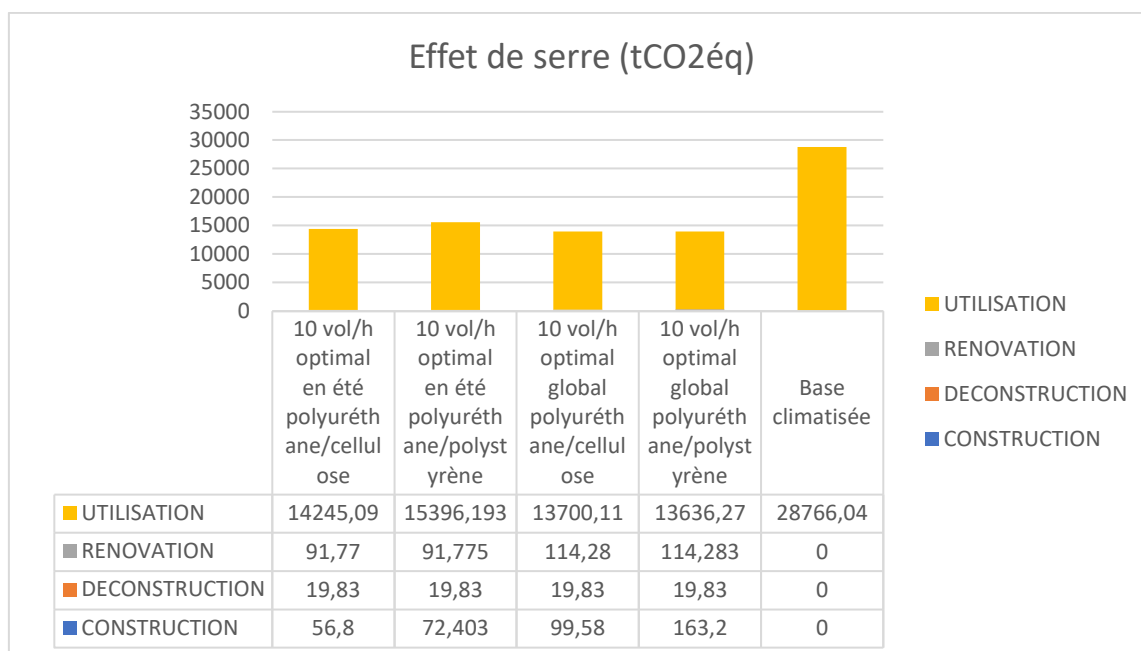


Figure 288 : Comparaison des impacts de différentes variantes pour le HLM de Montreuil sur le cycle de vie (t CO₂éq)

Avec une analyse sur 100 ans, on remarque que l'étape d'utilisation est celle qui contribue le plus à l'effet de serre sur la durée de vie totale du bâtiment. On remarque que la variante 5 (non isolée) est celle qui présente le plus d'impacts CO₂ en utilisation, avec presque le double d'émission de CO₂ comparée aux autres variantes. Pour les deux premières variantes 1 et 2, qui correspondent à celles optimales en été, on remarque qu'elles ont plus d'impacts que celles optimales sur toute l'année (variante 3 et 4) de l'ordre de

10%. Finalement, les variantes 3 et 4 sont celles qui ont le moins d'impact CO₂, et qui ont également le moins de degrés-heures d'inconfort. On ne remarque cependant pas une nette différence entre l'utilisation de ouate de cellulose ou de polystyrène expansé sur ce bâtiment.

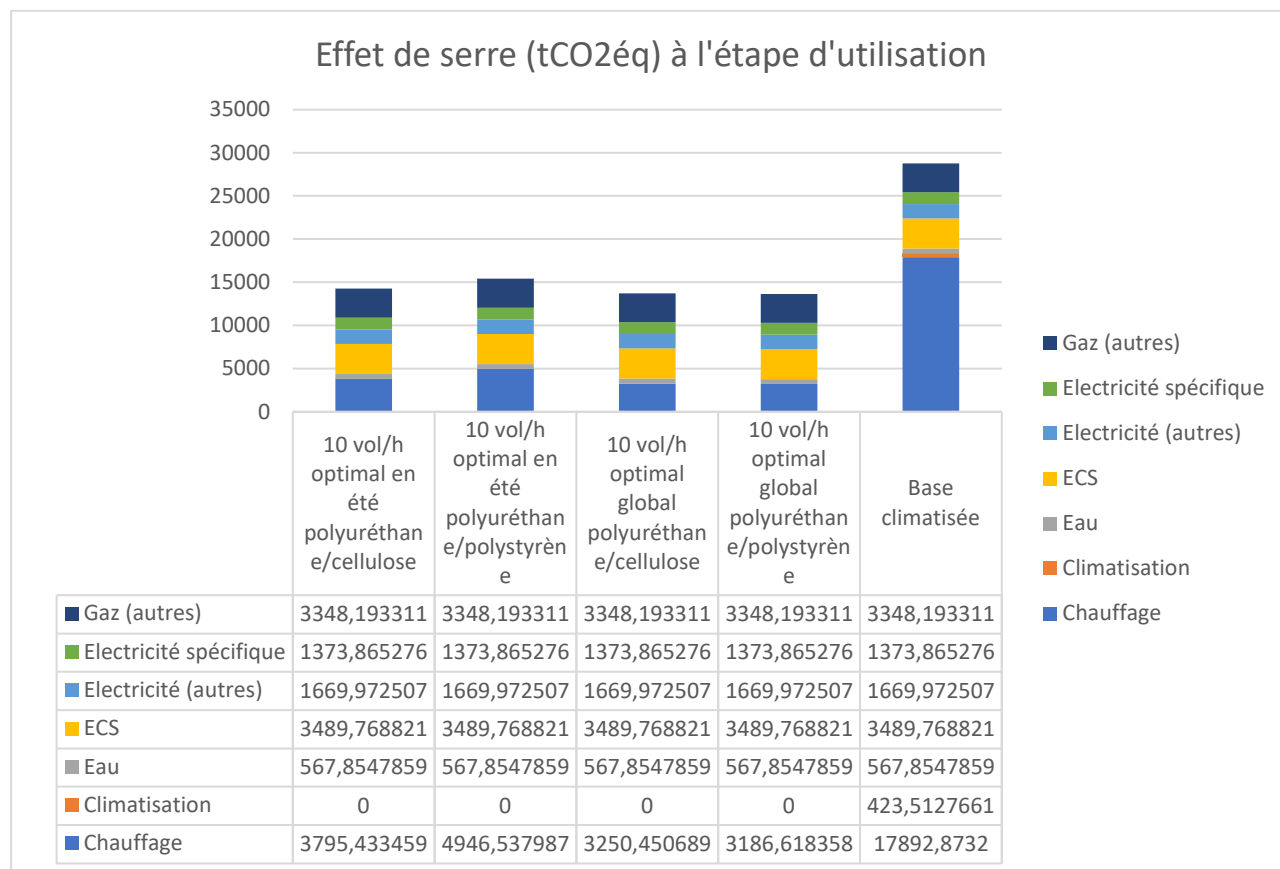


Figure 289 : Comparaison des impacts de différentes variantes pour le HLM de Montreuil à l'étape utilisation (tCO₂éq)

Ce diagramme représente les impacts CO₂ à l'étape d'utilisation. Il permet de se représenter quels sont les éléments qui auront le plus d'impact lors de l'utilisation, et permet également de constater l'influence de certaines rénovations sur l'impact CO₂. En effet, on peut constater que la variante 5 a des besoins en chauffage très importants, ce qui est dû au fait qu'elle ne comprend aucune isolation, et a donc beaucoup de déperditions via les façades et la toiture en hiver. Elle a également des besoins non négligeables en climatisation car elle dépasse le seuil des 350 DH d'inconfort en été. On remarque également que même si dans la figure précédente, les impacts CO₂ liés à la construction des variantes 3 et 4 étaient plus importantes que celles des variantes 1 et 2, les besoins en chauffage sont moins importants et l'impact CO₂ global moindre. Il est donc judicieux de choisir une épaisseur d'isolation et des vitrages adéquats pour minimiser les impacts liés à l'utilisation, quitte à avoir un impact un peu plus important lors de la construction ou rénovation.

Le graphe ci-dessous montre la comparaison entre la variante de base, considérée comme référence (en bleu), et les 4 variantes (1 en jaune, 2 en rouge, 3 en vert et 4 en violet) sur l'ensemble des indicateurs environnementaux.

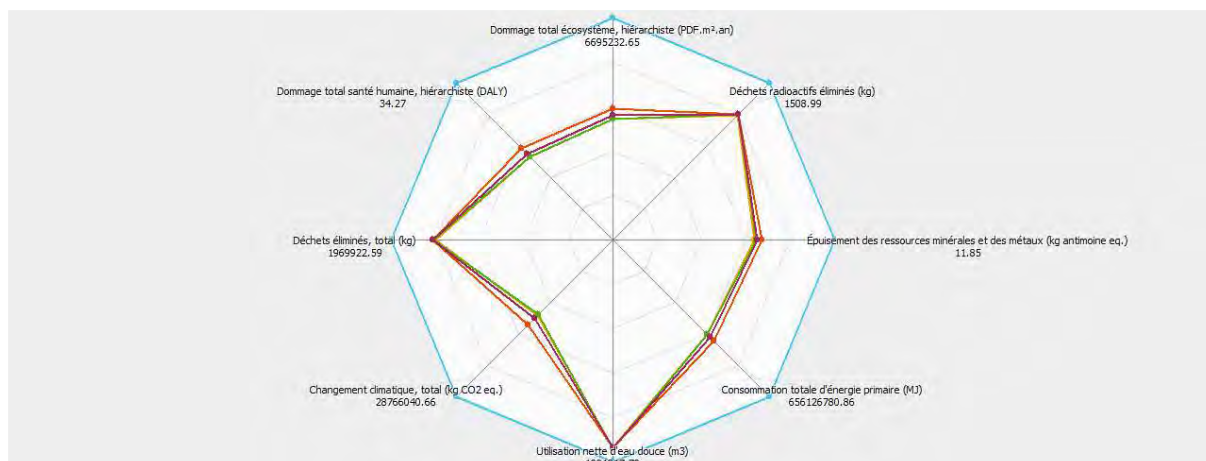


Figure 290 : Diagramme radar de comparaison des impacts de différentes variantes pour le HLM de Montreuil à l'étape utilisation (t CO2eq)

Ce graphe montre l'absence de transfert d'impact : les variantes optimales permettent de réduire l'ensemble des indicateurs environnementaux (environ 50% pour le changement climatique, très peu pour l'utilisation d'eau).

Résultats des ACV : Haussmannien (Paris)

Pour l'Haussmannien à Paris, 3 variantes ont été considérées pour comparer l'utilisation. En effet, certaines variantes « optimales » n'ont pas été considérées car elles demandaient d'isoler une grande quantité en intérieur (car l'Haussmannien ne peut pas être isolé de l'extérieur). Il s'agissait donc d'une trop grande perte de la surface habitable.

Ainsi, pour l'Haussmannien, les 3 variantes suivantes ont été considérées :

- 1) Variante 1 (H de la Figure 287) : 30 cm de ouate de cellulose sur la toiture, 5 cm de ouate de cellulose sur les façades, triple vitrage, 10 vol/h, 611 DH d'inconfort, 8 551 kgCO2eq émis pour la construction (optimal), scénario de climatisation
- 2) Variante 2 (G de la Figure 287) : 30 cm de laine de verre sur la toiture, 5 cm de polystyrène expansé sur les façades, double vitrage, 10 vol/h, 658 DH d'inconfort, 10 988 kgCO2eq émis pour la construction (optimal toute l'année), scénario de climatisation
- 3) Variante 3 : Base non rénové : pas d'isolation sur les façades ou la toiture, simple vitrage, 2 vol/h, 4592 DH d'inconfort, scénario de climatisation

On remarque que les 3 variantes comportent un scénario de climatisation, car elles dépassent le seuil des 350 DH d'inconfort.

On lance les simulations ACV pour chacune des variantes, puis on extrait dans un tableur les impacts CO2 liés à chacune des étapes du cycle de vie.

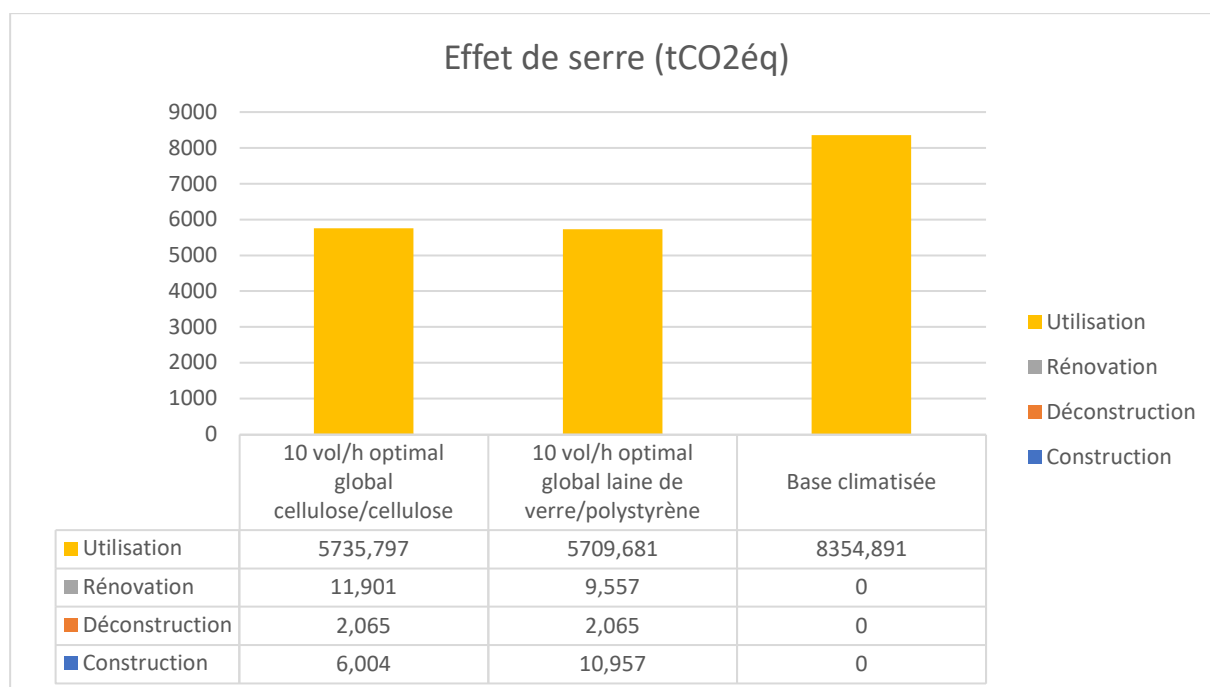


Figure 291 : Comparaison des impacts de différentes variantes pour l'Hausmannien de Paris sur le cycle de vie (t CO₂eq)

Avec une analyse sur 100 ans, on remarque que l'étape d'utilisation est encore une fois celle qui contribue le plus à l'effet de serre sur la durée de vie totale du bâtiment. On remarque que la variante 3 (non isolée) est celle qui présente le plus d'impacts CO₂ en utilisation, avec presque 1/3 de plus d'émission de CO₂ comparée aux autres variantes. Pour les deux premières variantes 1 et 2, qui correspondent à celles optimales, seul l'isolant change mais les épaisseurs restent les mêmes, et le résultat en termes d'impact est relativement équivalent. On ne remarque cependant pas une nette différence entre l'utilisation de ouate de cellulose ou de polystyrène expansé sur ce bâtiment.

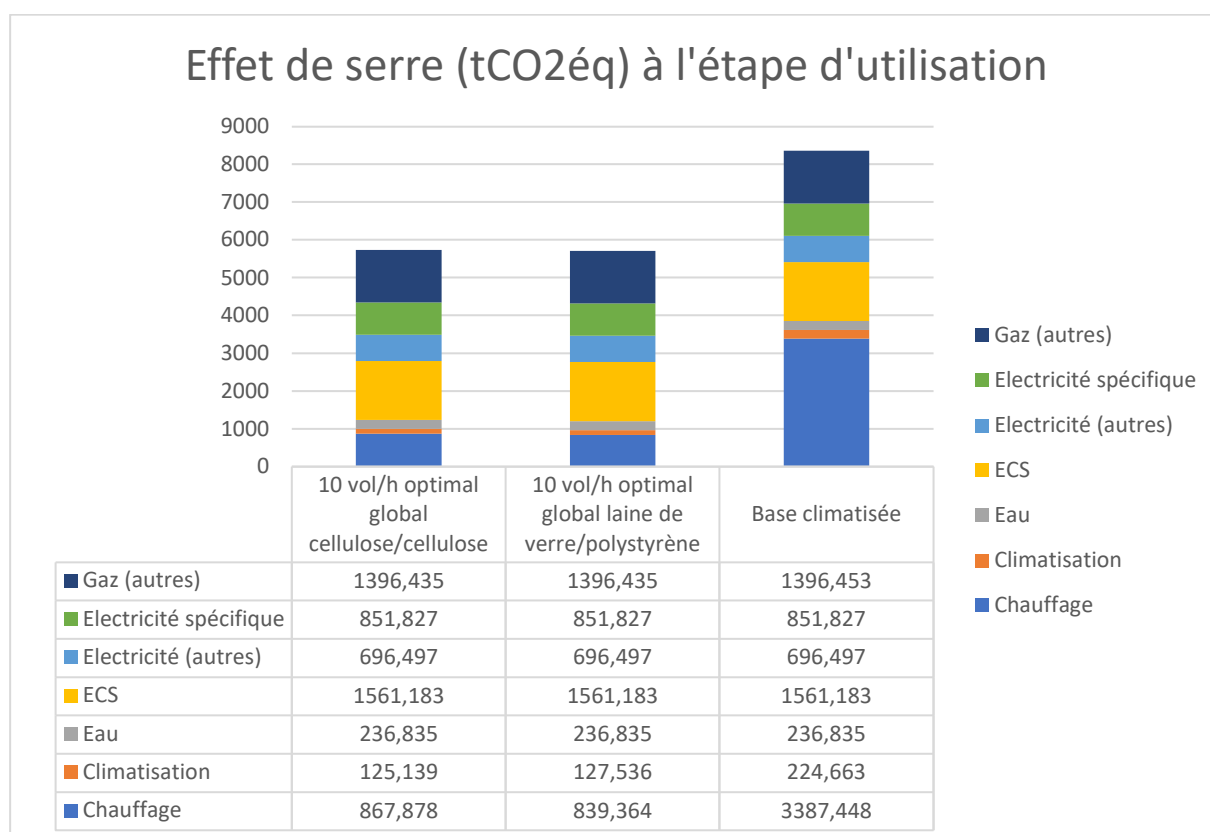


Figure 292 : Comparaison des impacts de différentes variantes pour l'Hausmannien de Paris à l'étape d'utilisation (t CO₂eq)

Ce diagramme représente les impacts CO2 à l'étape d'utilisation. Il permet de se représenter quels sont les éléments qui ont le plus d'impact lors de l'utilisation, et permet également de constater l'influence de certaines rénovations sur l'impact CO2. En effet, on peut voir que la variante 3 a des besoins en chauffage très importants, plus de 4 fois supérieurs à celles des variantes 1 et 2 en termes d'impact CO2, ce qui est dû au fait qu'elle ne comprend aucune isolation, et a donc beaucoup de déperditions via les façades et la toiture en hiver. Elle a également des besoins non négligeables en climatisation car elle dépasse le seuil des 350 DH d'inconfort en été, comme les variantes 1 et 2, mais celles-ci ont un impact 2 fois moins important au niveau de la climatisation. On remarque également très peu de différence entre les variantes optimales 1 et 2, ceci est dû au fait que les deux ont été choisies pour convenir toute l'année.

Le graphe ci-dessous montre de nouveau l'absence de transfert d'impact. Les différences entre les variantes optimales sont très faibles (seule la courbe en rouge est visible, les autres sont masquées car les valeurs sont quasiment identiques) mais toutes sont moins impactantes que la référence en bleu (cas non rénové avec climatisation).

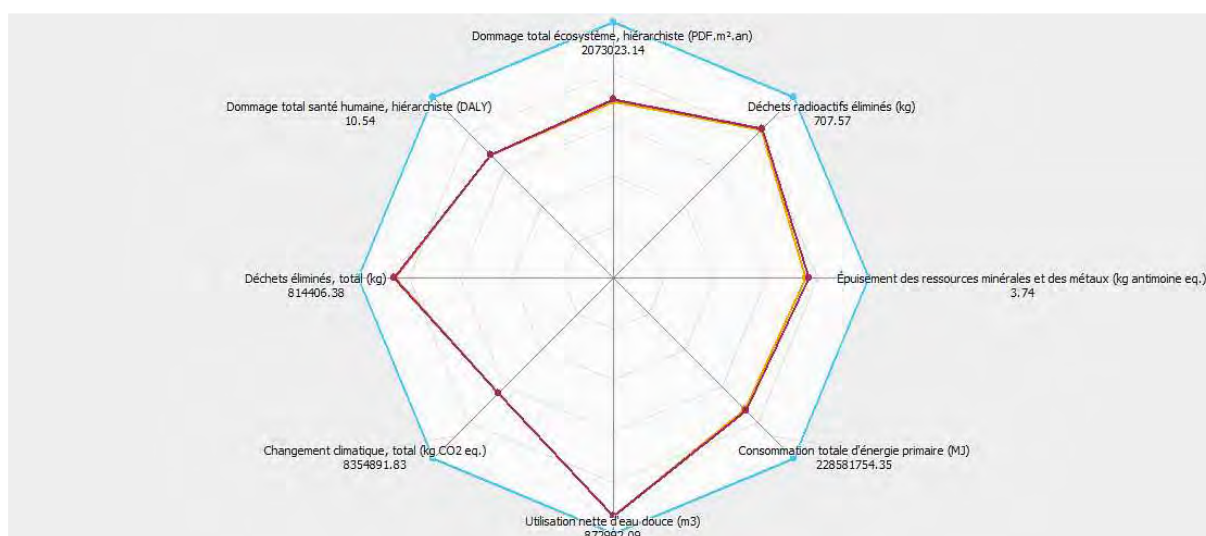


Figure 293 : Diagramme radar de comparaison des impacts de différentes variantes pour l'Hausmannien de Paris à l'étape d'utilisation (t CO2eq)

Résultats des ACV : Maison Phénix

Pour la maison Phénix, 5 variantes ont été considérées pour comparer l'utilisation :

- 1) Variante 1 (J de la Figure 287) : 10 cm de ouate de cellulose sur la toiture, 10 cm de ouate de cellulose sur les façades, double vitrage, 10 vol/h, 313 DH d'inconfort, 862 kgCO2eq émis pour la construction (optimal en été)
- 2) Variante 2 (I de la Figure 287) : 20 cm de laine de verre sur la toiture, 5 cm de polystyrène expansé sur les façades, triple vitrage, 10 vol/h, 331 DH d'inconfort, 2036 kgCO2eq émis pour la construction (optimal en été)
- 3) Variante 3 (L de la Figure 287) : 20 cm de ouate de cellulose sur la toiture, 20 cm de ouate de cellulose sur les façades, triple vitrage, 10 vol/h, 232 DH d'inconfort, 1087 kgCO2eq émis pour la construction (optimal sur toute l'année)
- 4) Variante 4 (K de la Figure 287) : 20 cm de laine de verre sur la toiture, 20 cm de polystyrène expansé sur les façades, triple vitrage, 10 vol/h, 237 DH d'inconfort, 4123 kgCO2eq émis pour la construction (optimal sur toute l'année)
- 5) Variante 5 : Base non rénové : pas d'isolation sur les façades ou la toiture, simple vitrage, 2 vol/h, 2533 DH d'inconfort, scénario de climatisation

On remarque que la variante 5 a un scénario de climatisation contrairement aux autres variantes, car elle dépasse le seuil de 350 DH d'inconfort.

On lance les simulations ACV pour chacune des variantes, puis on extrait dans un tableur les impacts CO2 liés à chacune des étapes du cycle de vie de ces dernières.

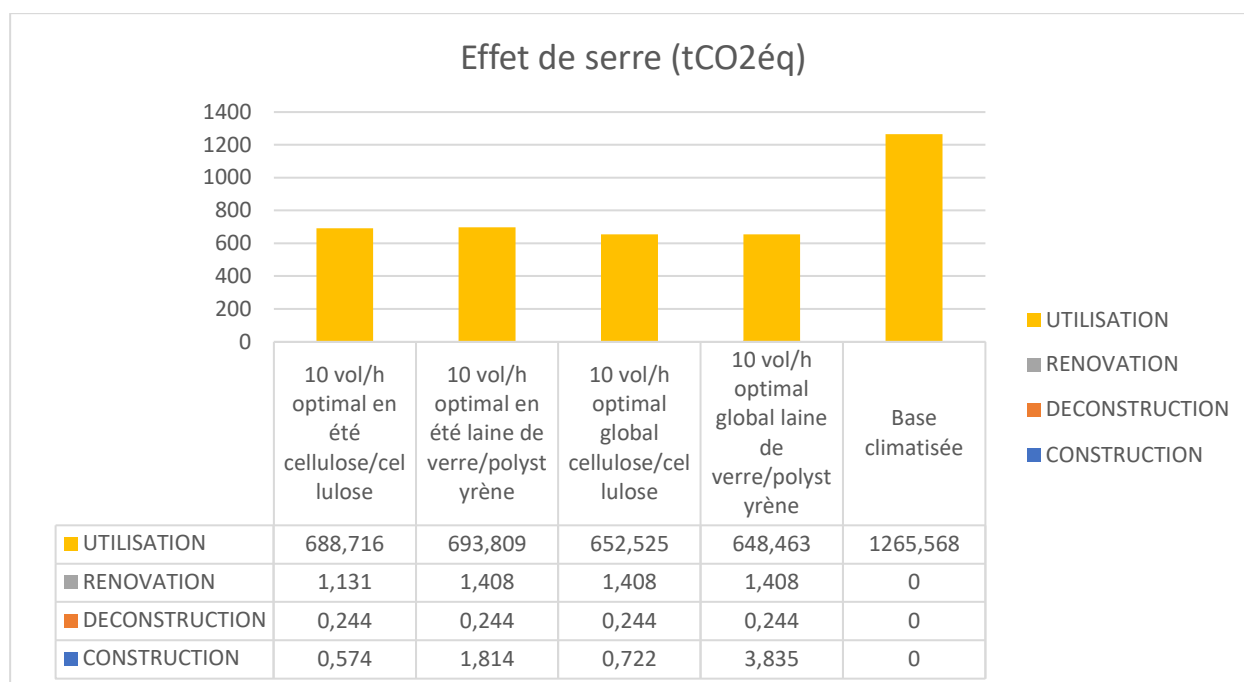


Figure 294 : Comparaison des impacts de différentes variantes pour la maison Phénix sur le cycle de vie (t CO₂éq)

Avec une analyse sur 100 ans, on remarque directement que l'étape d'utilisation est logiquement celle qui contribue le plus à l'effet de serre sur la durée de vie totale du bâtiment. On remarque que la variante 5 (non isolée) est celle qui présente le plus d'impacts CO₂ en utilisation, avec plus du double d'émission de CO₂ comparée aux autres variantes. Pour les deux premières variantes 1 et 2, qui correspondent à celles optimales en été, on remarque qu'elles ont plus d'impacts que celles optimales sur toute l'année (variante 3 et 4) de l'ordre de 10%. Finalement, les variantes 3 et 4 sont celles qui ont le moins d'impact CO₂, et qui ont également le moins de degrés-heures d'inconfort. On ne remarque cependant toujours pas une nette différence entre l'utilisation de ouate de cellulose ou de polystyrène expansé sur ce bâtiment.

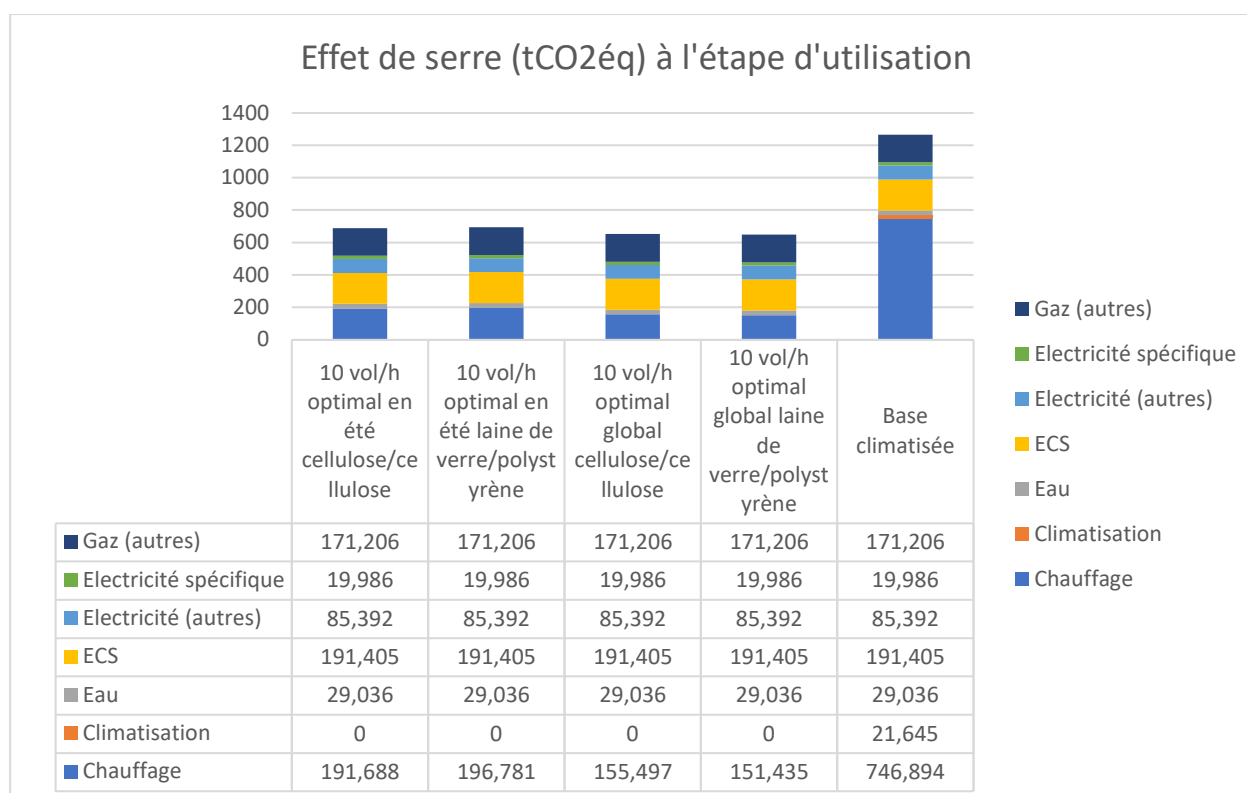


Figure 295 : Comparaison des impacts de différentes variantes pour la maison Phénix à l'étape d'utilisation (tco₂éq)

Ce diagramme représente les impacts CO2 à l'étape d'utilisation. Il permet de se représenter quels sont les éléments qui ont le plus d'impact lors de l'utilisation, et permet également de constater l'influence de certaines rénovations sur l'impact CO2. En effet, on peut voir, une nouvelle fois, que la variante 5 a des besoins en chauffage très importants (4 à 5 fois plus d'impact que les autres variantes), ce qui est dû au fait qu'elle ne comprend aucune isolation, et a donc beaucoup de déperditions via les façades et la toiture en hiver. Elle a également des besoins non négligeables en climatisation car elle dépasse le seuil des 350 DH d'inconfort en été. On remarque également que même si dans la figure précédente, les impacts CO2 liés à la construction des variantes 3 et 4 étaient plus importantes que celles des variantes 1 et 2, les besoins en chauffage sont moins importants et l'impact CO2 global moindre. Il est donc judicieux de choisir une épaisseur d'isolation et des vitrages adéquats pour minimiser les impacts liés à l'utilisation, quitte à avoir un impact un peu plus important lors de la construction, comme nous avons également pu le voir avec les deux bâtiments précédents.

Le graphe ci-dessous montre également l'absence de transfert d'impact. Les variantes optimales (1 = jaune, 2 = rouge, 3 = vert et 4 = violet) sont moins impactantes que la référence non rénovée (en bleu).

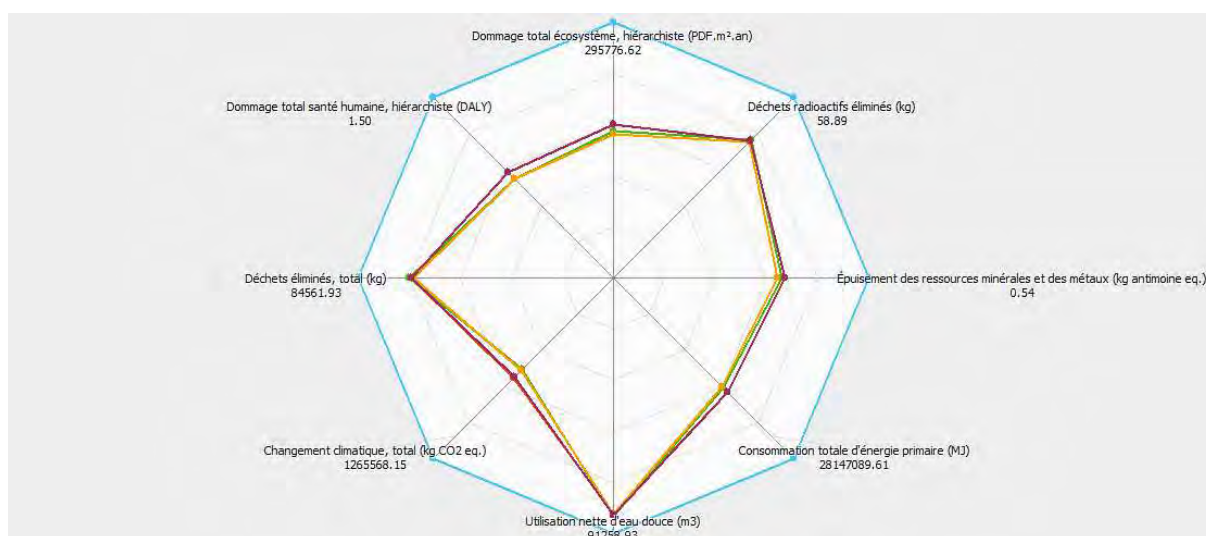


Figure 296 : Diagramme radar de comparaison des impacts de différentes variantes pour la maison Phénix à l'étape d'utilisation (tco2eq)

6.3.2. Bâtiments de bureaux anciens

6.3.2.1. Variantes étudiées :

Le bâtiment de bureaux ancien est le même que celui utilisé pour les STD étudiées dans la tâche 4. Afin de comparer des bâtiments ayant des conditions de confort semblables, il a été choisi de comparer :

- différentes variantes d'adaptation du bâtiment, les variantes retenues ont montré en STD un niveau de confort acceptable hors climatisation
- le bâtiment de base climatisé à 27°C, le bâtiment en l'état ne répondant à aucun critère de confort estival.

Variante	Base	Base climatisée	Bâtiment adapté			
			ITE	Optimale bâti	Optimale bâti + brasseurs d'air	Optimale bâti + clim
Liste des éléments déconstruits				SV	SV	SV
Liste des éléments ajoutés		Clim 20kW	Isolant + enduit	TV Isolant + enduit Casquettes Stores extérieurs Moteurs (des ouverture auto)	TV Isolant + enduit Casquettes Stores extérieurs Moteurs (des ouverture auto) Brasseurs d'air	TV Isolant + enduit Casquettes Stores extérieurs Moteurs (des ouverture auto) Clim 20kW
Besoins chaud (kWh)	30896	30896	15696	10241	10241	10866

DH max	2553.1	44	2645.8	1054.9	345.4	5.1
T max (°C)	41.07	40.1	41.01	36.6	36.6	36.69

6.3.2.2. Hypothèses complémentaires :

Pour passer des besoins évalués en STD aux consommations prises en compte dans le contributeur énergie, les hypothèses complémentaires suivantes sont retenues :

- 20 occupants
- 5L ECS/pers/jour
- 15L d'eau froide/pers/jour
- Un chauffage thermodynamique est considéré avec un COP de 3.5 et une climatisation avec un EER de 2.8. Ces systèmes correspondent aux systèmes présents sur le bâtiment actuel d'Izuba.

6.3.2.3. Mise en place de l'ITE

Ajouter une ITE à base de laine de bois permet de réduire fortement les impacts environnementaux de notre bâtiment en comparaison d'une simple installation de climatisation. Une baisse de près de 40% sur 7 des 8 indicateurs est effectivement observée. Seule l'eau utilisée reste sensiblement la même avec une simple baisse de près de 5%.

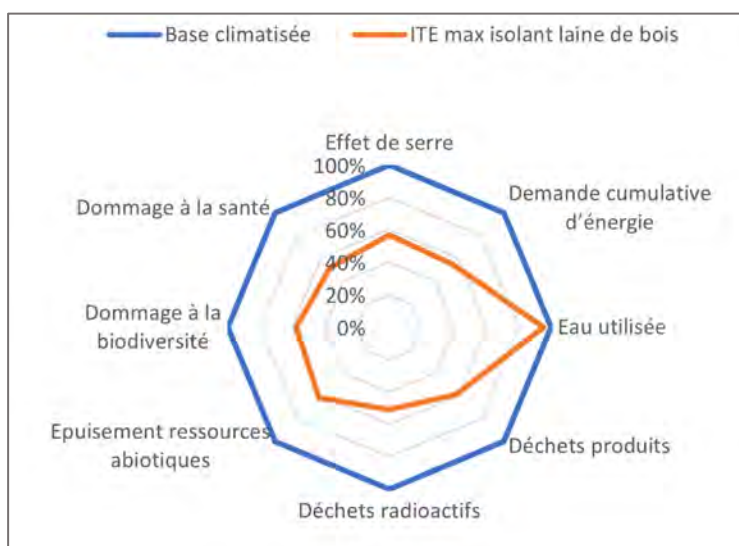


Figure 297 : Comparaison des impacts pour la variante ITE pour le bâtiment de bureaux ancien

L'épaisseur d'isolant et sa nature ont également été testés. Pour cela, les variantes d'isolant suivantes ont été testées :

- ITE min isolant laine de bois : $U_p = 0,3 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- ITE max isolant laine de bois : $U_p = 0,15 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- ITE max isolant polystyrène : $U_p = 0,15 \text{ W/m}^2.\text{K}$

Concernant le type et l'épaisseur d'isolant, l'effet sur les indicateurs d'impact se trouve assez réduite. Un matériau biosourcé tel que la laine de bois n'apporte qu'un très léger avantage sur 4 des 8 indicateurs par rapport au polystyrène expansé. 3 indicateurs sont même en sa défaveur (les déchets produits, les déchets radioactifs et l'épuisement des ressources abiotiques).

Une plus grande épaisseur d'isolant apporte une baisse de l'ordre de 1 à 4 % sur 6 des 8 indicateurs. Les deux derniers s'en trouvent presque inchangés.

L'importance du choix de l'ITE se trouve alors toute relative par comparaison avec le fait d'agir et de rénover.

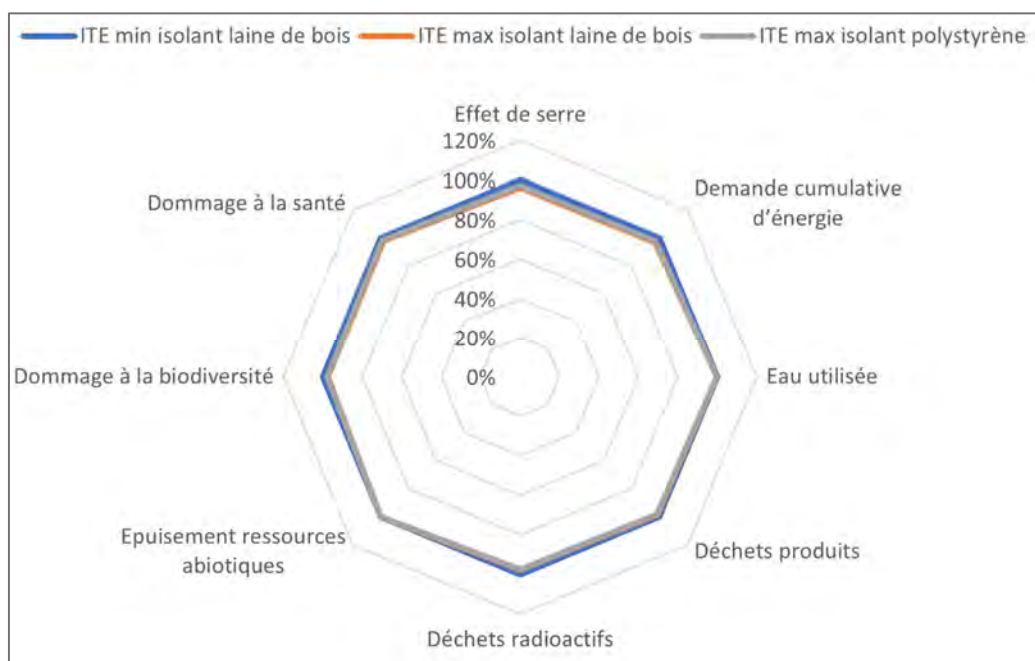


Figure 298 : Comparaison des impacts pour les différents types d'ITE pour le bâtiment de bureaux ancien

6.3.2.4. Variantes optimales bâti bureaux anciens

Cette variante cumule les mesures d'adaptation présentant les résultats les plus favorables sur le confort d'été, issues du livrable 4.

Variante	Menuiseries	Isolation	Ouverture des menuiseries
Base	Simple vitrage	Pas d'isolation	Ouverture manuelle
Optimale bâti	Triple vitrage	ITE Iso max	Ouverture automatique des menuiseries

De la même façon que pour l'ITE, la comparaison des variantes optimales se fera avec la base climatisée.

Sans système de rafraîchissement

Il est remarquable dans les résultats ci-dessous que le travail sur l'enveloppe permet de réduire fortement de nombreux indicateurs environnementaux. En effet, La rénovation de l'enveloppe permettrait une diminution de plus de 50 % de 3 indicateurs : l'effet de serre, la demande cumulative d'énergie et les déchets radioactifs. 3 autres indicateurs connaîtraient une baisse non négligeable de l'ordre de 40 à 50 %. Enfin, les deux derniers, l'épuisement des ressources abiotiques et l'eau utilisée verraient leur valeur baisser de 5 à 15 %.

Cependant, cette variante ne permet pas d'assurer le confort d'été, ajouter un système de rafraîchissement est alors indispensable.

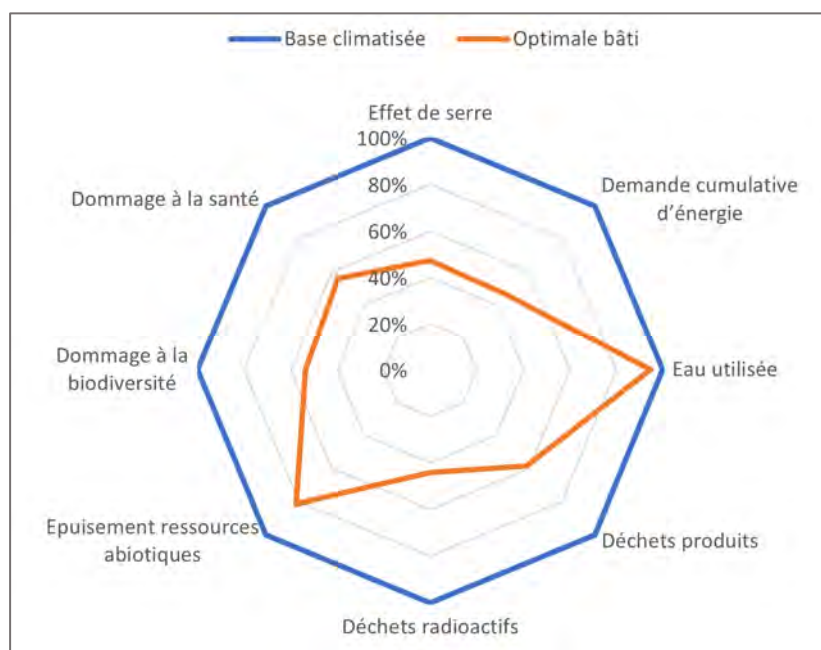


Figure 299 : Comparaison des impacts pour la variante optimale bâti sans rafraîchissement pour le bâtiment de bureaux ancien

Avec système de rafraîchissement

Variante optimale bâti et brasseurs d'air

L'ajout de 18 brasseurs d'air en plus du traitement de l'enveloppe, conduit à une bonne maîtrise du confort d'été, comme vu au livrable 4 sur les STD. En ACV, cette variante présente des impacts environnementaux diminués par rapport à la base climatisée pour tous les indicateurs. Cette diminution est importante pour les indicateurs effet de serre, demande cumulative d'énergie, déchets, déchets radioactifs, dommage à la santé et dommage à la biodiversité. La quantité d'eau utilisée sur le cycle de vie reste sensiblement la même qu'en base.

Variante optimale bâti et climatisation

Si on cumule les adaptations de l'enveloppe et l'installation d'une climatisation, les gains par rapport à la base climatisée sont moins importants. On constate même dans ce cas une augmentation de l'indicateur épuisement des ressources par rapport à la base climatisée.

Pour rappel :

- Sur la variante base climatisée : aucun élément de construction n'est pris en compte (on suppose le bâtiment déjà construit et « amorti ». Le seul impact fabrication est l'installation d'une climatisation. Cet équipement est remplacé régulièrement selon sa durée de vie typique (17 ans : 4 remplacements sur 80 ans), de même pour les éléments de second œuvre présents dans le bâtiment au départ (menuiseries, isolants, revêtements...).
- sur les variantes qui modélisent l'adaptation, de la même manière, les éléments existants « amortis » sont exclus, mais on prend en compte la construction et la rénovation régulière des tous les éléments d'adaptation (isolants, menuiseries, brasseurs d'air...). Cela conduit à des impacts en rénovation plus importants, surtout sur la variante optimale bâti et climatisation, où plusieurs éléments supplémentaires sont modélisés.

Pour la plupart des indicateurs, ce surplus en étape rénovation est compensé par les gains en étape utilisation (gains sur les consos de chauffage et clim), mais pas pour l'indicateur épuisement des ressources : remplacer régulièrement des éléments plus nombreux consomme en effet plus de matières premières.

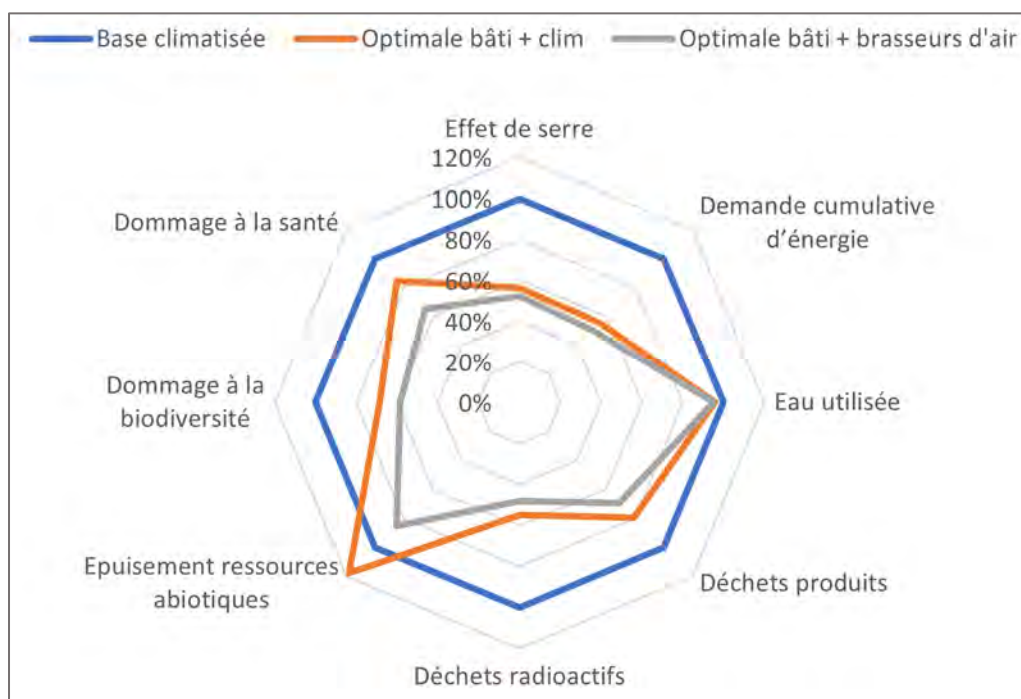


Figure 300 : Comparaison des impacts pour les différents types de rafraîchissement pour le bâtiment de bureaux ancien

6.3.2.5. Comparaison des différentes variantes

Pour mieux comprendre les gains observés sur les diagrammes radar ci-dessus, le détail de trois indicateurs d'impact (effets de serre, les dommages à la biodiversité et les dommages à la santé) a été détaillé par étape du cycle de vie (construction, utilisation, rénovation et déconstruction).

Ces trois indicateurs ont été choisis car ils paraissaient être les plus représentatifs des conséquences environnementales de la rénovation durant le cycle de vie. Ils sont en effet, des indicateurs de bout de chaîne, correspondant aux effets finaux sur l'atmosphère, sur la biodiversité et sur la santé humaine.

Cette fois, toutes les variantes étudiées ont été comparées tout au long de leur cycle de vie, incluant les étapes de construction, de rénovation et de déconstruction, sur les trois indicateurs précédemment cités.

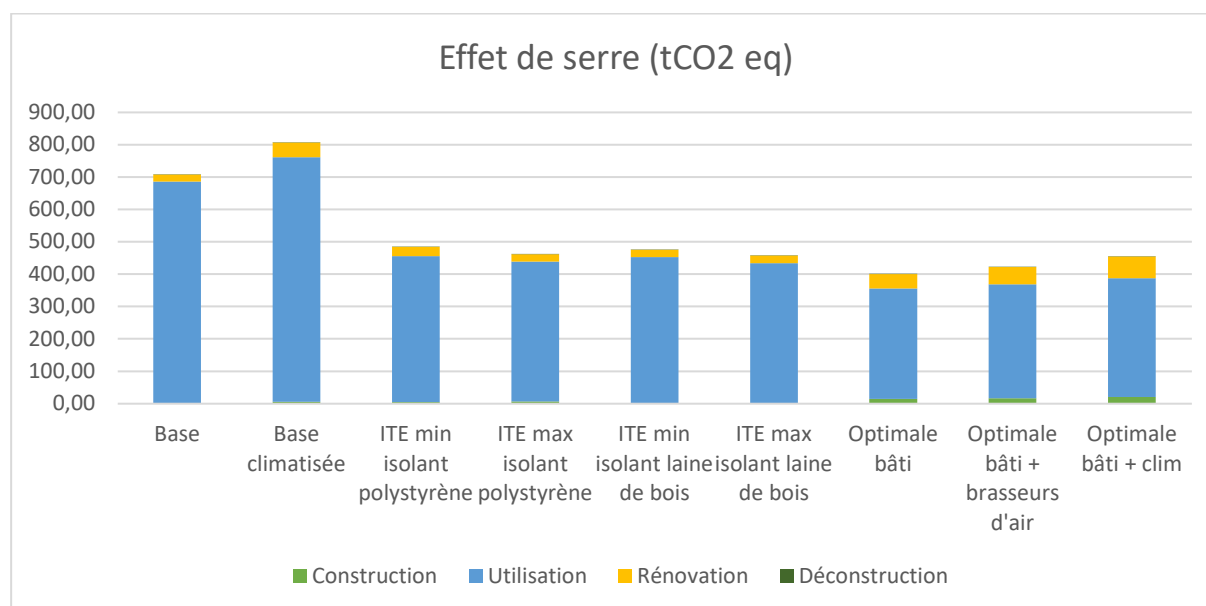


Figure 301 : Comparaison de l'impact effet de serre des variantes sur le cycle de vie pour le bureau ancien

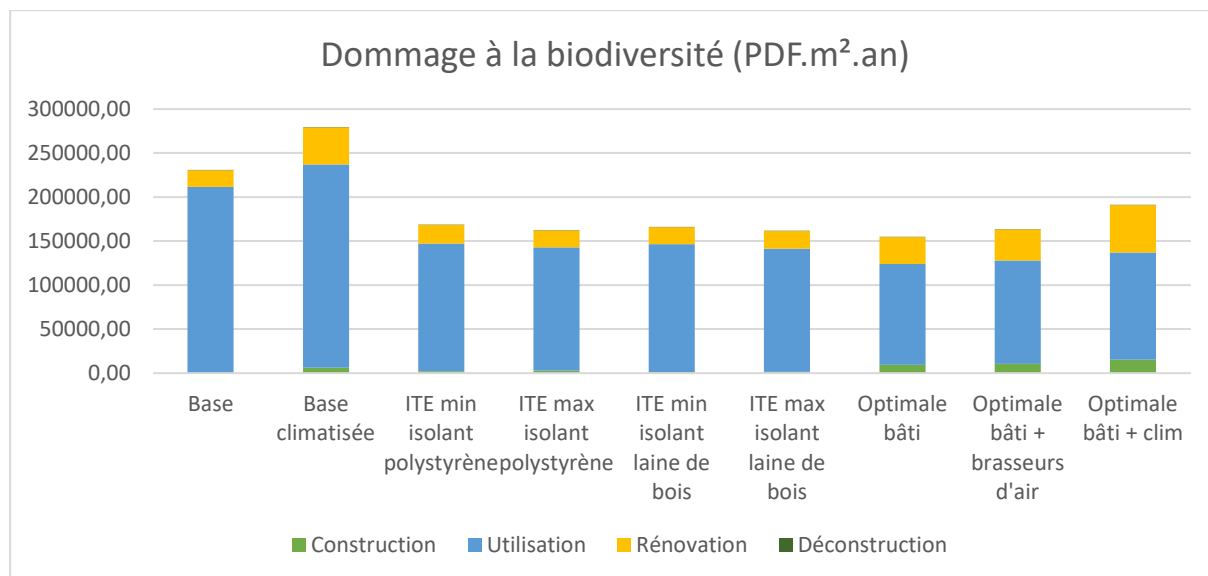


Figure 302 : Comparaison de l'impact dommage à la biodiversité des variantes sur le cycle de vie pour le bureau ancien

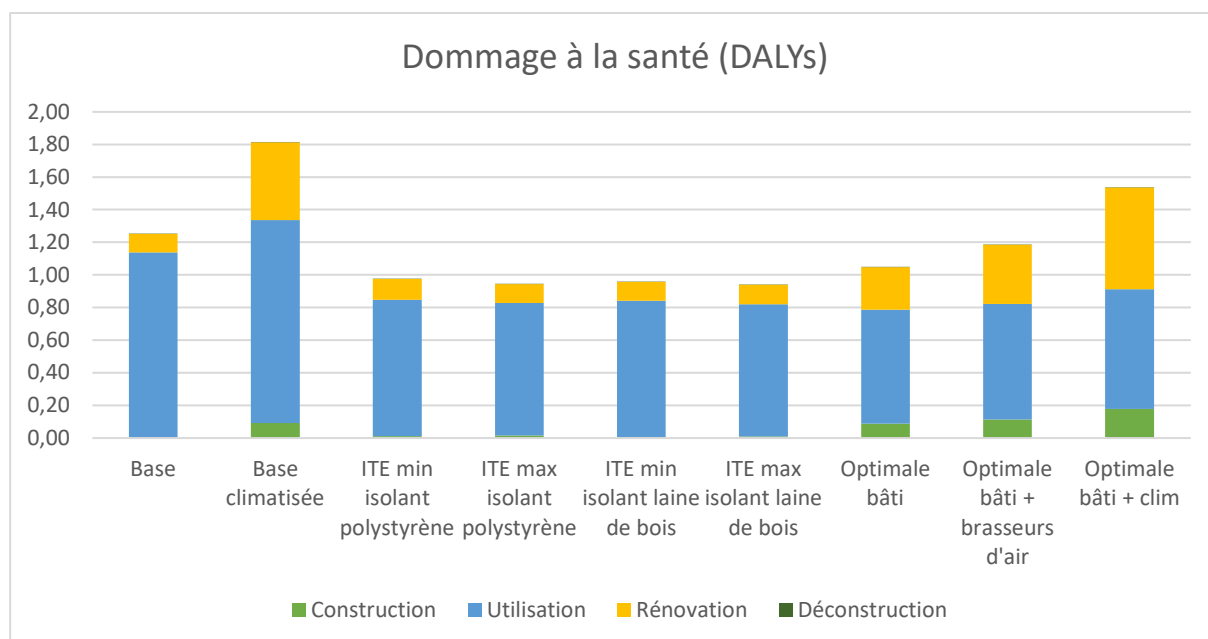


Figure 303 : Comparaison de l'impact dommage à la santé des variantes sur le cycle de vie pour le bureau ancien

Avec une analyse sur 80 ans, l'étape utilisation est logiquement celle qui contribue le plus aux impacts. Les contributions à cette étape sont détaillées dans le paragraphe suivant.

Un résultat notable est la contribution de l'étape de rénovation, particulièrement pour les dommages à la biodiversité et les dommages à la santé. Alors qu'en étape d'utilisation, l'ajout d'une climatisation n'apporte pas un accroissement notable de ces indicateurs, lorsque l'on ajoute l'étape de rénovation, la contribution de la climatisation devient très importante. Avec une durée de vie de 17 ans, la climatisation sera changée 4 fois sur la durée de l'étude ce qui explique une telle influence. Les brasseurs d'air, quant à eux s'imposent comme une meilleure solution tant en termes de confort d'été que d'impact environnemental.

La contribution de l'étape de construction reste faible en comparaison des gains réalisés en étape d'utilisation, du fait de la baisse des consommations.

Pour les 3 indicateurs examinés ici, les variantes d'adaptation au changement climatique présentent toutes des indicateurs inférieurs à la base climatisée.

Détail de l'étape utilisation

Une comparaison de l'effet des différents systèmes en étape d'utilisation a également été faite sur 3 indicateurs : l'effet de serre, le dommage à la biodiversité et le dommage à la santé. Les résultats se trouvent dans les graphiques ci-dessous.

Premièrement, il est remarquable que le travail sur l'enveloppe permet un gain important : les trois indicateurs se retrouvent en baisse de près de la moitié par rapport à leur valeur initiale. Cela est dû principalement à la moindre utilisation du chauffage, qui connaît une baisse drastique et de la climatisation.

L'ajout de systèmes de rafraîchissement ne compense pas cette baisse, même pour la variante optimale bâti avec climatisation. Concernant les brasseurs d'air, leur effet sur l'environnement est minime.

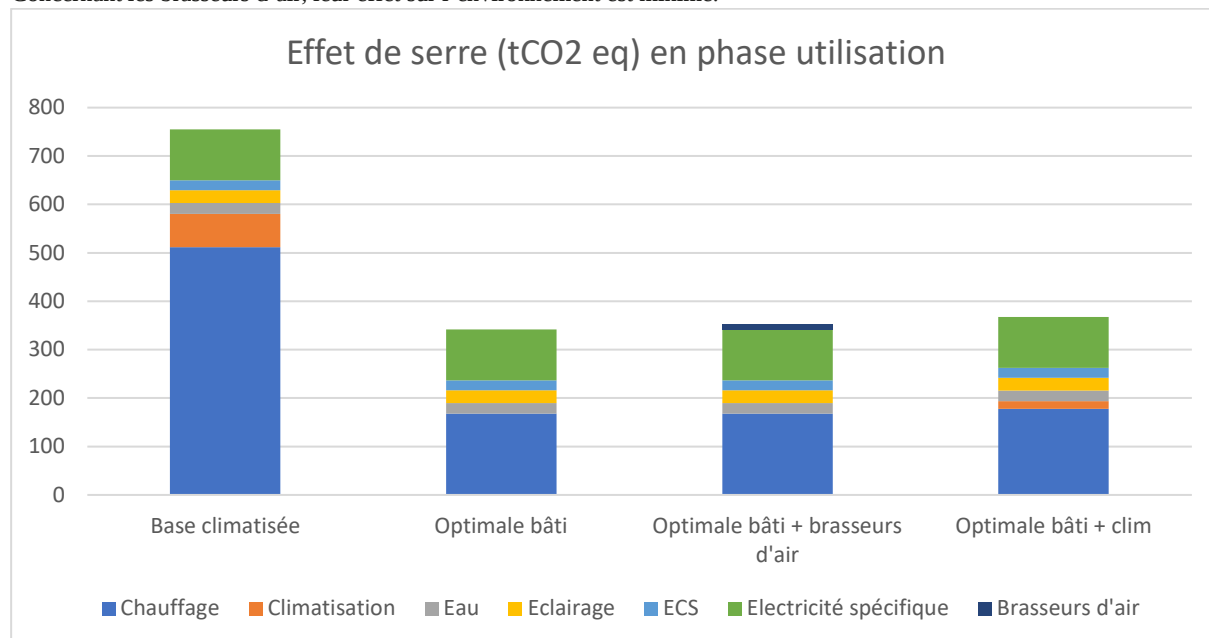


Figure 304 : Comparaison des contributions à l'effet de serre en phase utilisation pour les variantes bâtiment de bureau ancien

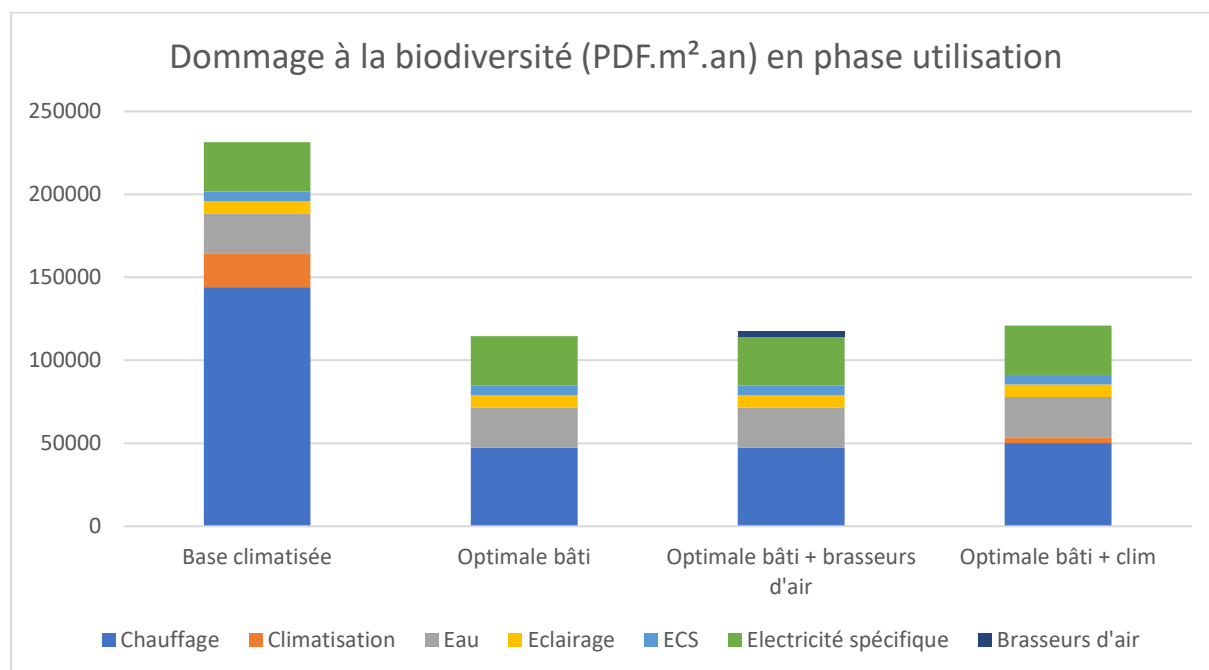


Figure 305 : Comparaison des contributions aux dommages à la biodiversité en phase utilisation pour les variantes bâtiment de bureau ancien

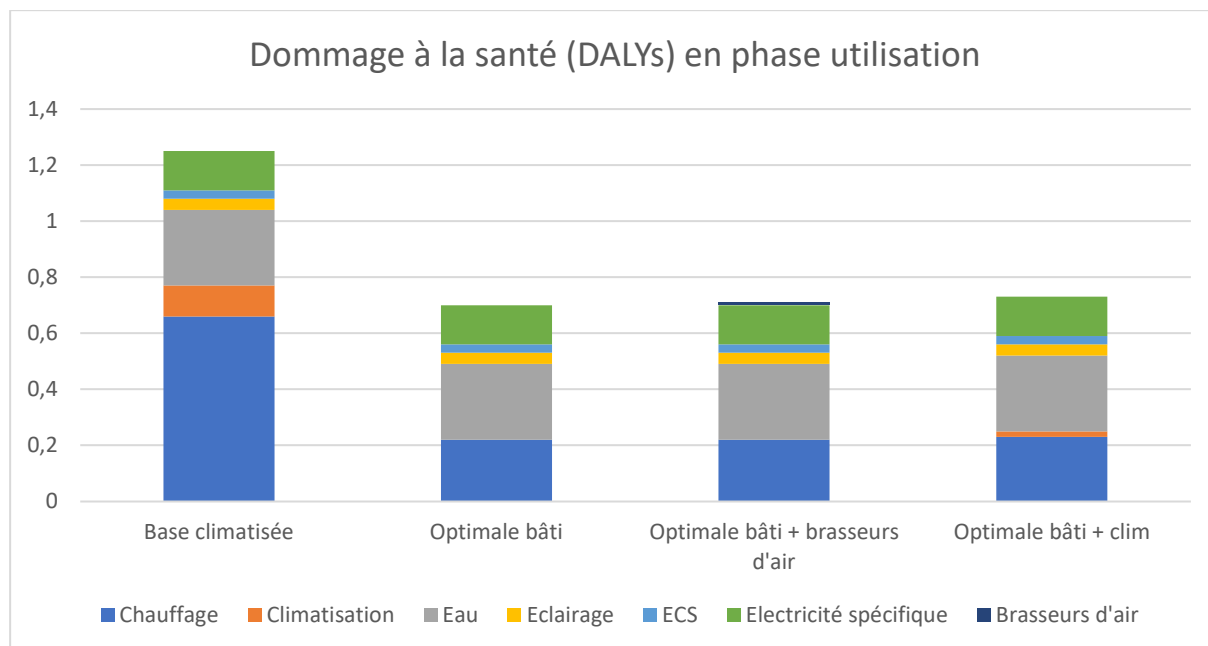


Figure 306 : Comparaison des contributions aux dommages à la santé en phase utilisation pour les variantes bâtiment de bureau ancien

6.3.3. École ancienne

6.3.3.1. Variantes étudiées :

L'école ancienne est même que celle utilisée pour les STD étudiées dans la tâche 4. On retient comme pour les bureaux anciens une comparaison entre des bâtiments ayant des conditions de confort semblables :

- différentes variantes d'adaptation du bâtiment, ayant un niveau de confort acceptable hors climatisation
- le bâtiment de base climatisé à 27°C.

Variante	Base	Base climatisée	Bâtiment adapté				
			ITE	Menuiseries	Optimale bâti	Optimale bâti + brasseurs d'air	Optimale bâti + clim
Liste des éléments déconstruits				SV	SV	SV	SV
Liste des éléments ajoutés		Clim 20kW	Isolant laine de bois + enduit	DV / TV	DV / TV Isolant + enduit Stores extérieurs Moteurs (des ouverture auto)	DV / TV Isolant + enduit Stores extérieurs Moteurs (des ouverture auto) Brasseurs d'air	DV / TV Isolant + enduit Stores extérieurs Moteurs (des ouverture auto) Clim 20kW
Besoins chaud (kWh)	23832	23844	15033	17966	4709	4709	5583
DH max	1570	400	1613.2	1512.1	939.7	355.9	121
T max (°C)	43	42	42.5	40	34.3	34.3	33.9

6.3.3.2. Hypothèses complémentaires :

Pour passer des besoins évalués en STD aux consommations prises en compte dans le contributeur énergie, les hypothèses complémentaires suivantes sont retenues :

- 111 occupants
- 15 L ECS/pers/jour
- 40 L d'eau froide/pers/jour
- Un chauffage au gaz est considéré avec un rendement global moyen de 60%. La climatisation est modélisée avec un EER de 2.8.
-

6.3.3.3. Mise en place de l'ITE

Ajouter une ITE à base de laine de bois permet de réduire fortement les impacts environnementaux de l'école en comparaison d'une simple installation de climatisation. Une baisse de près de 20% à 66 % selon les indicateurs est effectivement observée. Seule la quantité d'eau utilisée sur le cycle de vie reste sensiblement la même, celle-ci est en effet plus liée au usages d'eau potable non modifiés par les mesures d'adaptation.

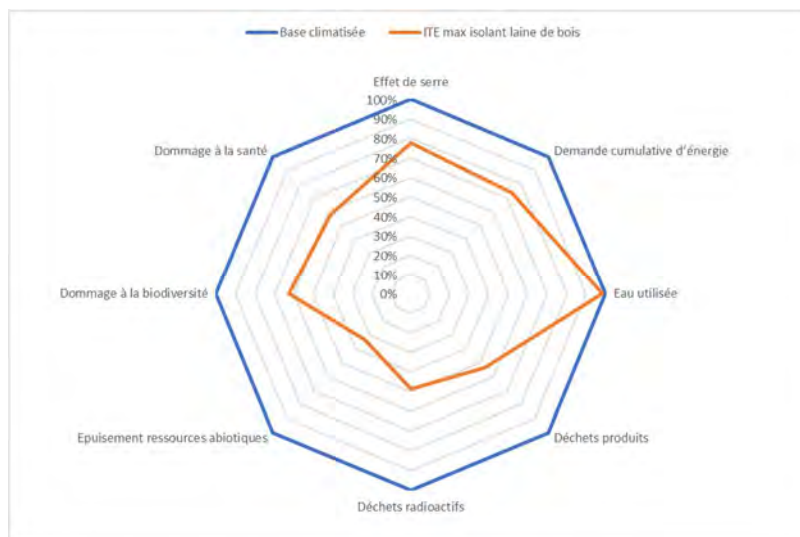


Figure 307 : Comparaison des impacts pour la variante ITE pour l'école ancienne

6.3.3.4. Variantes optimales bâti école ancienne

Cette variante cumule les mesures d'adaptation présentant les résultats les plus favorables sur le confort d'été, issues du livrable 4.

Variante	Menuiseries	Isolation	Ouverture des menuiseries
Base	Simple vitrage	Pas d'isolation	Ouverture manuelle
Optimale bâti	Double vitrage ou triple vitrage selon orientation	ITE Iso max	Ouverture automatique des menuiseries

De la même façon que pour l'ITE, la comparaison des variantes optimales se fera avec la base climatisée.

Sans système de rafraîchissement

Le bâtiment qui fait l'objet des mesures d'adaptation sur l'enveloppe, hors système de rafraîchissement, présentent des impacts largement inférieurs à la variantes non adaptée est climatisée. Les écarts sont compris entre 36 et 57 % pour la plupart des indicateurs d'impact. Seule la consommation d'eau potable reste stable.

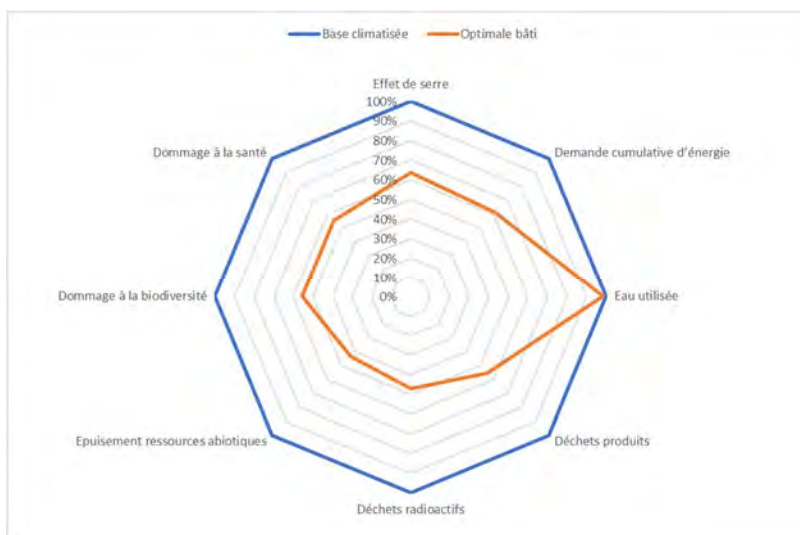


Figure 308 : Comparaison des impacts pour la variante optimale bâti sans rafraîchissement pour l'école ancienne

Avec système de rafraîchissement

Comme le montrent les résultats STD de la tâche 4, l'ajout de brasseurs d'air pour ce bâtiment, en plus de l'adaptation de l'enveloppe, permet d'assurer un confort d'été dans des conditions estivales sévères.

On note que l'impact de la mise en œuvre et de l'utilisation des ces brasseurs d'air ne modifie pas les conclusions précédentes : le bâtiment ainsi adapté continue d'avoir des impacts environnementaux sur le cycle de vie nettement plus faibles que le bâtiment de base non adapté et climatisé. Les niveaux d'impact sont très proches de la variante optimale bâti : l'ajout de brasseurs d'air change très peu les résultats.

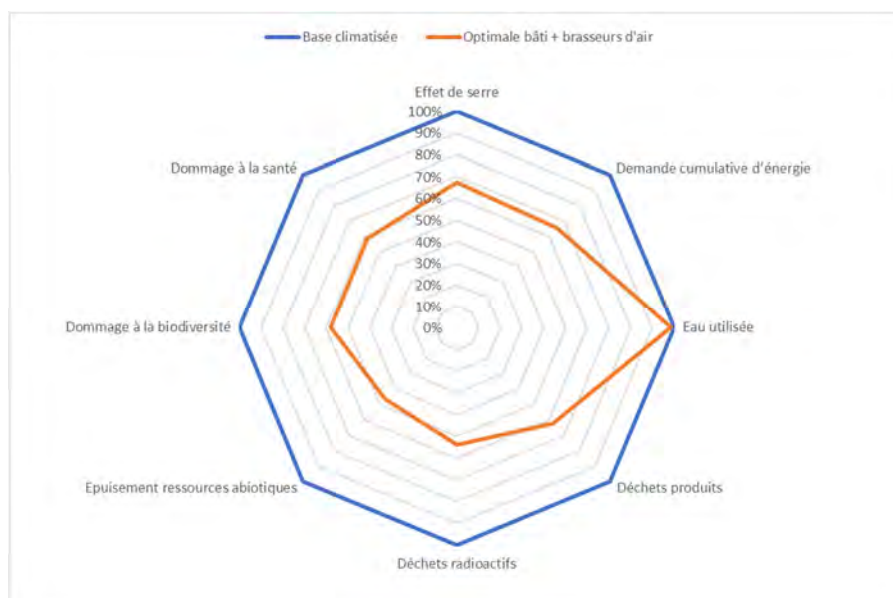


Figure 309 : Comparaison des impacts pour la variante optimale bâti avec brasseurs d'air pour l'école ancienne

6.3.3.5. Comparaison des différentes variantes

Comme pour les bureaux anciens, pour mieux comprendre les gains observés sur les diagrammes radar ci-dessus, le détail de trois indicateurs d'impact (effets de serre, les dommages à la biodiversité et les dommages à la santé) a été détaillé par étape du cycle de vie (construction, utilisation, rénovation et déconstruction).

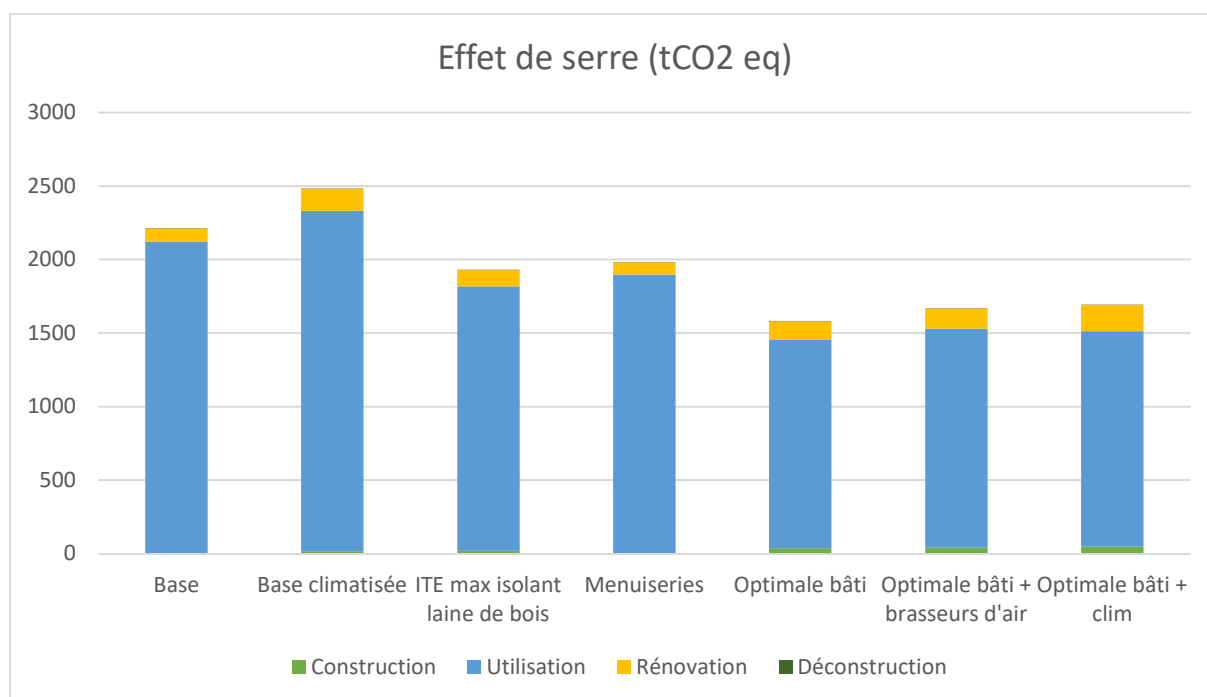


Figure 310 : Comparaison de l'impact effet de serre des variantes sur le cycle de vie pour l'école ancienne

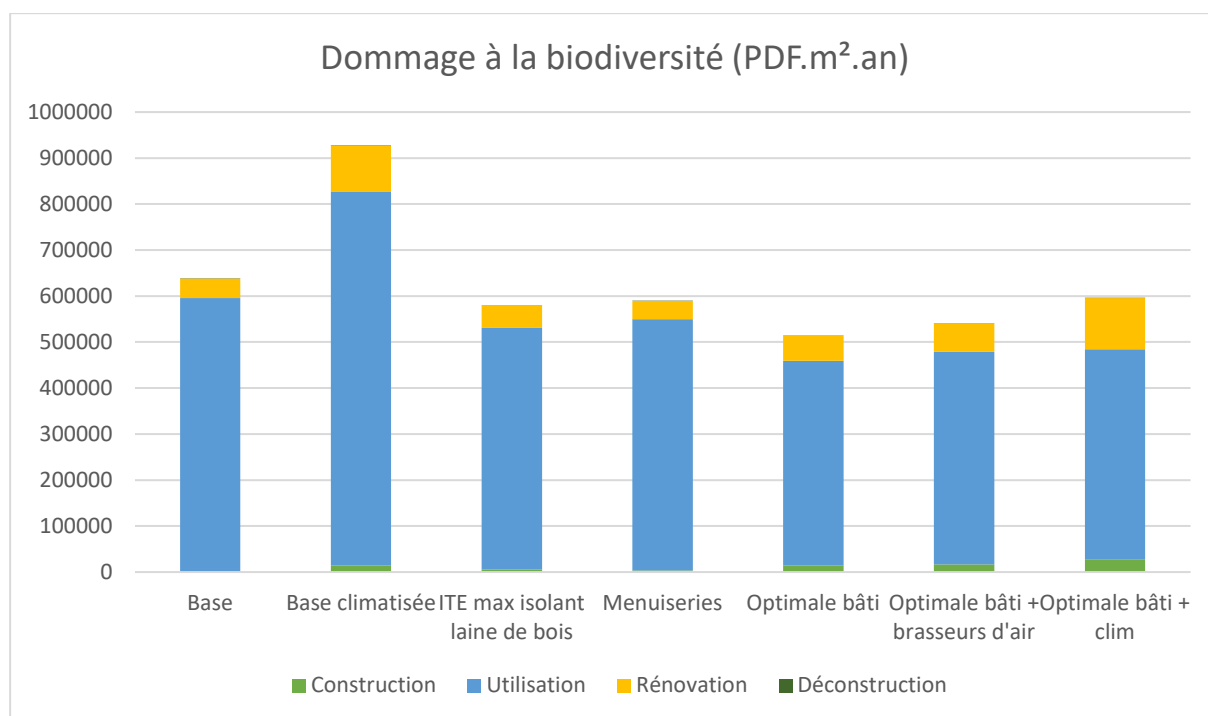


Figure 311 : Comparaison de l'impact dommage à la biodiversité des variantes sur le cycle de vie pour l'école ancienne

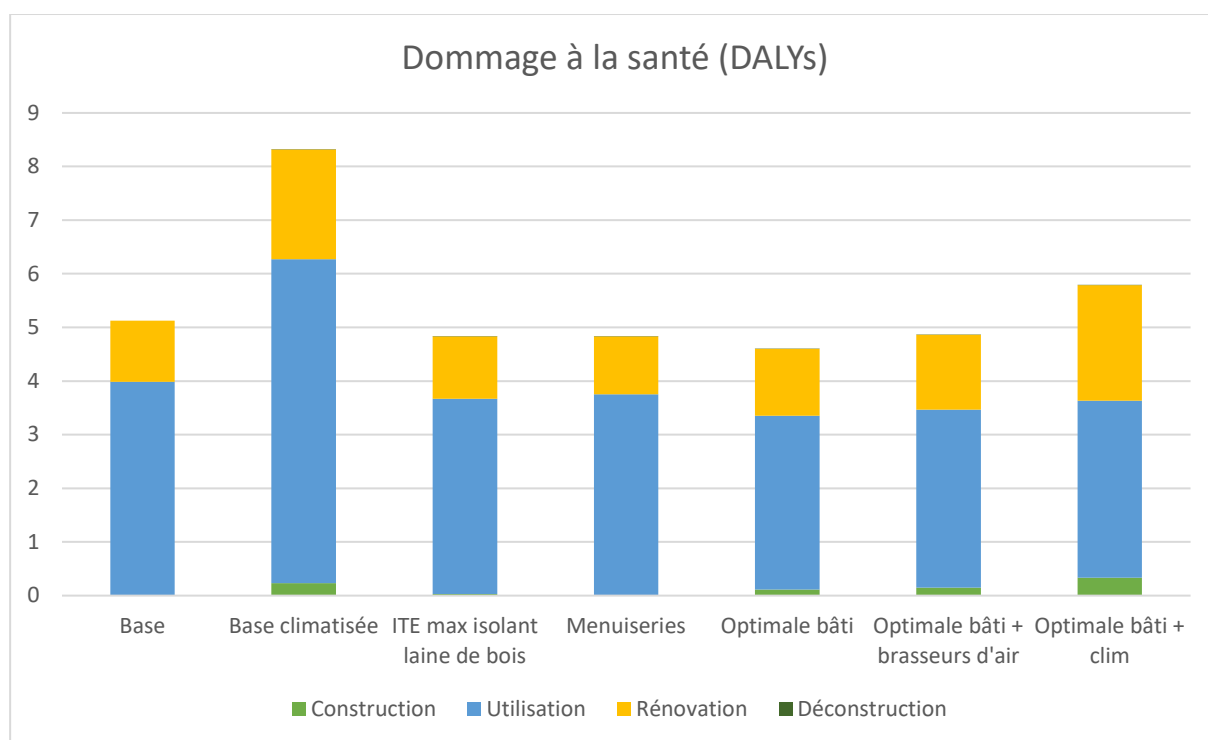


Figure 312 : Comparaison de l'impact dommage à la santé des variantes sur le cycle de vie pour l'école ancienne

L'étape utilisation est ici aussi celle qui contribue le plus aux impacts. Les contributions à cette étape sont détaillées dans le paragraphe suivant.

La contribution de l'étape de construction reste faible en comparaison des gains réalisés en étape d'utilisation, du fait de la baisse des consommations.

De même la contribution de l'étape rénovation est mesurée : faible pour l'impact effet de serre et dommage à la biodiversité, plus significatif pour l'impact dommage à la santé. Cette étape correspond aux remplacements réguliers des matériaux mis en œuvre à l'étape d'adaptation (isolants, menuiseries, systèmes de rafraîchissement)

Pour les 3 indicateurs examinés ici, les variantes d'adaptation au changement climatique présentent toutes des indicateurs inférieurs à la base climatisée.

Détail de l'étape utilisation

Une comparaison de l'effet des différents systèmes en étape d'utilisation a également été faite sur 3 indicateurs : l'effet de serre, le dommage à la biodiversité et le dommage à la santé. Les résultats se trouvent dans les graphiques ci-dessous.

Ici encore, c'est la baisse des consommations de chauffage qui explique la majeure partie des gains à l'étape utilisation

L'ajout de systèmes de rafraîchissement ne compense pas cette baisse, même pour la variante optimale bâti avec climatisation. Concernant les brasseurs d'air, leur effet sur l'environnement est minime.

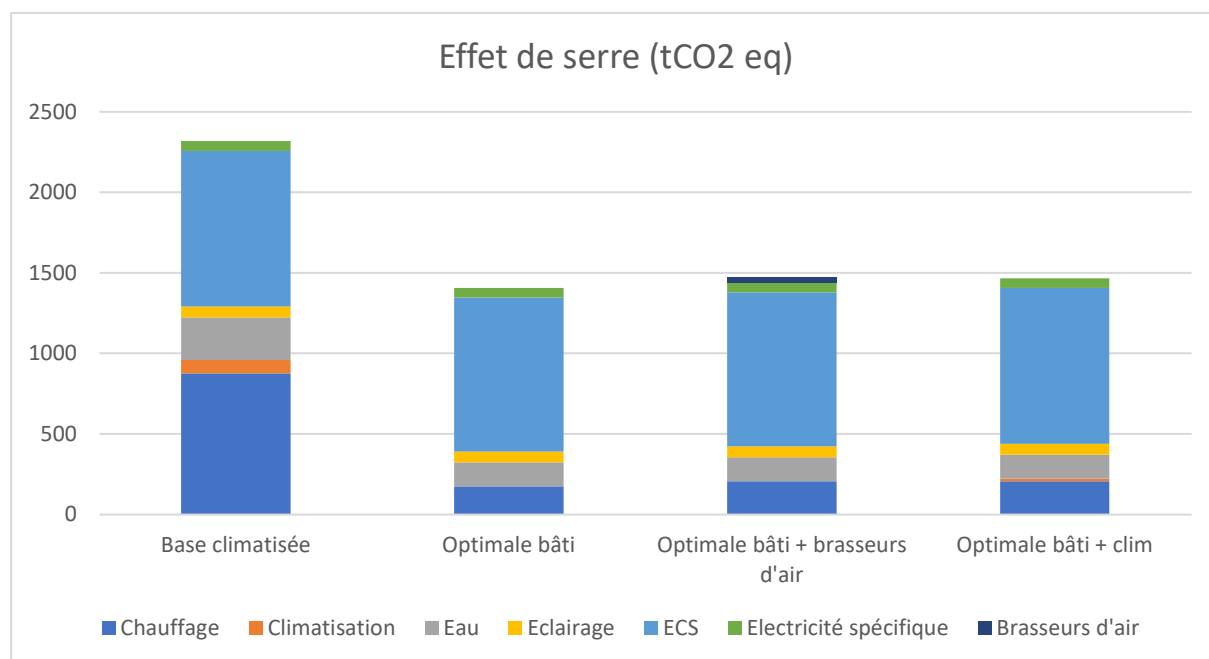


Figure 313 : Comparaison des contributions à l'effet de serre en phase utilisation pour les variantes école ancienne

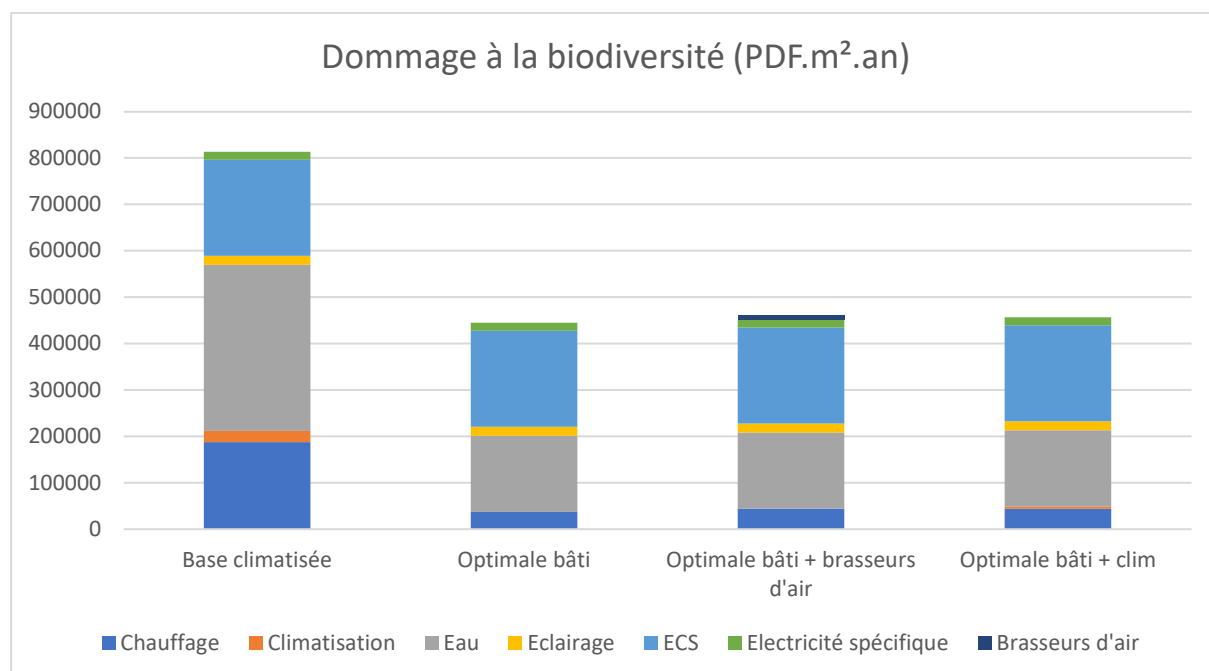


Figure 314 : Comparaison des contributions aux dommages à la biodiversité en phase utilisation pour les variantes école ancienne

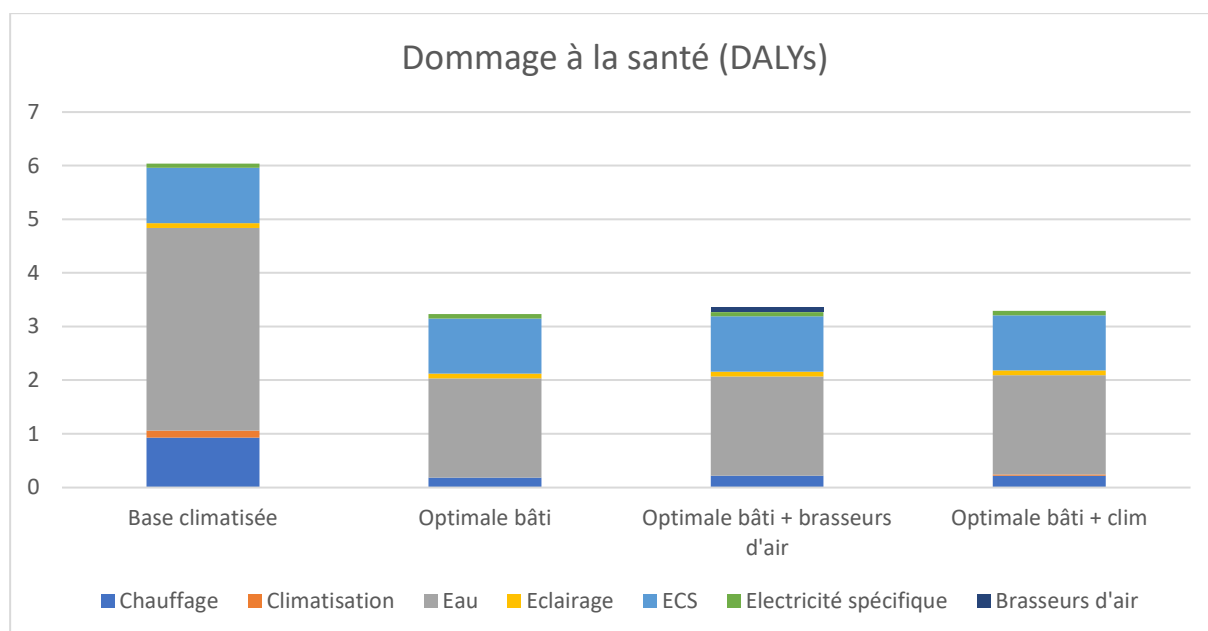


Figure 315 : Comparaison des contributions aux dommages à la santé en phase utilisation pour les variantes école ancienne

6.4. Conclusions et perspectives

L'Analyse du Cycle de Vie nous a permis de quantifier les impacts environnementaux liés à la rénovation des bâtiments, notamment en termes d'émissions de gaz à effet de serre. L'étude menée a montré que les impacts liés aux solutions mises en œuvre pour limiter les surchauffes (isolation thermique, remplacement des menuiseries avec des vitrages performants, sur-ventilation nocturne, protections solaires) sont largement compensés par la réduction des impacts liés au chauffage.

Les impacts étant calculés de l'extraction des matériaux jusqu'à leur fin de vie, on a pu montrer que les mesures d'adaptation au changement climatique proposées n'entraînent pas d'impacts environnementaux adverses sur le cycle de vie des bâtiments. Même avec des matériaux standards, les impacts liés à la mise en œuvre des mesures d'adaptation sont faibles vis-à-vis des gains obtenus lors de l'étape d'utilisation. Ces gains à l'étape d'utilisation sont principalement liés à la baisse des consommations de chauffage. L'usage de matériaux biosourcés réduit les impacts environnementaux, mais cette réduction reste limitée en valeur relative par rapport aux émissions sur le cycle de vie global des bâtiments.

Les solutions ont été optimisées en considérant l'indicateur de changement climatique, mais selon les évaluations sur les 8 indicateurs retenus dans l'étude, il n'y a pas de transfert d'impact.

De nombreuses hypothèses ont été émises, notamment sur le comportement des occupants des bâtiments. L'étude est également basée sur des données prospectives météorologiques, ainsi que des moyennes sur d'autres données comme le mix de production d'électricité. La prise en compte de tels scénarios prospectifs induit des incertitudes élevées, mais l'écart entre les bâtiments rénovés et non rénovés est très important, et les variations des paramètres incertains influenceraient d'une manière similaire les impacts des différentes solutions comparées : par exemple un mix plus carboné augmentera les émissions de gaz à effet de serre avec ou sans rénovation.

Par ailleurs, l'aspect économique de ces solutions est également étudié dans le cadre du projet (livrable 6), afin de compléter l'étude et donner un aspect plus réaliste aux recommandations. Il conviendra de visualiser l'étude dans son ensemble, afin d'affiner les interprétations, et ainsi pouvoir étudier les solutions d'adaptation dans leur globalité.

7. Evaluations économiques

7.1. Objectifs et Programme de Travail

7.1.1. Objectifs

Le programme de réhabilitation des bâtiments existants nécessite des investissements importants pour les rendre plus résilients aux impacts du changement climatique, par exemple si des protections solaires ou des équipements spécifiques doivent être mis en œuvre. C'est le cas également de mesures adaptées à la construction neuve. Cependant, cette adaptation a des coûts d'investissement et de fonctionnement qu'il est nécessaire de chiffrer afin de choisir la solution la plus efficiente à court, moyen et long terme par rapport aux bénéfices engendrés par la réhabilitation des bâtiments existants pour tous les acteurs aux niveaux économique, environnemental, social et sanitaire.

7.1.2. Programme de travail

Les coûts relatifs à l'adaptation des bâtiments s'inscrivent dans le cadre de stratégies générales d'adaptation, même s'il n'existe pas de doctrine réglementaire propre à la conception d'un bâtiment. L'analyse économique d'une mesure d'adaptation d'un bâtiment doit prendre en compte les impacts directs et indirects du changement climatique dans un contexte d'incertitude relatif à la survenue d'aléas climatiques ponctuels et/ou chroniques. L'augmentation continue des températures peut ainsi accélérer à long terme le vieillissement d'un bâtiment tandis que des vagues de chaleur plus ponctuelles vont affecter prioritairement les résidents à travers leur confort intérieur et leur facture énergétique. La nature des coûts d'investissement et de fonctionnement pour pallier ces aléas ne seront donc pas les mêmes.

Il n'existe pas de méthode générique pour évaluer les bénéfices procurés par les projets d'adaptation d'un bâtiment. Il conviendra donc de procéder à une analyse comparative des méthodes d'évaluation afin de choisir la plus adaptée aux besoins de l'étude. Les méthodes sont nombreuses et les hypothèses initiales multiples, selon que l'on cherche à s'adapter :

- à un scénario climatique optimiste (RCP 2.6) ou pessimiste (RCP 8.5)
- à un horizon à court ou plus long terme (2030, 2050, 2100)
- à des aléas fréquents ou non : le bâtiment s'adaptera-t-il préférentiellement à une canicule exceptionnelle (comme celle de 2003) ou bien à des vagues de chaleur de moindre intensité ?
- en maximisant les bénéfices ou non
- selon des degrés d'acceptabilité.

Des choix de scénarios, mêlant critères subjectifs et objectifs, seront donc établis à partir desquels seront appliquées les méthodes d'évaluation des coûts d'adaptation du bâtiment.

Cette tâche se déroulera donc selon la programmation suivante :

- Etat de l'art et choix méthodologiques

- Analyse comparative sur un échantillon de solutions des méthodes d'évaluation des coûts et des bénéfices notamment celles utilisées dans le domaine de la construction et dans d'autres secteurs tel que le calcul de la rentabilité économique des projets d'investissement dans le transport et la mobilité.
- Définition de situations de référence selon les scénarios climatiques envisagés notamment en tâche 3
- Quantification des coûts des mesures pour chaque archétype et chaque solution avec la méthode retenue
- Estimation des bénéfices (réduction de la facture énergétique des ménages, économie pour le système de soins, recettes fiscales liées aux emplois créés, réduction des émissions de GES, ...) et estimation des indicateurs de rentabilité socio-économique (TRI, VAN, bénéfice net pour chaque euro investi) pour un échantillon de solutions
- Rédaction du rapport de synthèse des coûts, bilan des méthodologies testées et étude des recommandations. Diffusion des résultats.

7.2. Etat de l'art

7.2.1. Impacts économiques (DS)

Les risques de surchauffe dans les bâtiments induisent des coûts très élevés liés aux atteintes à la santé d'une part, et à la baisse de productivité d'autre part. Le coût de la canicule de 2003 en termes de vies humaines perdues a été estimé à 500 millions d'euros (ONERC, 2009), mais la protection des personnes dépasse bien entendu cet aspect économique. Par ailleurs le coût lié à la baisse de productivité liées aux canicules dans les bureaux non climatisés pourrait atteindre plusieurs centaines de millions d'euros aux Pays Bas (Albers, 2015). L'estimation de ce coût (Costa, 2016) est encore plus importante : 2 milliards d'euros pour Londres et 2.5 milliards pour Bilbao. Les collectivités sont sensibilisées, quelques solutions sont envisagées comme la végétalisation des cours d'école ou l'utilisation de la fraîcheur du sous-sol (Mairie de Paris, 2017) mais des stratégies plus exhaustives seraient nécessaires.

7.2.2. Aspects socio-économiques (DS)

D'un point de vue socio-économique, les performances sont évaluées au regard des coûts d'investissement et de fonctionnement par rapport aux bénéfices attendus (De Perthuis et al., 2010). Ce ratio dépend toutefois de logiques quantitatives mais aussi de choix strictement subjectifs qu'il convient d'estimer. Ainsi, une étude a concerné l'acceptabilité des mesures d'adaptation au changement climatique dans les logements sociaux (Rodgers, 2015). L'implication des habitants est par ailleurs essentielle en ce qui concerne l'usage des protections solaires et la ventilation naturelle (ouverture des fenêtres) car les dispositifs automatisés sont rarement mis en œuvre.

7.3. Liste de mesures d'adaptation évaluées

Dans le cadre de ce projet, l'analyse économique a porté sur plusieurs solutions d'adaptations qui ont été chiffrées indépendamment. Il est possible pour chaque solution de choisir plusieurs paramètres comme le matériau utilisé, la méthode de réalisation ou différents paramètres de dimensionnement comme des épaisseurs d'isolant ou le nombre de vitrages.

Ainsi les solutions d'adaptation suivantes peuvent être chiffrées dans l'outil développé :

- Isolation par l'intérieur
- Isolation par l'extérieur
- Double ou triple vitrage
- Isolation des toits terrasses
- Isolation des combles
- Pose de volets

7.4. Chiffrage des solutions d'adaptation

Afin de chiffrer les solutions d'adaptation définies dans le cadre de cette étude, un outil de chiffrage a été développé prenant en compte les coûts disponibles en interne au sein de l'entreprise Vinci partenaire du projet ainsi que sur plusieurs sources de données professionnelles telle que BatiPrix (<https://www.batiprix.com/>).

De façon à comparer l'ensemble des solutions d'adaptation d'un point de vue économique, il a été nécessaire de chiffrer l'ensemble des mesures d'adaptation citées ci-dessus. Pour chaque solution a été pris en compte à la fois la fourniture en matériaux, en matériel et la main d'œuvre nécessaire pour réaliser les travaux.

Un outil ©Excel a été développé pour chiffrer les différentes solutions d'adaptation qui permet d'évaluer les coûts **minimums, moyens et maximums** et de combiner le coût de ces différentes solutions pour obtenir un coût total de rénovation. Pour chacune des solutions d'adaptation présentées ci-dessus il est possible de choisir plusieurs paramètres pour évaluer leur coût.

Prise de gabarit					Par m2			130,79 €	7%
Dépose de la fenêtre existante					150,00 € Par fenêtre			450,00 €	23%
Fourniture du vitrage	Double vitrage	6			155,00 € Par m2			- €	0%
Fourniture fenêtre	PVC		250,00 €	650,00 €	450,00 € Par fenêtre		750,00 €	1 950,00 €	68%
Étanchéité de la fenêtre	plastique isolant		10,00 €	30,00 €	20,00 € Par fenêtre		30,00 €	90,00 €	3%
Total							1 360,79 €	2 620,79 €	100%

Nombre de fenêtres	3
Surface de fenêtre (m2)	0

Figure 1 – Exemple de chiffrage de remplacement de fenêtres

Cette partie de l'outil permet de chiffrer le remplacement des fenêtres, il inclue la prise de gabarit qui dépend du nombre de m2, la dépose de la fenêtre existante, le changement de la fenêtre ainsi que la fourniture de la fenêtre du vitrage et de l'étanchéité. Le prix affiché prend en compte le nombre de fenêtres ainsi que leur surface.

Activités	Solution choisie	Epaisseur d'	Coûts unitaires minimums	Coûts unitaires maximums	Coûts unitaires moyens	Unité	Coût total minimum	Coût total maximum	Coût total moyen	Pourcentage
Dépose du parement actuelle	Mur endommagé					10 €/m2	860,00 €	860,00 €	860,00 €	15%
Fourniture et pose de l'isolant	Laine de roche	10			22,50 €/m2	1 935,00 €	1 935,00 €	1 935,00 €	33%	
Fourniture et pose du frein vapeur					10,00 €/m2	860,00 €	860,00 €	860,00 €	15%	
Fourniture et pose du parement	Plâtre		25,00 €	25,00 €	25,00 €/m2	2 150,00 €	2 150,00 €	2 150,00 €	37%	
Total							5 805,00 €	5 805,00 €	5 805,00 €	100%

Surface à isoler (m2)	86
Durée du chantier (j)	-
Périmètre (m)	47,2312

Figure 2 – Exemple de chiffrage d'isolation par l'intérieur

Le chiffrage de l'isolation par l'intérieur permet de prendre en compte la dépose du parement actuellement avec un chiffrage qui dépend de l'état actuel du mur à isoler. La fourniture et la pose de l'isolant, avec le choix du matériau, la pose du frein vapeur et finalement la pose et la fourniture du parement avec la possibilité de choisir le matériau. Le prix est calculé en fonction de la surface à isoler, de la durée du chantier et du périmètre des murs à isoler.

Activités	Solution choisie	Epaisseur d'isolant	Coûts unitaires minimum	Coûts unitaires maximum	Coûts unitaires moyens	Unité	Coût total minimum	Coût total maximum	Coût total moyen	Pourcentage
Démontage de l'isolant et/ou du parement existant			20,00 €	50,00 €	35,00 €		2 120,00 €	5 300,00 €	3 710,00 €	39%
Pose fourniture de l'isolant	Laine de verre	5			20,50 €		2 173,00 €	2 173,00 €	2 173,00 €	23%
Pose et fourniture du bardage	PVC		10,00 €	60,00 €	35,00 €/m2		1 060,00 €	6 360,00 €	3 710,00 €	39%
Chauffaudages/nacelle	-						- €	- €	- €	0%
Total							5 353,00 €	13 833,00 €	9 593,00 €	100%

Surface à isoler (m2)	106
Durée du chantier (j)	-
Périmètre (m)	47,2312

Si nacelle à louer

Figure 3 – Exemple de chiffrage d'isolation par l'extérieur

Il est également possible de chiffrer l'isolation par l'extérieur

Activités	Solution choisie	Coûts unitaires minimums	Coûts unitaires maximums	Coûts unitaires moyens	Unité	Coût total minimum	Coût total maximum	Coût total moyen	Pourcentage
Dépose de l'isolant et de l'étanchéité du toit terrasse		10,00 €	15,00 €	12,50 €/m2		5 000,00 €	7 500,00 €	6 250,00 €	4%
Nettoyage du toit terrasse		10,00 €	15,00 €	12,50 €/m2		5 000,00 €	7 500,00 €	6 250,00 €	4%
Achat de l'isolant	polyuréthane projeté	15,00 €	25,00 €	20,00 €/m2		7 500,00 €	12 500,00 €	10 000,00 €	7%
Pose de l'isolant		20,00 €	80,00 €	50,00 €/m2		10 000,00 €	40 000,00 €	25 000,00 €	17%
Achat de l'étanchéité	Goudron	30,00 €	40,00 €	35,00 €/m2		15 000,00 €	20 000,00 €	17 500,00 €	12%
Pose de l'étanchéité		30,00 €	70,00 €	50,00 €/m2		15 000,00 €	35 000,00 €	25 000,00 €	17%
Achat du revêtement	Gravier	50,00 €	80,00 €	65,00 €/m2		25 000,00 €	40 000,00 €	32 500,00 €	22%
Pose du revêtement		20,00 €	90,00 €	55,00 €/m2		10 000,00 €	45 000,00 €	27 500,00 €	18%
Total						92 500,00 €	207 500,00 €	150 000,00 €	100%

Surface à isoler (m2)	300
-----------------------	-----

Figure 4 – Exemple de chiffrage de toit terrasse

Rénovation									
SI ITI									
Prix minimum	Prix moyen	Prix maximum							
10 404,25 €	13 501,65 €	14 131,65 €							
SI ITE									
Prix minimum	Prix moyen	Prix maximum							
9 952,25 €	17 289,65 €	24 627,05 €							
Combles									
Prix minimum	Prix moyen	Prix maximum							
2 348,50 €	3 019,50 €	3 690,50 €							

Hypothèses							
Matériaux	Epaisseur	Parement	Vitrage	Fenêtre	Etanchéité	Volets	
Laine de roche	10	Plâtre	PVC	PVC	plastique isolant	PVC	Sans fil

Hypothèses							
Matériaux	Epaisseur	Bardage	Vitrage	Fenêtre	Etanchéité	Volets	
Laine de verre	5	PVC	Double vitrage	PVC	plastique isolant	PVC	Sans fil

Figure 5 – Exemple de chiffrage d'une solution de rénovation globale

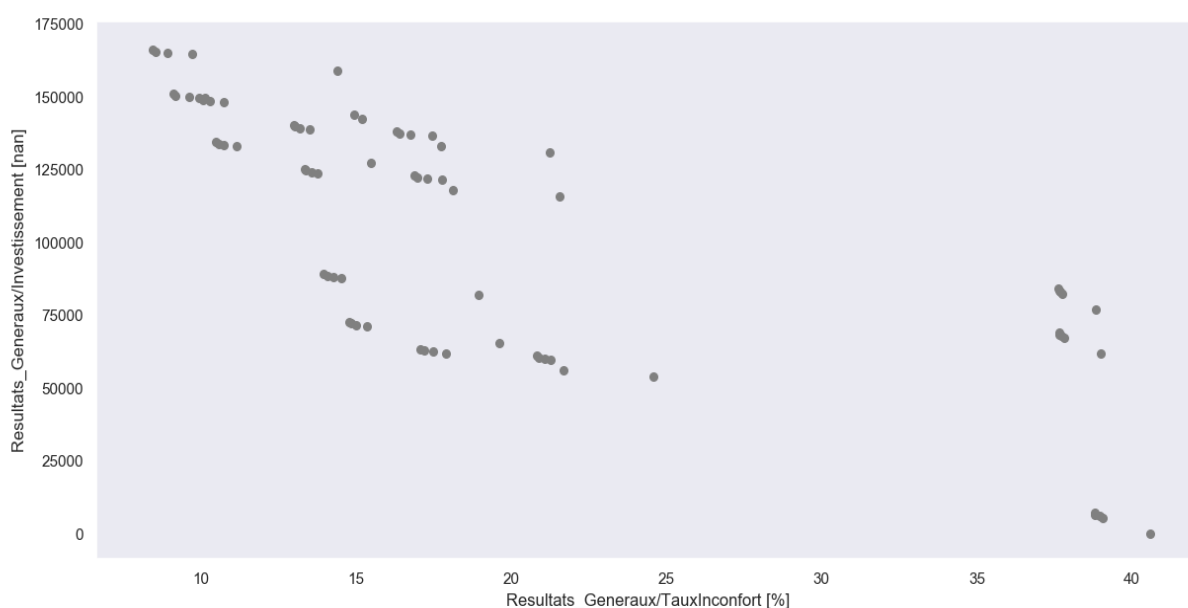
7.5.Méthodologie d'évaluation économique utilisée dans le cadre du projet RESILIANCE

Nous avons fait le choix dans le cadre de ce projet d'utiliser 3 outils de comparaison économique pour comparer les solutions d'adaptation entre elles. Alors que le diagramme de Pareto et le diagramme parallèle permettent d'aider le décideur à choisir une ou plusieurs solutions d'adaptation par rapport à 2 critères, comme les investissements dans l'exemple des diagrammes de Pareto ci-dessous. Ou plus de 2 critères avec les diagrammes parallèles où dans le cas présent on a fait jouer à la fois l'investissement, le taux d'inconfort, et plusieurs critères de dimensionnement techniques comme les épaisseurs d'isolant. Ainsi, ces 2 outils permettent de sélectionner plusieurs solutions entre elles par un rapport à un investissement mais ne prennent pas en compte les impacts économiques dans le temps. Pour cela, il est

possible d'effectuer une analyse coût-bénéfice qui est le troisième outil utilisé dans le cadre de ce projet pour comparer une ou plusieurs solutions d'adaptation

7.5.1. Les diagrammes de Pareto

Les diagrammes de Pareto permettent de comparer le coût de chaque solution avec la réduction de l'inconfort thermique liée à la mise en place des solutions d'adaptation (isolation par l'intérieur, isolation par l'extérieur, isolation des toitures, isolation des combles ou changement des vitrages par exemple). En ordonnée sont représentés les résultats du chiffrage donné par l'outil de chiffrage pour différentes combinaisons de solutions d'adaptation. En abscisse sont représentés les taux d'inconfort liés à chaque solution d'adaptation calculé dans Pléiade. Ainsi, ces diagrammes de Pareto permettent d'analyser de quelle manière un investissement permet d'impacter le taux d'inconfort en fonction de différentes combinaisons de solutions d'adaptation.



*Figure 6 - Étude coût / confort d'été – Rénovation ITI Haussmannien
A Paris Urbain Lointain, vague médiane, 10 vol/h nocturne*

L'exemple ci-dessus présente les résultats de l'application d'un diagramme de Pareto sur un immeuble haussmannien avec une isolation par l'intérieur. Chaque point représente une combinaison de solutions d'adaptation. Les points en bas à droite sont les solutions les moins chères et ayant un impact faible sur l'inconfort. Les points en haut à gauche sont les solutions permettant d'obtenir un haut niveau de confort thermique avec un investissement important. A l'inverse, les éléments en bas à gauche

sont les solutions les moins chères et les plus efficaces et en haut à droite les solutions les plus chères et n'ayant que peu d'impacts sur le niveau d'inconfort.

7.5.2. Les diagrammes parallèles

Les diagrammes parallèles permettent de sélectionner des options d'adaptation en fonction de certains critères comme des critères de coûts ou des critères de réduction d'inconfort thermique. Ils sont utiles pour avoir plus de détails sur les diagrammes de Pareto et pour affiner la prise de décision. Chaque barre verticale du diagramme parallèle correspond à l'un des critères de décision. En faisant évoluer le curseur de chacun des barres verticales on peut contraindre les solutions disponibles par rapport aux critères sélectionnés. Chaque ligne reliant chacun des critères (barres verticales) représente une solution d'adaptation validant l'ensemble des contraintes définies dans les barres verticales.

Par exemple, dans la figure ci-dessous, la barre verticale représente le taux d'inconfort a été contrainte pour ne sélectionner que les solutions d'adaptation permettant d'obtenir un taux d'inconfort entre 0 et 25%. Il aurait été possible d'ajouter d'autres contraintes sur les autres barres verticales et notamment sur les coûts d'investissement nécessaires.

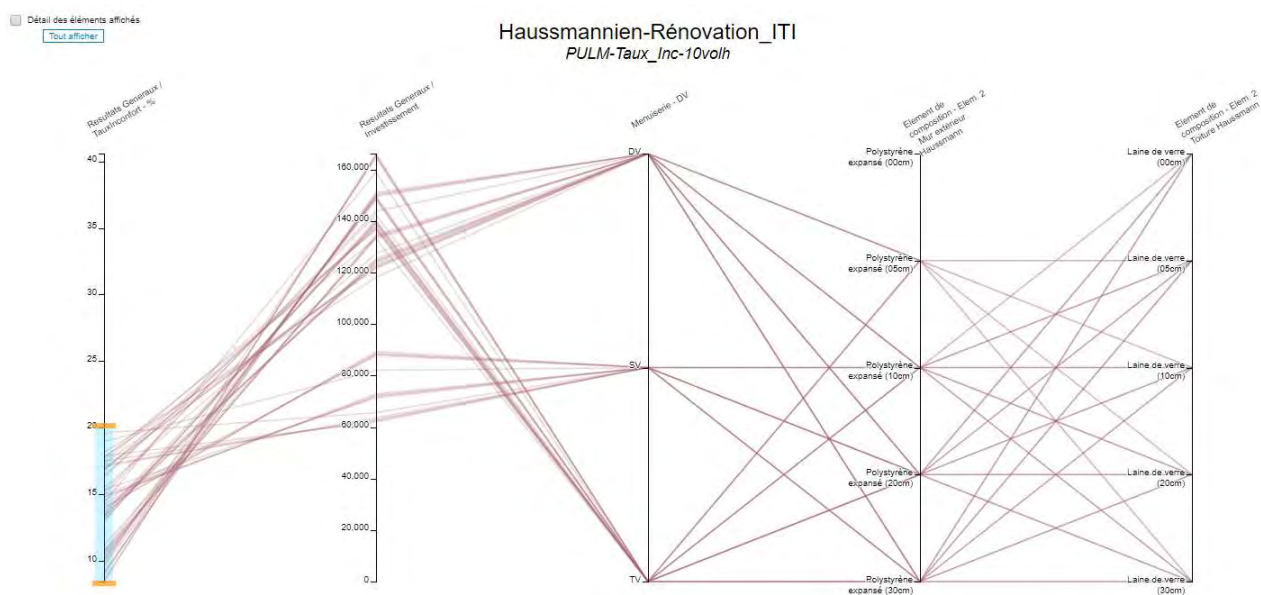


Figure 7 - Étude coût / confort – Rénovation ITI Haussmannienne Paris Urbain Lointain, vague médiane, 10 vol/h nocturne

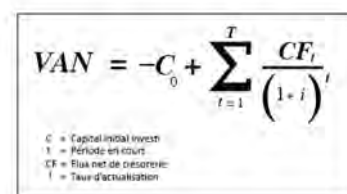
7.5.3. Les analyses coûts-bénéfices

Dans le but de mesurer l'intérêt économique de la rénovation thermique soutenue par le projet Résilience, nous avons réalisé une analyse coûts-bénéfices portant sur la solution de rénovation portant sur un bâtiment collectif HLM non isolé et à simple vitrage. Avec la solution de rénovation, il était question de désormais passer à un

double vitrage sur l'ensemble du bâtiment ainsi qu'à un isolant de 10cm pour les murs et la toiture.

L'analyse coûts bénéfiques a été réalisée à l'horizon de l'année 2100. Le but d'une telle projection était ici d'évaluer la rentabilité économique de l'investissement consenti à long terme. Étant donné que les bénéfices recherchés sont une diminution des coûts de chauffage du fait de la mise en place de l'isolation, l'analyse coût-bénéfices permettant d'évaluer la rentabilité des investissements dans le temps prend tout son sens. Cela est rendu possible grâce à l'application d'un taux d'actualisation servant à ramener les coûts et bénéfices futurs à leur valeur actuelle.

A la différence néanmoins d'une analyse coût-bénéfice classique, les bénéfices sont ici liés à du confort thermique et n'ont pas été quantifiés financièrement. Ainsi, les calculs de VAN (Valeur Actuelle Nette) sont toujours négatifs (il n'y a pas de bénéfices financiers). 2 scénarios sont comparés dans le cadre de cette analyse. Le premier scénario (scénario de référence) est sans travaux de rénovation, il est comparé avec un 2^{ème} scénario avec de la rénovation thermique du bâtiment HLM (toit, façades et fenêtres).


$$VAN = -C_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+i)^t}$$

C_0 = Capital initial investi
 T = Période en cours
 CF = Flux net de trésorerie
 i = Taux d'actualisation

Figure 316 – Calcul de la VAN

Des analyses de sensibilité ont également été menées pour évaluer les facteurs les plus critiques sur la rentabilité de l'investissement dans les solutions de rénovation en particulier sur l'investissement à réaliser ainsi que sur le prix du gaz qui est actuellement utilisé pour chauffer l'immeuble

7.5.3.1. Hypothèses prises

Dans le cadre nos calculs, nous avons pris des hypothèses sur les points suivants :

- La consommation d'énergie jusqu'à l'horizon 2100

Concernant l'estimation de consommation énergétique du bâtiment à l'horizon 2100, nous avons travaillé par régression linéaire entre la consommation actuelle et la consommation en l'an 2100. Cette dernière a elle-même été estimée en se basant sur les projections climatiques à l'horizon 2100 et plus précisément les températures attendues en hiver durant cette année.

- Le prix de l'énergie à l'horizon 2100

Ici, nous nous sommes appuyés sur les données fournies par l'INSEE, à savoir l'indice 2015 des prix à la consommation des logements, eau, gaz, électricités et autres combustibles. L'indice se calcule en pourcentage du prix d'une valeur de référence, en l'occurrence ici celle de Juin 2022.

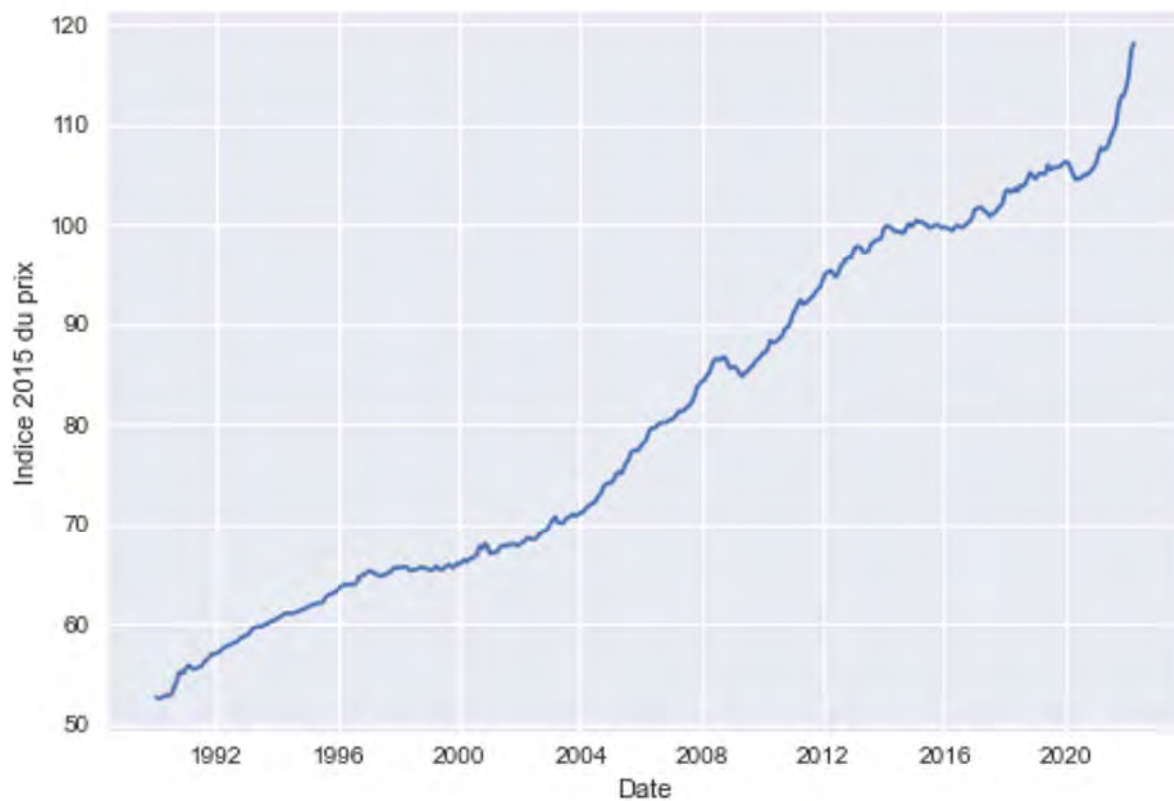


Figure 9 – Évolution de l'indice des prix

Dans la perspective d'appliquer des modèles de prédiction, nous avons besoin que les observations soient stationnaires dans le temps, c'est à dire que leur loi ne change pas avec le temps. Ici, il y a clairement une tendance croissante sur la série. Nous appliquons alors une transformation réversible à la série de valeurs afin d'obtenir une série stationnaire sur laquelle les modèles sont applicables.

Nous avons effectué les premières différences, à savoir :

$$Y_t = X_t - X_{t-1}$$

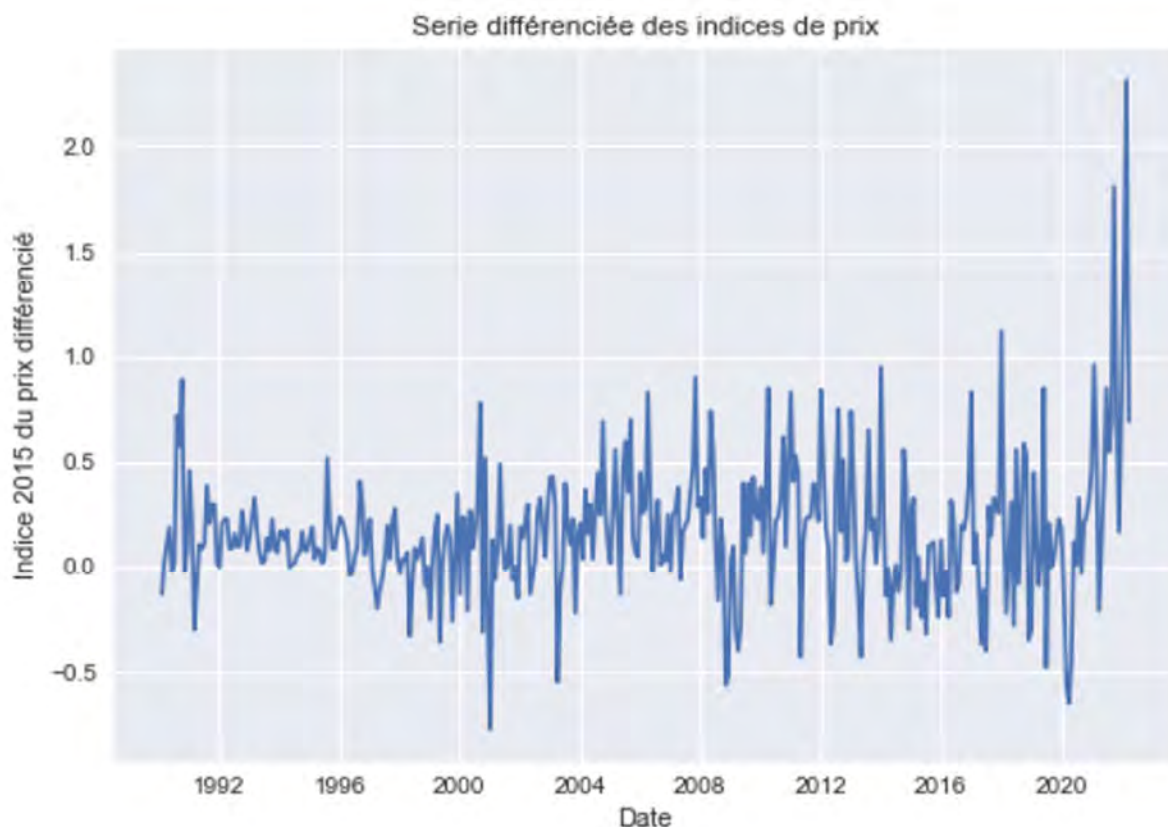


Figure 10 – Série différenciée

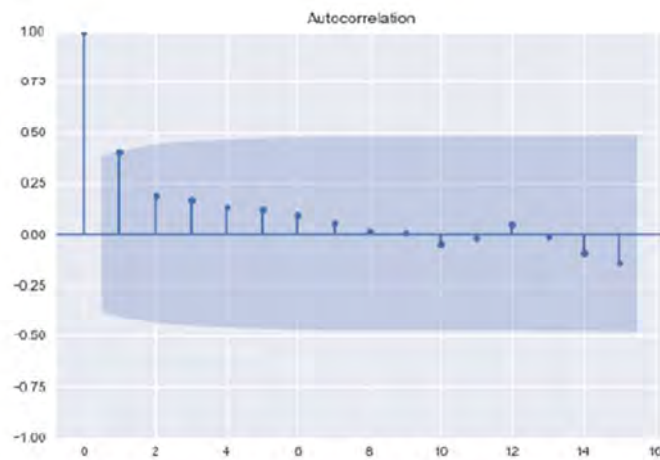
La croissance de la série d'origine se traduit dans la série différenciée par des valeurs dont la moyenne est le taux de croissance moyen de la série d'origine. C'est ce qu'on appelle la tendance linéaire de la série. Une fois celle-ci éliminée, la série obtenue est stationnaire, résultat confirmé par le test de Dickey-Fuller.

Test de Dickey-Fuller	
p-valeur	1.7e-11
statistique de test	-7.65
Valeurs critiques pour différents seuils	
1%	-3.45
5%	-2.87
10%	-2.57

Figure 11 – Test de Dickey-Fuller

La statistique de test est bien inférieure aux valeurs critiques pour les seuils de confiance usuels, donc le test rejette l'hypothèse de non stationnarité au seuil de confiance 1% (1% de chances que le test rejette l'hypothèse alors que la série n'est en réalité pas stationnaire).

Autocorrelation



Autocorrelation partielle

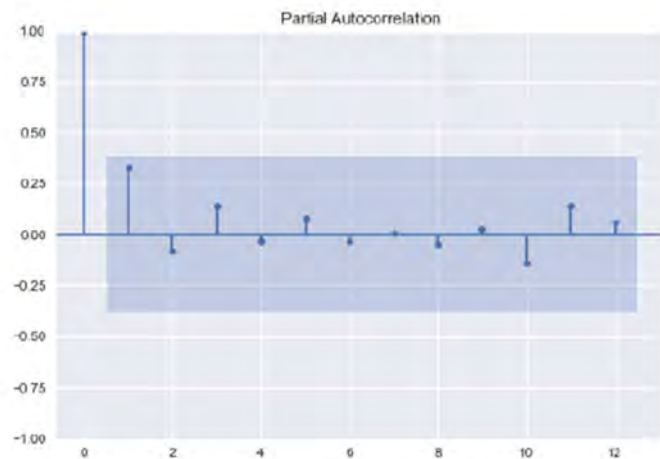


Figure 12 – Autocorrélation et autocorrélation partielle de la série à différents lags

La figure précédente montre les corrélations entre X_t et X_{t-h} (Autocorrélation) et les corrélations entre X_t et X_{t-h} en retirant les effets des variables $X_{t-1}, \dots, X_{t-h+1}$ (Autocorrélation partielle). Les bandes bleues correspondes aux bandes de confiance à 95% pour les autocorrélations et autocorrélations partielles empiriques d'un bruit blanc fort (variables gaussiennes indépendantes identiquement distribuées). Seul le lag 1 se rapproche de la frontière de la bande de confiance du premier graphique. Nous pouvons donc modéliser la série différenciée de la manière suivante :

$$Y_t = \epsilon_t - \alpha \epsilon_{t-1}$$

où les ϵ_t sont des chocs totalement imprévisibles jusqu'à la date t (inclusive) mais connus aux dates suivantes.

Après avoir trouvé le coefficient α optimal, on vérifie la qualité du modèle en regardant les résidus :

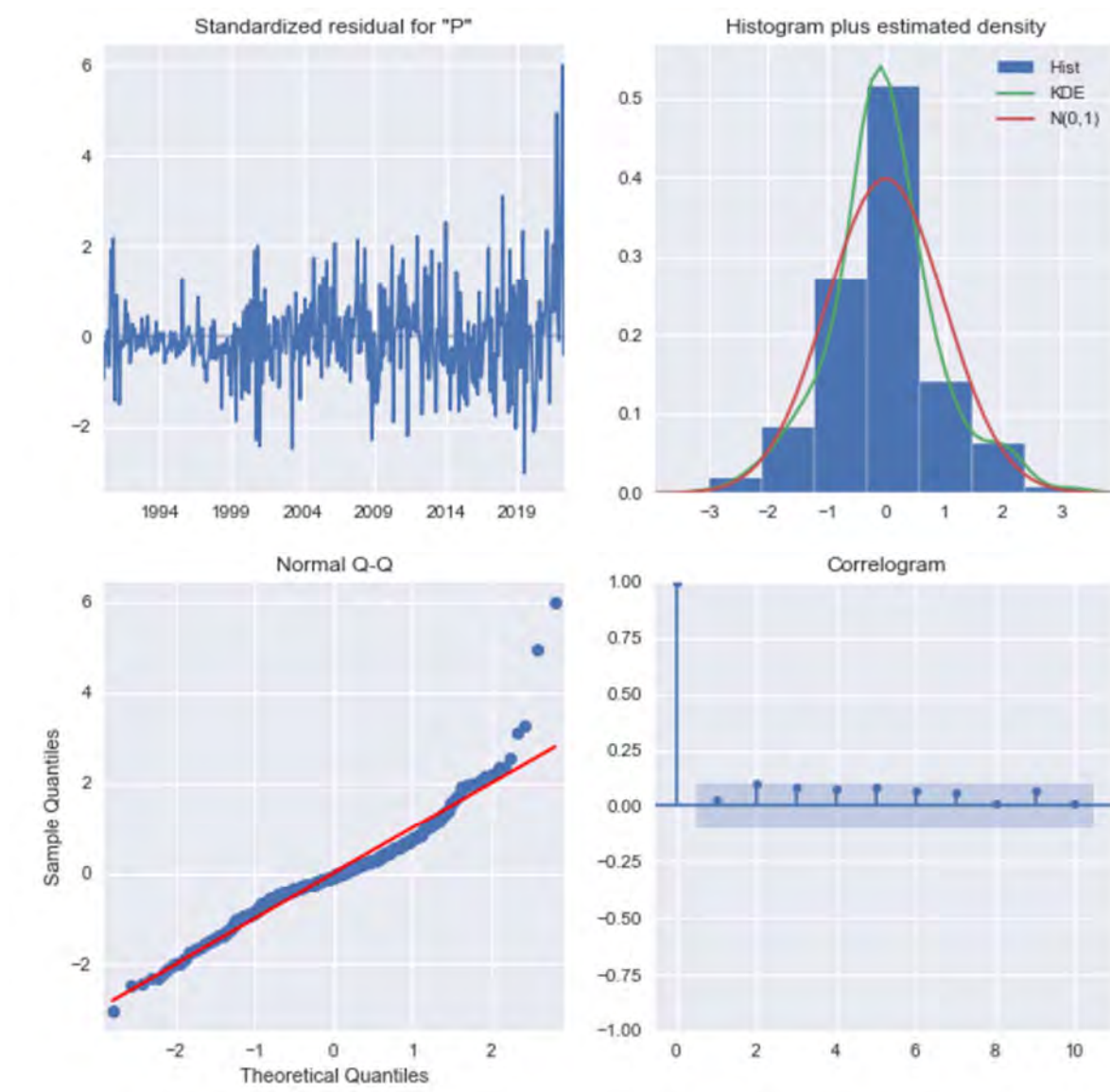


Figure 13

Les résidus obtenus sont très proches d'un bruit gaussien, les quantiles empiriques étant proches des quantiles théoriques d'une loi normale. Ce résultat est bon signe, car il signifie que ce que le modèle ne parvient pas à expliquer est proche d'un processus inexplicable.

Pour des prédictions de long terme, en l'absence de ϵ_t observés, le modèle ne peut expliquer la série plus que par sa tendance linéaire. On récupère enfin les prix réels depuis l'indice des prix en prenant ces pourcentages depuis le prix de référence. La

bande rouge représente l'intervalle de confiance à 95%, c'est-à dire que sous hypothèse que les résidus font bien un bruit blanc gaussien, les valeurs de la série temporelle ont à chaque date 95% de chances de rester dans la bande.

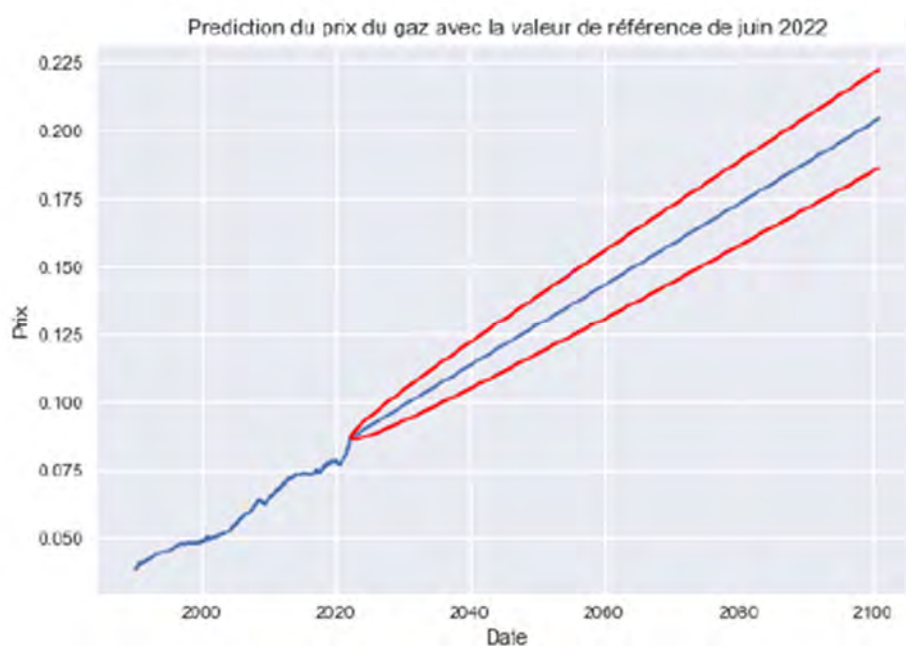


Figure 14 – Estimation du prix du gaz à l'horizon 2100

Prédictions des prix du kWh de gaz au tarif B1 en 2100 en €	
2100-01-01	0.202874
2100-02-01	0.202998
2100-03-01	0.203122
2100-04-01	0.203247
2100-05-01	0.203371
2100-06-01	0.203495
2100-07-01	0.203619
2100-08-01	0.203743
2100-09-01	0.203867
2100-10-01	0.203991
2100-11-01	0.204116
2100-12-01	0.204240

Figure 15 – Prédictions des prix du kWh de gaz au tarif B1 en 2100 en €

7.6. Calculs

A partir des différentes hypothèses présentées ci – dessus nous avons ensuite remplis le tableau présenté à la Figure 10 reprenant les coûts associés au chauffage à l’horizon 2100 dans le cas de travaux de rénovation ou non.

A l’aide de l’estimation de la consommation énergétique à l’horizon 2100 dans les deux cas (sans et avec prise en compte des travaux de rénovation) ainsi que le travail d’appréciation du prix de l’énergie à ce même horizon, nous avons pu déterminer les coûts associés au chauffage par simple multiplication.

Ces coûts sont ensuite mis en face de l’investissement initial nécessaire pour la réalisation des travaux de rénovation. En effet à partir de ces différents éléments, nous calculons le flux de trésorerie sur chaque année en utilisant la formule suivante :

$$\text{Flux de Trésorerie} = \text{Investissement} - \frac{(\text{Coûts}_{\text{Chauffage}} + \text{Coûts}_{\text{Maintenance}})}{(1 + i)^t}$$

Avec dans ce cas précis :

- t = La différence entre l’année considérée pour le calcul du flux de trésorerie et l’année d’investissement pour les travaux
- i = le taux d’actualisation que nous avons pris ici de 3,2 % selon France Stratégie.

Le calcul du flux de trésorerie sur chaque année jusqu’à l’an 2100 est effectué dans le cas où les travaux de rénovation sont réalisés et dans le cas où ils ne le sont pas. De ces valeurs, nous déterminons ensuite la Valeur Actuelle Nette en additionnant le flux de trésorerie déterminé annuellement.

Par ailleurs, les analyses de sensibilité ont permis de montrer que les évolutions du prix du gaz ont des impacts importants sur la date du retour sur investissement de la solution de rénovation choisi.

C’est d’autant plus le cas plus l’investissement est important. Cela est dû à l’actualisation des flux financiers pris en compte dans la VAN. Plus l’investissement est important, plus la durée du retour sur investissement est lointaine, or si le prix du gaz est plus bas alors la rentabilité des solutions de rénovation énergétique s’éloigne d’autant plus.

Le taux d’actualisation génère un effet « boule de neige » sur les écarts de flux financiers dans le temps. Cela est bien visible sur les graphiques de visualisation de la VAN (Figures 17,18 et 19) . De la même façon, les scénarios avec un prix du gaz qui augmente le moins est dans tous les cas le scénario le plus pessimiste avec un retour sur investissement éloigné.

D’autre part, une forte incertitude domine sur les coûts d’investissement à réaliser pour la rénovation du bâtiment qui dépend de la localisation du chantier, des

matériaux utilisés et des méthodes constructives mises en œuvre. Ainsi, 3 scénarios sont présentés ci-dessous à chaque fois accompagné d'analyses de sensibilité liées à l'évolution du prix du gaz : un montant maximum à 1 000 000 €, un montant médian à 800 000€, un montant minimum à 600 000€. En fonction des montants investis les montants économisés ainsi que les dates de retour sur investissement sont bien sûr très différents.

Figure 16 – Extrait de la table de calcul

Années	Investissement moyen	Chauffage						Flux de trésorerie (Sans Travaux)	Flux de trésorerie (Avec Travaux)	VAN	
		Prix moyen HT (€/kWh)	Consommation moyenne avant rénovation (kWh)	Coûts moyen Chauffage avant travaux (€)	Consommation moyenne après travaux (kWh)	Coûts moyen Chauffage après travaux (€)	Coût de maintenance (€)			Evolution de la VAN avec travaux (prix moyen)	Evolution de la VAN sans travaux (prix moyen)
2022	1 000 000,0 €	0,083379624	587196,9697	48960,2627	152373,7374	12704,8650	38636	-87 596,3 €	-1 051 340,8650 €	-1 051 340,8650 €	-87 596,2627 €
2023		0,088168979	585694,4444	51640,0812	151944,4444	13396,7865	39601,9	-88 412,8 €	-51 655,6399 €	-1 102 996,5049 €	-176 009,0351 €
2024		0,089658657	584191,9192	52377,8631	151515,1515	13584,6450	40591,9475	-88 317,6 €	-51 465,5911 €	-1 154 462,0959 €	-264 326,6282 €
2025		0,091148336	582689,3939	53111,1684	151085,8586	13771,2245	41606,74619	-87 698,1 €	-51 273,7351 €	-1 205 735,8310 €	-352 024,7001 €
2026		0,092638014	581186,8687	53839,9972	150656,5657	13956,5250	42646,91484	-87 072,1 €	-51 080,2932 €	-1 256 816,1242 €	-439 096,7892 €
2027		0,094127692	579684,3434	54564,3494	150227,2727	14140,5465	43713,08771	-86 440,4 €	-50 885,4760 €	-1 307 701,6002 €	-525 537,2391 €
2028		0,09561737	578181,8182	55284,2251	149797,9798	14323,2889	44805,91491	-85 803,9 €	-50 689,4836 €	-1 358 391,0838 €	-611 341,1596 €
2029		0,097107049	576679,2929	55999,6242	149368,6869	14504,7524	45926,06278	-85 163,2 €	-50 492,5061 €	-1 408 883,5899 €	-696 504,3891 €
2030		0,098596727	575176,7677	56710,5467	148939,3939	14684,9368	47074,21435	-84 519,1 €	-50 294,7243 €	-1 459 178,3142 €	-781 023,4579 €
2031		0,100086405	573674,2424	57416,9927	148510,1010	14863,8422	48251,06971	-83 872,1 €	-50 096,3095 €	-1 509 274,6237 €	-864 895,5541 €
2032		0,101576084	572171,7172	58118,9622	148080,8081	15041,4685	49457,34645	-83 222,9 €	-49 897,4243 €	-1 559 172,0480 €	-948 118,4895 €
2033		0,103065762	570669,1919	58816,4550	147651,5152	15217,8159	50693,78011	-82 572,2 €	-49 698,2229 €	-1 608 870,2708 €	-1 030 690,6680 €
2034		0,10455544	569166,6667	59509,4714	147222,2222	15392,8842	51961,12461	-81 920,4 €	-49 498,8513 €	-1 658 369,1221 €	-1 112 611,0548 €
2035		0,106045118	567664,1414	60198,0111	146792,9293	15566,6736	53260,15273	-81 268,1 €	-49 299,4477 €	-1 707 668,5698 €	-1 193 879,1462 €
2036		0,107534797	566161,6162	60882,0743	146363,6364	15739,1839	54591,65655	-80 615,8 €	-49 100,1429 €	-1 756 768,7128 €	-1 274 494,9423 €
2037		0,109024475	564659,0909	61561,6610	145934,3434	15910,4152	55956,44796	-79 964,0 €	-48 901,0605 €	-1 805 669,7732 €	-1 354 458,9188 €
2038		0,110514153	563156,5657	62236,7710	145505,0505	16080,3675	57355,35916	-79 313,1 €	-48 702,3171 €	-1 854 372,0903 €	-1 433 772,0013 €
2039		0,112003832	561654,0404	62907,4046	145075,7576	16249,0407	58789,24314	-78 663,5 €	-48 504,0229 €	-1 902 876,1132 €	-1 512 435,5405 €
2040		0,11349351	560151,5152	63573,5615	144646,4646	16416,4350	60258,97422	-78 015,7 €	-48 306,2816 €	-1 951 182,3947 €	-1 590 451,2876 €
2041		0,114983188	558648,9899	64235,2419	144217,1717	16582,5502	61765,44857	-77 370,1 €	-48 109,1909 €	-1 999 291,5857 €	-1 667 821,3720 €
2042		0,116472866	557146,4646	64892,4458	143787,8788	16747,3864	63309,58479	-76 726,9 €	-47 912,8428 €	-2 047 204,4285 €	-1 744 548,2785 €
2043		0,117962545	555643,9394	65545,1731	143358,5859	16910,9436	64892,32441	-76 086,5 €	-47 717,3237 €	-2 094 921,7522 €	-1 820 634,8266 €
2044		0,119452223	554141,4141	66193,4238	142929,2929	17073,2218	66514,63252	-75 449,3 €	-47 522,7145 €	-2 142 444,4667 €	-1 896 084,1503 €
2045		0,120941901	552638,8889	66837,1980	142500,0000	17234,2209	68177,49833	-74 815,5 €	-47 329,0913 €	-2 189 773,5580 €	-1 970 899,6785 €
2046		0,12243158	551136,3636	67476,4956	142070,7071	17393,9411	69881,93579	-74 185,4 €	-47 136,5250 €	-2 236 910,0830 €	-2 045 085,1163 €
2047		0,123921258	549633,8384	68111,3166	141641,4141	17552,3822	71628,98418	-73 559,3 €	-46 945,0821 €	-2 283 855,1651 €	-2 118 644,4276 €
2048		0,125410936	548131,3131	68741,6611	141212,1212	17709,5443	73419,70879	-72 937,4 €	-46 754,8244 €	-2 330 609,9895 €	-2 191 581,8178 €
2049		0,126900614	546628,7879	69367,5291	140782,8283	17865,4274	75255,20151	-72 319,9 €	-46 565,8098 €	-2 377 175,7993 €	-2 263 901,7176 €

7.7. Résultats : Valeur Actuelle Nette (VAN) et Taux de Rendement Interne (TRI)

7.7.1. Résultats avec un investissement de 600 000 €

Le graphique ci-dessous correspond à un scénario où l'investissement est de 600 000€ pour la réalisation des travaux de rénovation. Les courbes en couleurs claires (vert clair, bleu clair et rouge clair) représentent le scénario avec travaux de rénovation alors que les courbes en couleurs foncées (bleu foncé, rouge foncé et bleu foncé) représentent le scénario sans travaux de rénovation. L'année où la situation se rentabilise est matérialisée par le croisement des courbes. Avec cette hypothèse d'investissement on remarque donc que l'investissement commence à être rentable à partir de 2038 pour le scénario prix du gaz moyen et prix du gaz maximum soit au bout de 16 ans. Et à partir de 2041 soit 19 ans pour le scénario avec un prix du gaz minimum.

On remarque que dans ce cas le prix du gaz n'a pas un grand impact sur l'année à partir de laquelle l'investissement est rentable (en comparé des autres scénarios d'investissement comme nous allons le voir). L'économie réalisée en 2100 correspond à 967k€ pour le scénario avec le prix du gaz minimum, 1 222k€ pour le scénario avec le prix du gaz maximum et 1 131k€ avec le scénario du prix du gaz moyen.

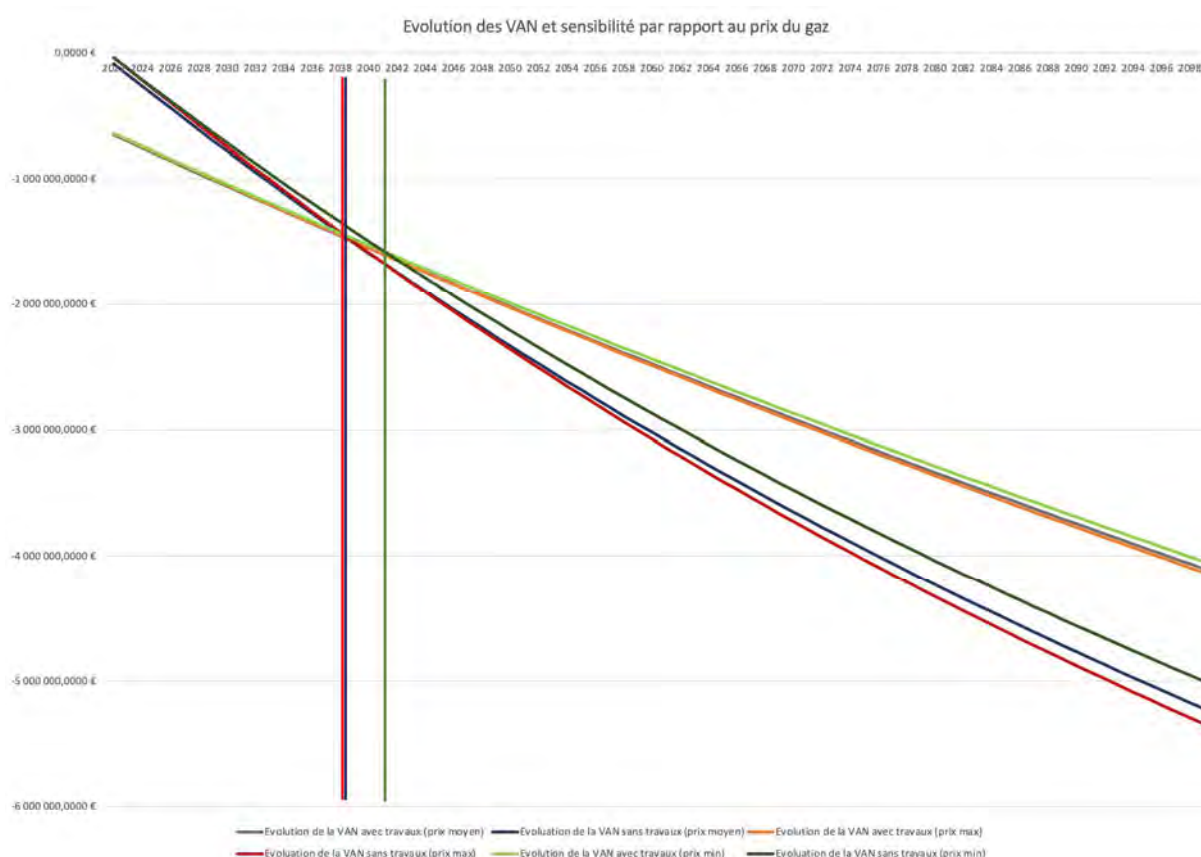


Figure 17 – Evolution de la VAN avec un investissement de 600 000 €

La VAN des 2 projets étant négatives, le TRI est calculé ici en faisant la différence entre les VAN du projet avec travaux et celle du projet sans travaux. Pour que cette valeur soit utile il faudrait pouvoir la comparer avec un autre scénario de travaux rénovation énergétique du bâtiment composé de solutions d'adaptation différentes et avec un même niveau de réduction d'inconfort thermique afin de pouvoir choisir entre les 2 solutions.

Toujours est-il que pour ce scénario d'investissement le TRI varie entre 3,8% pour le scénario avec un prix du gaz minimum et 4,8% pour un scénario avec un prix du gaz élevé à moyen.

7.7.2. Résultats avec un investissement de 800 000 €

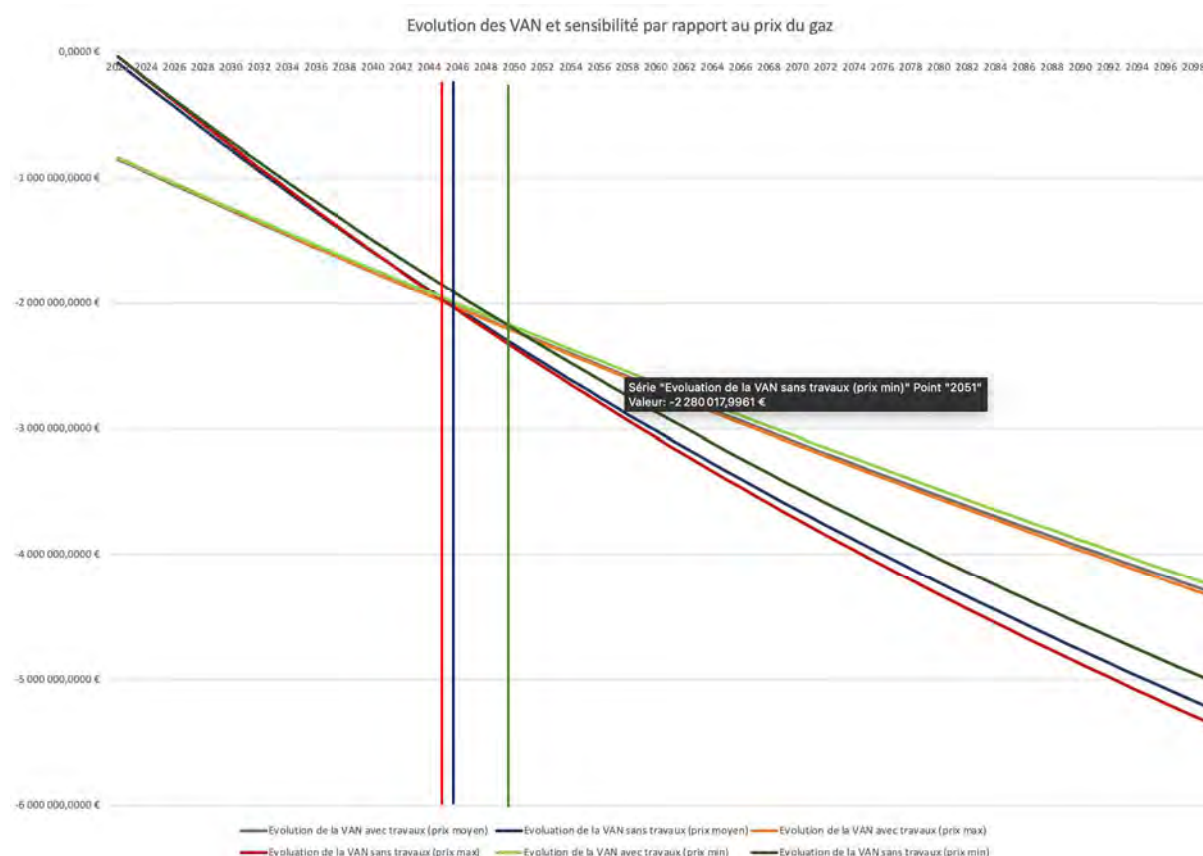


Figure 18 – Evolution de la VAN avec un investissement de 800 000 €

Dans le scénario où l'investissement est de 800 000€ pour la réalisation des travaux de rénovation énergétique, l'investissement commence à être rentable à partir de 2045 pour le scénario avec le prix du gaz maximum, 2046 pour le scénario avec le prix du gaz moyen et 2050 pour le scénario avec le prix du gaz minimum.

Dans ce cas, l'impact des variations du prix du gaz commence à se faire ressentir plus sérieusement avec des décalages d'année de rentabilité plus importants que dans le scénario d'investissement précédent. Les économies en 2100 sont de 767k€ pour le

scénario avec le prix du gaz minimum, de 1 022k€ pour le scénario avec le prix du gaz maximum et de 931k€ pour le scénario avec un prix du gaz moyen.

La VAN des 2 projets étant négatives, le TRI est calculé ici en faisant la différence entre les VAN du projet avec travaux et celle du projet sans travaux. Pour que cette valeur soit utile il faudrait pouvoir la comparer avec un autre scénario de travaux rénovation énergétique du bâtiment composé de solutions d'adaptation différentes et avec un même niveau de réduction d'inconfort thermique afin de pouvoir choisir entre les 2 solutions.

Toujours est-il que pour ce scénario d'investissement le TRI varie entre 1,6% pour le scénario avec un prix du gaz minimum, 2,6% pour un scénario avec un prix du gaz maximum et 2,5% pour un prix du gaz moyen.

7.7.3. Résultats avec un investissement de 1 000 000 €

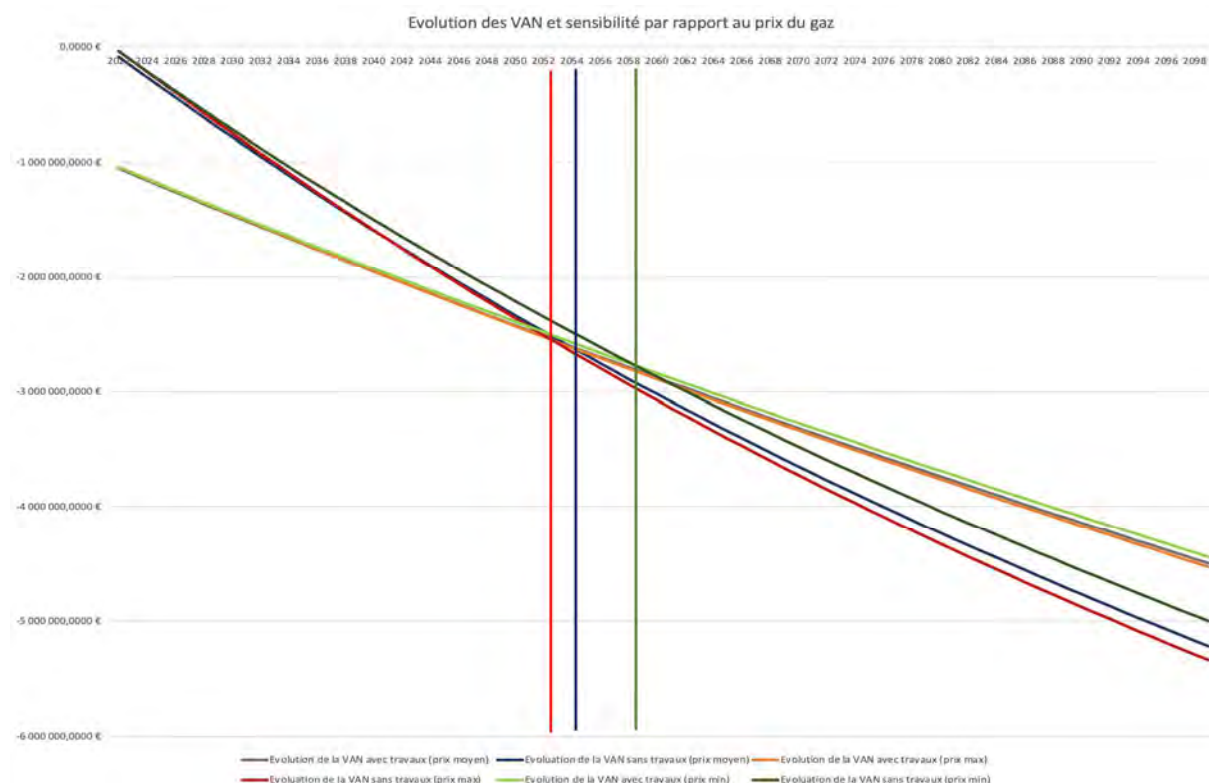


Figure 19 – Evolution de la VAN avec un investissement de 1 000 000 €

Le scénario avec un investissement de travaux de 1 000 000€ est bien sûr le moins rentable. Dans ce scénario en revanche, l'impact du prix du gaz est plus important sur les points de rentabilité. Ce point est atteint à partir de 2052 soit après 30 ans pour le scénario avec le prix du gaz maximum, au bout de 32 ans pour le scénario avec le prix du gaz moyen et au bout de 36 avec un prix du gaz minimum. Les économies en 2100 sont de 567k€ avec le scénario du prix du gaz minimum, de 822k€ dans le scénario avec un prix du gaz maximum et de 731k€ avec un prix du gaz moyen.

La VAN des 2 projets étant négatives, le TRI est calculé ici en faisant la différence entre les VAN du projet avec travaux et celle du projet sans travaux. Pour que cette valeur soit utile il faudrait pouvoir la comparer avec un autre scénario de travaux rénovation énergétique du bâtiment composé de solutions d'adaptation différentes et avec un même niveau de réduction d'inconfort thermique afin de pouvoir choisir entre les 2 solutions.

Toujours est-il que pour ce scénario d'investissement le TRI varie entre -0,8% pour le scénario avec un prix du gaz minimum, 0,8% pour un scénario avec un prix du gaz maximum et 0,6% pour un prix du gaz moyen.

7.8. Conclusions

D'après nos travaux, nous pouvons voir que plus l'investissement effectué pour les travaux de rénovation sont importants, plus il faudra de temps pour que ces derniers soient rentables. En effet, pour un investissement de 600 000 € la rentabilité est atteinte à partir de 16 ans après lieu au plus tôt et jusqu'à 19 ans après au plus tard. A contrario, pour un investissement maximum de 1 000 000€, il faudrait patienter au minimum 30 ans et au maximum 36 ans pour atteindre le point de rentabilité.

De nos calculs, nous remarquons aussi que plus l'investissement est important, plus le point de rentabilité est sensible à l'évolution du prix du gaz. Et de par le contexte géopolitique actuel, l'évolution du prix du gaz représente un facteur majeur à ne pas négliger dans la lecture et la compréhension de cette étude. De la même manière que l'évolution du prix du gaz, cette étude ne prends pas aussi en compte une modification du taux d'actualisation.

Enfin, l'étude et les résultats présentés se basent sur les besoins et la consommation en chauffage uniquement. Il est important de noter qu'ils ne traitent pas des besoins et de la consommation en climatisation.

8. Recommandations

8.1. Objectifs du rapport

Le changement climatique impose d'adapter les bâtiments pour assurer un niveau de confort suffisant durant des périodes de canicule de plus en plus longues et fréquentes. L'enjeu est de parvenir à adapter les bâtiments à moindre coût et à moindre impact environnemental, en construction neuve mais aussi en ce qui concerne le parc existant.

L'objectif du projet « Resilience » est de conduire une évaluation multicritère de cette adaptation des bâtiments pour le contexte climatique de la France métropolitaine. L'impact des mesures d'adaptation a été évalué en termes de confort d'été par simulation thermique dynamique (STD), les impacts sur l'environnement ont été évalués par analyse du cycle de vie et une analyse économique a également été conduite.

Ces travaux ont été menés par un groupement coordonné par ARMINES, comprenant le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), le CNRM (Centre national de recherches météorologiques), IZUBA Energies et Resalliance by SIXENSE, une entreprise du groupe VINCI.

L'objectif du présent rapport est de synthétiser les principaux enseignements à destination des pouvoirs publics et des professionnels de la construction : maîtres d'ouvrage, concepteurs, entreprises, filières industrielles notamment.

Pour faciliter l'appropriation et la diffusion des résultats, les éléments sont présentés en deux temps :

- Un rappel rapide de la méthodologie retenue pour chaque étape du projet,
- Les enseignements tirés des résultats du projet : éléments de constat et recommandations

8.2. Synthèse de la méthodologie du projet

8.2.1. Etat de l'art et principaux choix méthodologiques

Le travail a tout d'abord consisté à recenser les travaux de recherche existants sur l'établissement de données climatiques prospectives, sur l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les bâtiments et sur les indicateurs de performance.

Puis les choix méthodologiques principaux du projet ont été établis. Ces choix méthodologiques sont détaillés dans les paragraphes ci-après.

8.2.2. Mesures in situ

Le CEA a mené des travaux d'évaluation de l'inconfort d'été sur des bâtiments réels, occupés et instrumentés tels que les maisons COMEPOS ou le bâtiment de bureaux HELIOS, afin de tester la pertinence de l'indicateur vis-à-vis du confort réel ressenti par les occupants.

L'indicateur d'inconfort "degrés-heures" (DH) a été calculé sur la base des mesures, dans différentes configurations : prise en compte de brasseurs d'air à différentes vitesses, différents scénarii d'occupation. Enfin, le ressenti des occupants a été confronté aux indicateurs calculés lorsque les retours des enquêtes d'opinion le permettaient.

Les résultats obtenus sur ces sites réels et équipés de systèmes d'enregistrement de mesures ont permis d'élaborer un mode de calcul d'indicateurs d'inconfort pour le site plus représentatif du ressenti des occupants, en fonction notamment de leur usage et de leur occupation. Les résultats permettent également de cibler les principales pièces à considérer, ainsi que les créneaux horaires aux cours desquels les conditions de températures sont le plus sujettes à un inconfort chaud. Enfin, ils fournissent quelques éléments de réflexion pour le choix de mesures palliatives adaptées.

8.2.3. Élaboration de données climatiques prospectives

Le CNRM a établi une méthodologie d'élaboration des données climatiques prospectives. La méthodologie retenue repose sur une approche combinant différentes simulations climatiques à haute résolution pour créer des fichiers de forçages climatiques, c'est-à-dire qu'il s'agit d'utiliser un modèle

numérique de climat régional pour produire une année type en climat futur à partir de longues séries temporelles.

La méthodologie retenue a pour but de recréer une année considérée comme typique du climat futur moyen pour un horizon temporel donné (milieu et fin du XXI^e siècle). De plus, pour évaluer la réponse des bâtiments à des événements thermiques extrêmes, des vagues de chaleur d'intensités variables sont également ajoutées aux forçages moyens :

- Une vague de chaleur « médiane », dont la durée et la sévérité sont les plus proches des médianes des durées et des sévérités des vagues de chaleur présentes dans les simulations climatiques étudiées.
- Une vague de chaleur extrême, qui correspondent cette fois à la vague de chaleur la plus proche du quantile 95 des simulations climatiques étudiées.

La méthode repose sur deux axes distincts :

- les conditions climatiques « typiques » en climat futur sont fournies par analyse statistique d'un ensemble de projections climatiques produites par les modèles climatiques régionaux de l'ensemble EURO-CORDEX (Jacobs et al., 2014). C'est le scénario RCP 8.5 qui est retenu.
- les données météorologiques horaires en climat futur sont produites à partir du modèle de climat régional à haute résolution AROME, version climatique du modèle de prévision numérique du temps développé par Météo-France et le CNRM (Seity et al. 2011).

Deux zones climatiques distinctes ont été sélectionnées pour cette étude : la région parisienne pour représenter un climat plutôt intermédiaire et la région de Nîmes pour représenter un climat méditerranéen, plus extrême en termes de températures estivales. Pour chacune de ces zones, les points de grille des modèles les plus proches des stations RADOME (réseau Météo-France opérationnel) servant de référence rurale pour chacune des régions d'étude sont choisis (station de Chartres (28) pour Paris et station de Pujaut (30) pour Nîmes). En plus de ces points ruraux, les points les plus proches des villes étudiées sont également utilisés pour produire les forçages représentant l'influence de la ville.

16 fichiers météorologiques complets ont ainsi été produits qui croisent les paramètres suivants :

- Deux zones climatiques : Paris et Nîmes
- Deux horizons temporels : futur proche (2020-2049) et futur lointain (2070-2099), nommés ci-dessous 2050 et 2100
- Deux niveaux de sévérité des canicules : événement « médian » et événement « extrême »
- Deux microclimats : avec et sans îlot de chaleur (nommés ci-après urbain et rural)

8.2.4. Simulations thermo-aérauliques dynamiques

S'agissant d'une étude prospective à l'horizon 2050-2100, il n'est pas possible de s'appuyer sur des mesures pour évaluer le comportement des bâtiments. Seule la simulation numérique est utilisable. Un outil de simulation validé par rapport à des mesures expérimentales et à plusieurs bancs d'essais logiciels a été utilisé.

Ces simulations thermiques dynamiques ont été menées par Armines et Izuba énergies sur la base des données météorologiques produites par la CNRM. Un échantillon de neuf bâtiments à étudier a tout d'abord été constitué :

	Maisons individuelles	Logement collectif	Bureaux	Bâtiments scolaires
Neuf, performant	Maison neuve <i>Maison « Comepos » - 2017</i>	Collectif neuf BBC <i>Résidence Les Roches Blanches - 2016</i>	Bureaux neufs <i>Bureaux Izuba - 2015</i>	École neuve <i>GS Rouet- 2018</i>
Existant	Maison années 1970 <i>Maison Phénix - 1971</i>	Collectif Haussmannien <i>Immeuble haussmannien – années 1880</i> Collectif HLM <i>1969</i>	Bureaux anciens <i>Variante du bureau Izuba non isolée</i>	École ancienne <i>GS Cigales- années 1960</i>

Tableau 27 – liste des bâtiments étudiés

Un panel des mesures d'amélioration du confort d'été des bâtiments disponibles a été constitué. Les techniques recensées se répartissent en deux sous-groupes (en gras celles qui ont été effectivement étudiées dans le cadre du projet) :

Mesures « passives »	Systèmes « actifs »
- Aération naturelle (ouverture de fenêtres) - Vitrages (transmission et émissivité) - Protection solaire (Casquettes, volets, stores) - Revêtement de faible absorptivité (peinture réfléchissante) - Parois végétalisées (murs et toitures) - Isolation (résistance thermique et déphasage) - Inertie thermique du bâti - Zonage thermique - Orientation du logement et de ses ouvertures - Logement traversant ou non	- Brassage d'air (ventilateurs plafonniers) - Puits climatique (puits canadien, puit provençal) - Géocooling - Rafrâichissement par évaporation (adiabatique) - Climatisation par compression - Ventilation mécanique - Solaire à absorption - Sondes Peltier - Refroidissement radiatif

Tableau 28 – Mesures d'adaptation recensées lors de l'état de l'art

Toutes les techniques recensées n'ont pas pu être étudiées, faute de pouvoir les modéliser dans l'outil de simulation utilisé.

Des indicateurs de performance ont été sélectionnés. Pour le confort d'été, l'indicateur "nombre de degrés heures" (DH) introduit par la RE2020 a été retenu. Cet indicateur a l'avantage d'exprimer à la fois la durée et l'intensité des périodes d'inconfort et de prendre en compte le phénomène de confort adaptatif qui constitue une approche intéressante du comportement et du ressenti des occupants.

Une valeur limite de 350 DH peut être retenue pour évaluer si les conditions de confort obtenues sont satisfaisantes, elle correspond à un dépassement d'un degré de la température limite de confort pendant deux semaines complètes dans un logement occupé en continu.

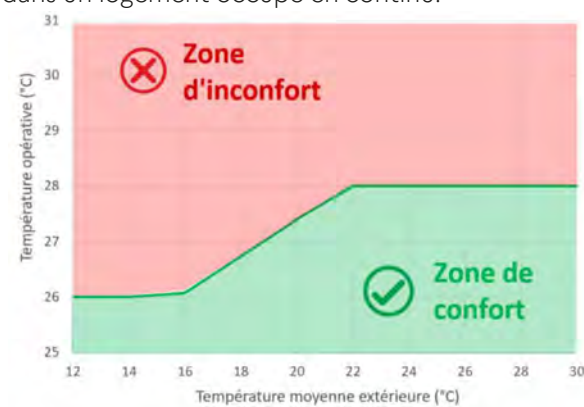


Figure 317 – température limite d'inconfort chaud adaptatives prises en compte pour l'indicateur DH

Les simulations thermiques dynamiques sont ensuite conduites sur les neuf bâtiments de l'échantillon pour évaluer le niveau de confort :

- Dans les différentes conditions météorologiques : actuelles et prospectives
- Dans différentes configurations de bâtiment : bâtiment existant, bâtiments adaptés

8.2.5. Analyses de cycle de vie

Sur la base des simulations thermiques précédemment réalisées, des analyses de cycle de vie ont ensuite été menées par Armines et Izuba énergies. L'interprétation des résultats a été menée selon deux approches : une approche comparative et une optimisation multicritère. Les résultats de consommations énergétiques obtenus en STD alimentent les étapes d'utilisation des ACV.

Pour étudier les impacts environnementaux liés à l'adaptation au changement climatique des bâtiments, l'approche comparative consiste ici à établir les ACV de deux bâtiments ayant des conditions de confort semblables : le bâtiment qui a fait l'objet d'adaptations « Bâtiment adapté » et le bâtiment de base, non adapté, mais équipé de la climatisation.

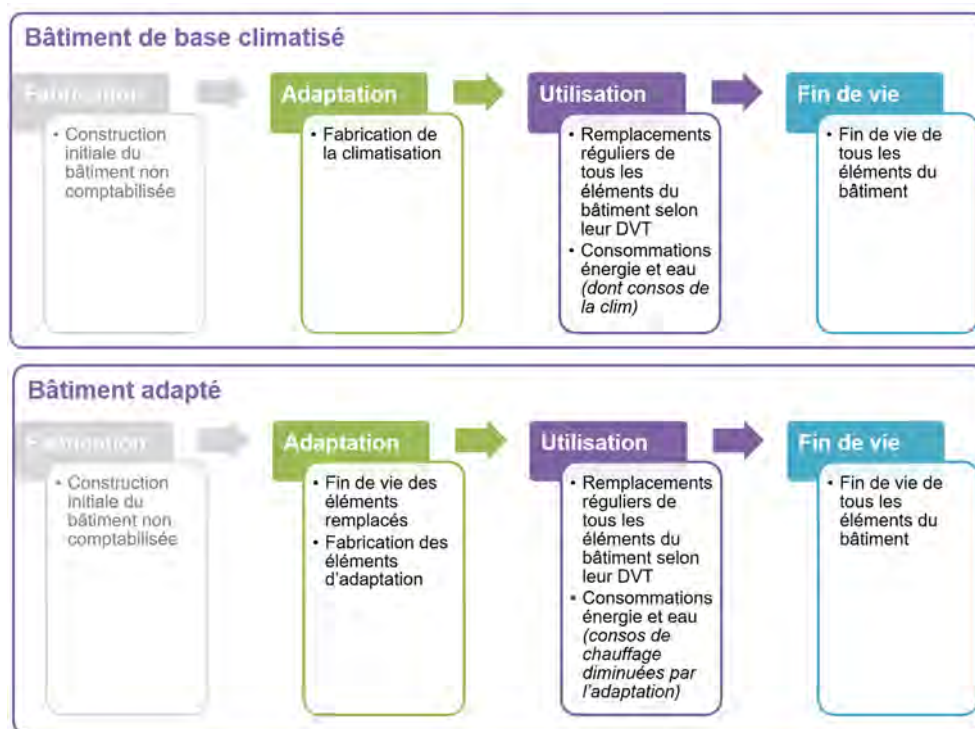


Figure 318 – périmètres pris en compte pour l'approche ACV comparative

Une méthode d'optimisation multicritère a également été appliquée, l'objectif a été de chercher à minimiser à la fois les degrés-heures d'inconfort et le coût environnemental des travaux. Dans ce cas, le périmètre étudié pour les travaux d'adaptation est le suivant :

- Impact de la fin de vie des éléments déjà présents,
- Impacts de la fabrication, du transport et de la mise en œuvre des nouveaux éléments (à savoir les nouvelles fenêtres et isolants),
- Impact de l'utilisation des bâtiments selon les scénarios et résultats de consommation obtenus en STD.

Pour évaluer la performance environnementale, un jeu d'indicateurs ACV réduit est sélectionné :

- Emissions de gaz à effet de serre en kg équivalent CO₂ (méthode de calcul selon IPCC, 2013),
- Consommation d'énergie primaire en kWh,
- Dommages sur la santé en DALY (année de vie en bonne santé perdues, calcul selon Bulle, 2019),
- Dommages à la biodiversité en PDF.m².an (pourcentage d'espèces qui disparaissent sur un certain territoire et une certaine durée, calcul selon Bulle, 2019).

8.2.6. Évaluations économiques

Le bureau d'étude Resalliance a ensuite évalué l'impact économique des mesures d'adaptation au changement climatique des bâtiments, en termes d'investissement et de coût de fonctionnement, afin de pouvoir aider au choix des solutions les plus efficaces économiquement à court, moyen ou long terme.

Ce travail d'évaluation économique s'est appuyé sur les résultats en consommations énergétiques obtenus par Simulation Thermique Dynamique pour les coûts de fonctionnement et sur un chiffrage des coûts d'investissement des mesures d'adaptation.

Ensuite pour l'aide à la décision, plusieurs méthodologies ont été testées.

Une méthode d'optimisation multicritère a été testée pour rechercher les solutions optimales selon deux critères : coût d'investissement et confort obtenu. La lecture sur diagrammes de Pareto est utilisée pour sélectionner les groupes de scénarios d'adaptation répondant au mieux aux objectifs donnés, la lecture sur diagrammes en coordonnées parallèles permet d'affiner les choix techniques dans un groupe de scénarios d'adaptation choisi.

Une analyse coût-bénéfices a également été utilisée, afin d'analyser l'efficacité économique des scénarios d'adaptation dans le temps. Des indicateurs économiques tels que la valeur actualisée nette (VAN) et le taux de rentabilité interne (TRI) ont été calculés, ils démontrent la pertinence économique des mesures d'adaptation.

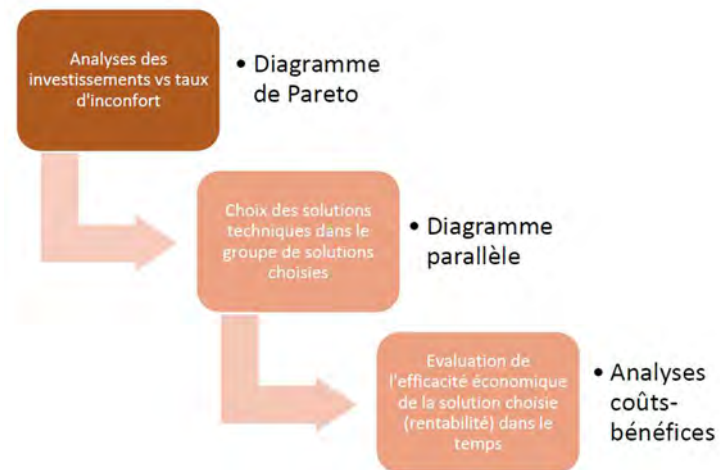


Figure 319 - méthodologie utilisée pour l'analyse économique des choix de solutions d'adaptation dans le projet RESILIANCE

8.3. Enseignements : Éléments de constat

8.3.1. Quelle est la sévérité des conditions estivales attendues d'ici la fin du siècle ?

Le premier enseignement de cette étude est le niveau de sévérité des conditions estivales attendues pour la moitié et la fin du siècle. A partir du scénario RCP 8.5 du GIEC, des modèles climatiques mis en œuvre par le CNRM et selon la méthodologie synthétisée au § 8.2.3.

Une rapide analyse statistique sur les températures présentes dans les fichiers produits a été conduite. Les 16 fichiers sont comparés ci-dessous :

- Aux données météorologiques utilisées pour le calcul de l'indicateur de confort d'été dans la méthode de calcul RE2020 (données issues de mesures 2000-2018, intégrant une période caniculaire récente)
- Aux données mesurées en 2003 à Paris.

	Nîmes Rural				Nîmes urbain				Ile-de-France Rural				Paris urbain				RE2020 (fichier été)		2003
	Lointain		Proche		Lointain		Proche		Lointain		Proche		Lointain		Proche				
	Extrême	Médian	Extrême	Médian	Extrême	Médian	Extrême	Médian	Extrême	Médian	Extrême	Médian	Extrême	Médian	Extrême	Médian	H3	H1a	
Dénomination simuls tertiaire	NRLE	NRLM	NRPE	NRPM	NULE	NULM	NUPE	NUPM	PRLE	PRLM	PRPE	PRPM	PULE	PULM	PUPE	PUPM	H3	H1a	2003
	2100 extrême	2100 médian	2050 extrême	2050 médian	2100 extrême	2100 médian	2050 extrême	2050 médian	2100 extrême	2100 médian	2050 extrême	2050 médian	2100 extrême	2100 médian	2050 extrême	2050 médian	Actuel	Actuel	2003
Température max (°C)	44,2	41	39,7	37,6	42,8	40,7	37,7	38	47	36,5	43,5	35,8	46,1	38,4	42	36,5	37,2	39,7	42,2
Nbre d'heures > 30°C	1141	682	355	352	1139	671	388	355	390	136	136	74	449	214	167	101	452	143	195
Nbre d'heures > 35°C	448	217	21	29	457	210	39	44	136	10	55	3	171	26	68	9	39	63	72
Nbre d'heures > 40°C	48	15	0	0	52	9	0	0	41	0	12	0	40	0	12	0	0	0	11
Durée de la vague de chaleur (jours)	38	15	9	10	38	15	9	10	41	9	10	5	41	9	10	5	12	12	15
Indice de nuit tropicale	91	73	43	38	97	76	51	46	30	13	10	5	49	32	14	11	52	12	13

Tableau 29 – Analyse statistique des températures des fichiers météorologiques produits dans le cadre du projet Resilience

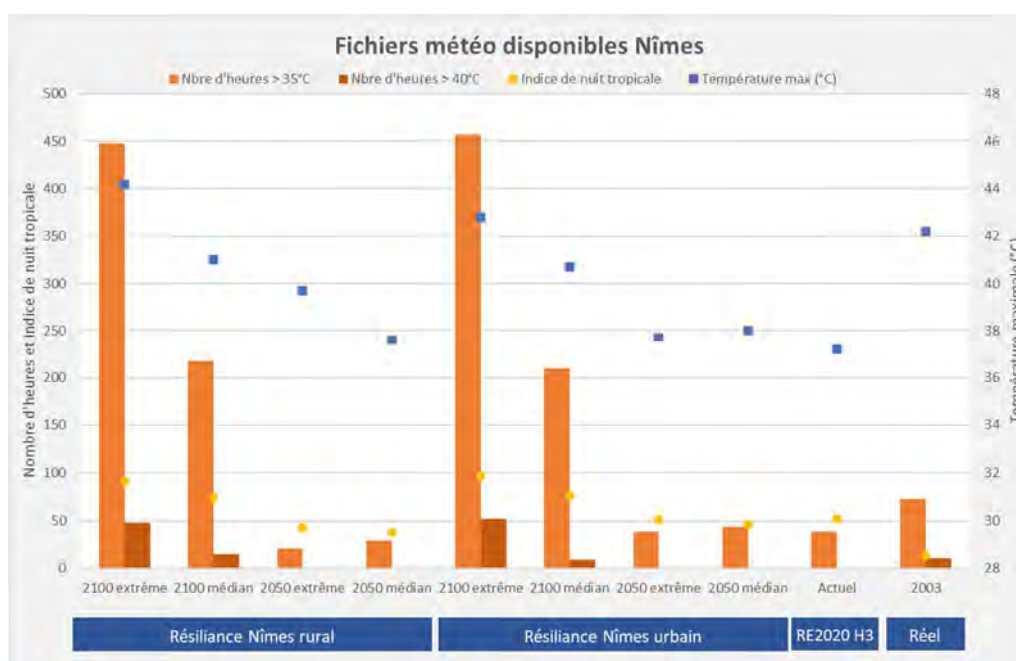


Figure 320 – Représentation graphique de la sévérité des fichiers météorologiques de Nîmes

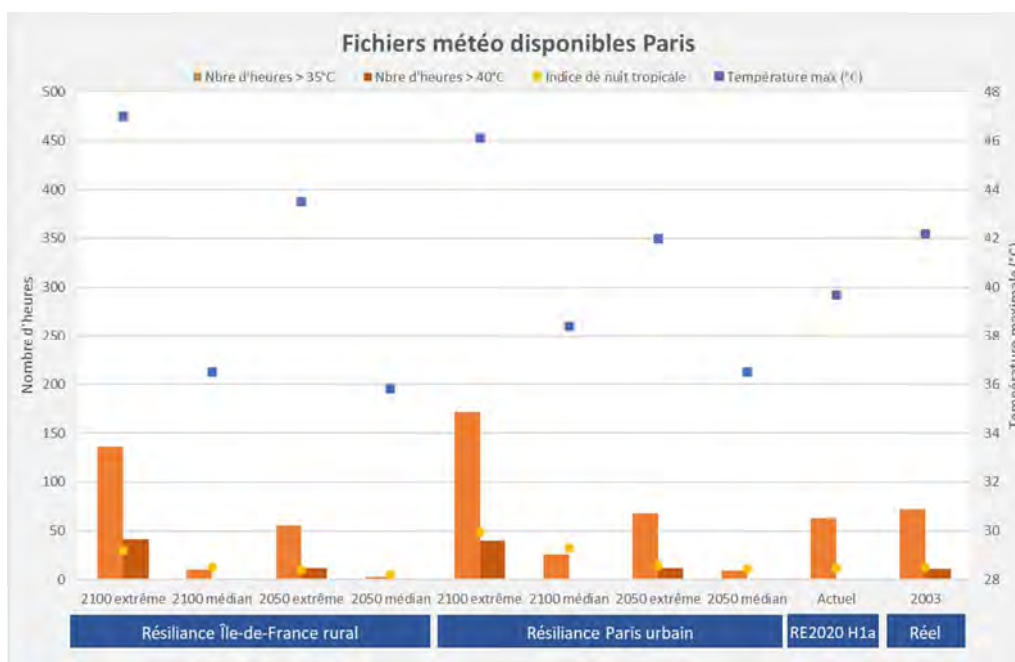


Figure 321 - Représentation graphique de la sévérité des fichiers météorologiques pour l'Ile de France

Avec toute la prudence qu'il convient de conserver sur la fiabilité de ce type de projections à très long terme, on peut retirer les enseignements suivants :

Les conditions 2050 obtenues dans ces fichiers sont relativement proches de ce qui a déjà été vécu, notamment en 2003, que ce soit en termes de nombre d'heures au-delà de 35°C, de températures maximales atteintes, de durée des vagues de chaleur ou d'indice de nuit tropicale².

Les conditions de fin de siècle (2100) sont quant à elles beaucoup plus sévères, avec des durées de dépassement des seuils de 3 à 6 fois supérieures pour Nîmes, 2 fois supérieures pour Paris.

On note que les températures maximales prévues dans ces fichiers (40 à 44°C pour Nîmes, jusqu'à 47°C pour Paris) restent comparables à des températures déjà mesurées et sont plus importantes pour Paris que pour Nîmes. Ces températures maximales, sont des phénomènes ponctuels, liés à l'intégration d'événement aléatoires dans les données météorologiques. **Il convient de relativiser l'impact de ces températures maximales, atteintes ponctuellement, et de s'attacher à la sévérité globale des données produites (durées de dépassement, indice de nuit tropicale) : dans cette optique, les fichiers de fin de siècle sont nettement plus sévères que les données actuelles et ceux de Nîmes beaucoup plus que ceux de Paris.**

On note également que la température maximale est supérieure en rural par rapport à l'urbain à Nîmes : cela peut s'expliquer par le fait qu'en journée les espaces ouverts, même naturels, peuvent se réchauffer plus rapidement que les zones urbaines, où la géométrie peut réduire la pénétration du soleil dans la rue et donc le réchauffement diurne.

D'autre part, des études climatiques ont montré qu'avec le réchauffement global et la baisse des précipitations dans certaines zones, les sols naturels peuvent s'assécher jusqu'à limiter la capacité d'évapotranspiration des sols et de la végétation et donc entraîner un réchauffement important. Par contre, **on s'attend à ce que la température nocturne reste toujours plus élevée en ville sous l'effet de l'îlot de chaleur urbain, ce que montre l'indice de nuit tropicale, supérieur pour les données en milieu urbain.**

² Indice de nuit tropicale : décompte du nombre de jours où la température ne descend pas en dessous de 20 °C pendant la nuit.

8.3.2. Quelles sont les conséquences attendues sur le confort des occupants dans les bâtiments ?

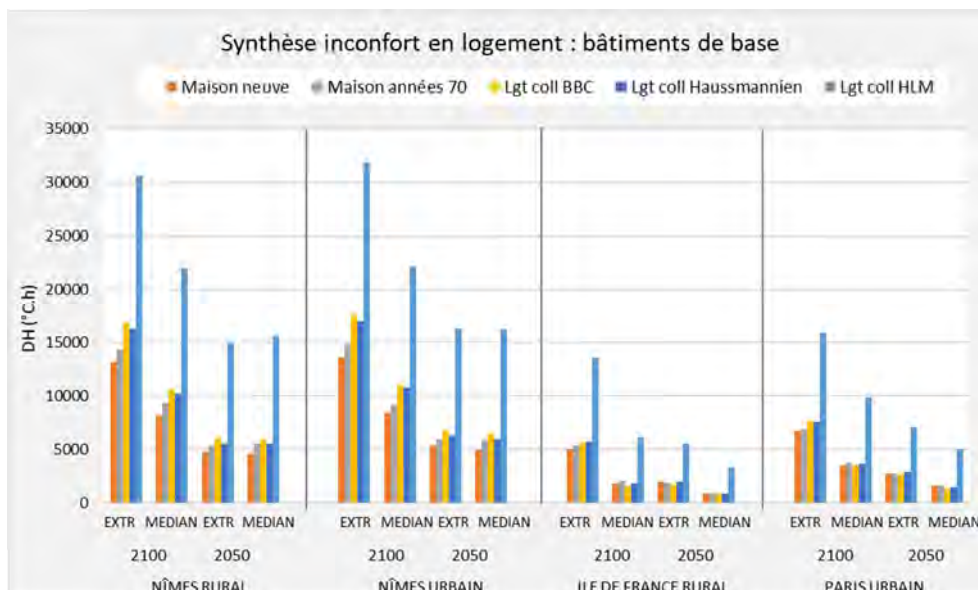


Figure 322 – Synthèse des niveaux d'inconfort obtenus sur les bâtiments de logement de base non adaptés

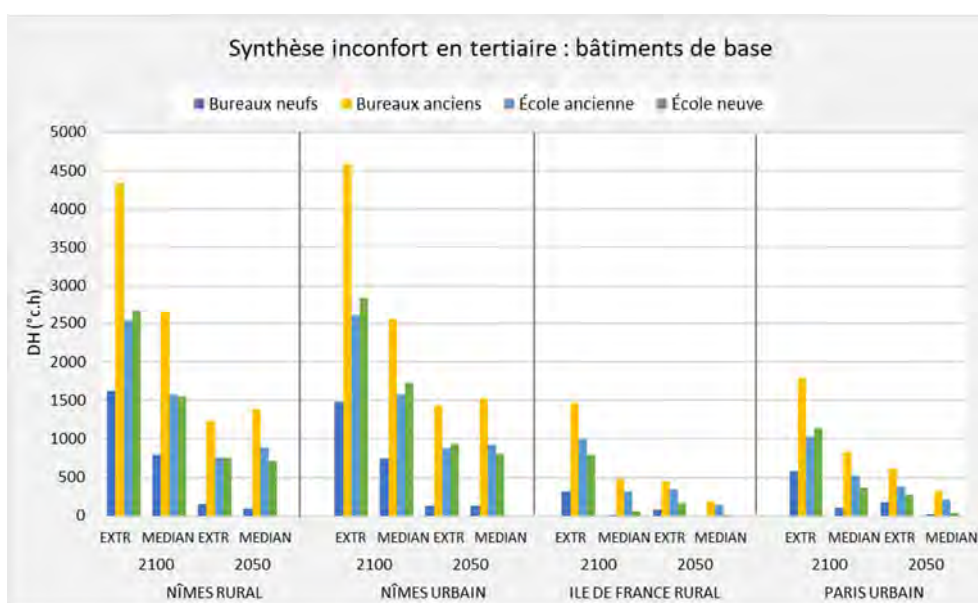


Figure 323 - Synthèse des niveaux d'inconfort obtenus sur les bâtiments tertiaires de base non adaptés

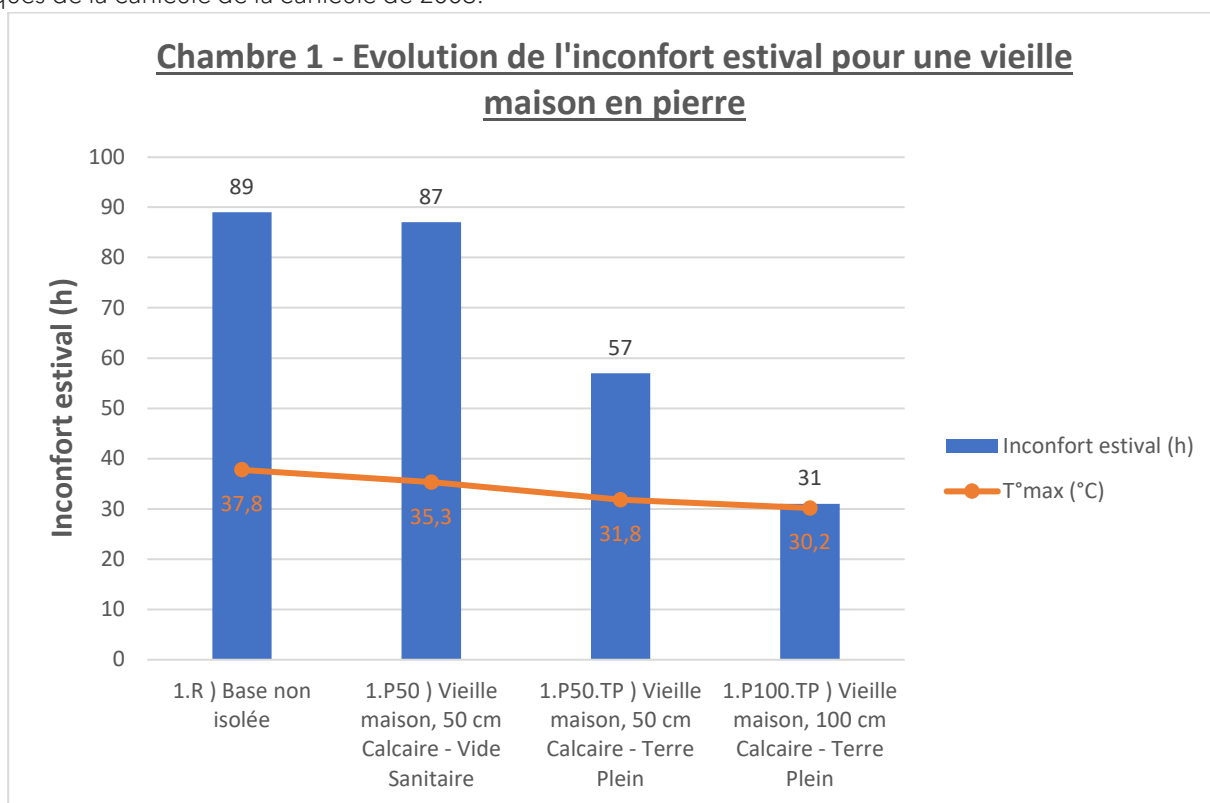
Les résultats obtenus sur les bâtiments étudiés avant l'application de toute mesure d'adaptation montrent que l'ensemble des bâtiments étudiés, neufs ou anciens, s'avère complètement inadapté au changement climatique.

Face à la sévérité des climats projetés, les conditions de confort dans les bâtiments étudiés se dégradent :

- dès l'horizon 2050 pour les logements, de façon beaucoup plus forte sur le climat de Nîmes que sur celui de Paris
- pour la quasi-totalité des bâtiments tertiaires, les conditions de confort ne sont assurées que pour les conditions de Paris en 2050. A l'horizon 2100 pour Paris et dès 2050 à Nîmes, les conditions de confort ne sont plus assurées pour les bâtiments étudiés.

Il existe cependant des bâtiments très anciens, avec des murs de pierre épais, qui pourraient résister davantage aux vagues de chaleur. Une autre variante a alors été définie à partir de la maison des années 1970, en considérant 50 ou 100 cm de pierre (calcaire) dans les murs, et éventuellement un plancher sur

terre-plein au lieu du vide sanitaire. Les résultats sont présentés ci-dessous, ils correspondent aux données climatiques de la canicule de la canicule de 2003.



- *Figure 7bis : maison ancienne en pierre, canicule 2003*

Selon ces résultats, le nombre d'heures de surchauffe (températures supérieures à 27°C) ainsi que la température maximale resteraient modérés dans le cas d'un plancher sur terre-plein.

8.4. Recommandations : les principaux leviers d'adaptation

8.4.1. Le comportement des occupants : sobriété des usages pour limiter les surchauffes

Le comportement des occupants a une influence majeure sur le confort d'été obtenu. Les occupants ont en effet la plupart du temps la responsabilité d'agir sur les principaux leviers d'amélioration que sont l'aération des locaux, la protection solaire et la diminution des apports internes.

Pas toujours intuitive ou ancrée dans la culture des occupants, la connaissance et la pratique des bons gestes³ pour gérer la chaleur doivent leur être transmises avec la pédagogie et un accompagnement adéquats.

Plusieurs niveaux d'accompagnement existent : du simple livret de prise en main, à la participation des occupants à une conception centrée sur les usages et les usagers, avec l'aide d'une « Assistance à Maîtrise d'Usage » par exemple.

A l'inverse de ces bons gestes, il est à noter qu'un comportement inapproprié peut compromettre l'efficacité d'une rénovation thermique en termes de confort comme de réduction des consommations.

8.4.1.1. L'aération nocturne

L'aération nocturne permet de décharger la chaleur accumulée pendant les journées chaudes. Les simulations effectuées tant sur les logements que sur les bâtiments tertiaires montrent que **l'aération nocturne un des leviers principaux d'amélioration du confort. Permettre une aération efficace doit être un des axes prioritaires de l'adaptation aux surchauffes.**

L'aération nocturne peut être réalisée concrètement par les moyens suivants :

- Ouverture manuelle des fenêtres
- Ouverture automatique des fenêtres
- Utilisation de la ventilation mécanique contrôlée (VMC)

Des détails sur les conditions d'utilisation des trois moyens sont données ci-après.

On note que c'est ici à la fois le comportement de l'occupant et la conception du bâtiment qui sont en jeu : **L'adaptation d'un bâti existant ou la conception d'un bâtiment neuf doivent fournir aux occupants les moyens de mettre en œuvre une aération suffisante.**

Ce rôle de déstockage est amélioré par les éléments suivants :

- Un débit suffisant
- Un déclenchement au bon moment (écart de température suffisant entre l'intérieur et l'extérieur) et une durée suffisante
- La disponibilité d'inertie thermique dans le bâtiment. L'implantation des ouvertures sera faite de façon que le parcours de l'air frais soit simple et qu'il mobilise au maximum l'inertie thermique disponible dans le bâtiment par un passage des flux d'air le long des murs et dalles inertes.

Aération nocturne naturelle par ouverture manuelle des fenêtres

En logement et dans certains cas en tertiaire, cette aération nocturne est réalisée par les occupants en ouvrant simplement leurs fenêtres.

Conditions de réalisation :

L'ouverture des fenêtres ne doit pas être empêchée par des dispositions réglementaires (immeuble de grande hauteur) ou par de trop fortes contraintes acoustiques.

Un débit suffisant de ventilation est obtenu en ventilation naturelle :

- soit par ouverture des fenêtres en utilisant comme « moteur » la différence de pression entre façades, c'est la **ventilation traversante**. Il faut aussi dans ce cas ouvrir des menuiseries sur des façades opposées et des ouvertures internes pour permettre à l'air de traverser d'une façade à l'autre.
- soit le **tirage thermique** en ouvrant des menuiseries basses et hautes.

Des débits suffisants sont obtenus avec un dimensionnement suffisant des ouvertures, on recherche usuellement une porosité des façades de l'ordre de 6 % (surface ouvrants ramenées à la surface des locaux à ventiler sur la façade).

³ Voir [guide ADEME « Canicule : comment garder son logement frais ? »](#).

Contraintes et solutions associées :

Des dispositifs d'ouvertures à claire voie permettant de préserver l'intimité.

Des protections solaires perméables à l'air (type BSO) peuvent également favoriser l'ouverture nocturne sans risque d'intrusion ni de pluie.

La mise en place de moustiquaires permet de maintenir l'ouverture dans les zones infestées.

Résultats des simulations :

Les résultats de simulation montrent une forte sensibilité du confort obtenu au débit effectivement mis en œuvre. En respectant les conditions de réalisation détaillées ci-dessus, il est facilement envisageable d'obtenir un renouvellement de 5 à 10 volumes par heure.

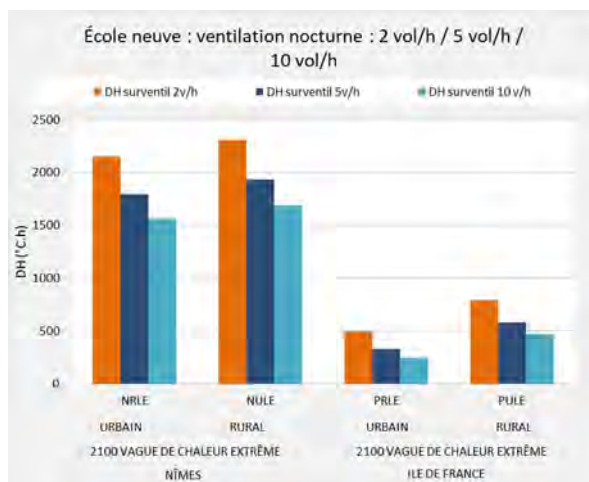


Figure 324 – Influence du débit d'aération nocturne sur le niveau de confort de l'école neuve, climat 2100 Nîmes et Paris, vague de chaleur extrême

Il est important que les occupants soient également sensibilisés à ne pas ouvrir la fenêtre en journée pour faire du courant d'air alors que la température est plus élevée à l'extérieur. Cette ouverture en journée fait alors rentrer de la chaleur : pour obtenir un courant d'air, il faut privilégier l'usage de brasseurs d'air efficaces, ventilateurs de plafond de préférence (voir § 8.4.3.1).

Aération nocturne naturelle par ouverture automatique des fenêtres

En tertiaire, le bâtiment peut être inoccupé au moment où l'aération doit être mise en œuvre. Pour assurer tout de même un déclenchement lorsque les conditions de température extérieures sont favorables (température extérieure inférieure à la température intérieure) et une durée de ventilation nocturne optimale, l'ouverture des menuiseries pourra être réalisée par des automatismes associés à des ouvrants motorisés.

Dans le cas d'une ouverture manuelle des menuiseries, le résultat est fortement corrélé au comportement de l'occupant et beaucoup plus incertain. L'ouverture automatique permet de maximiser les durées d'ouverture indépendamment de la présence et du niveau d'implication des occupants.

Les conditions de réalisation et les contraintes sont similaires à celles de la ventilation par ouverture manuelle.

Résultats des simulations :

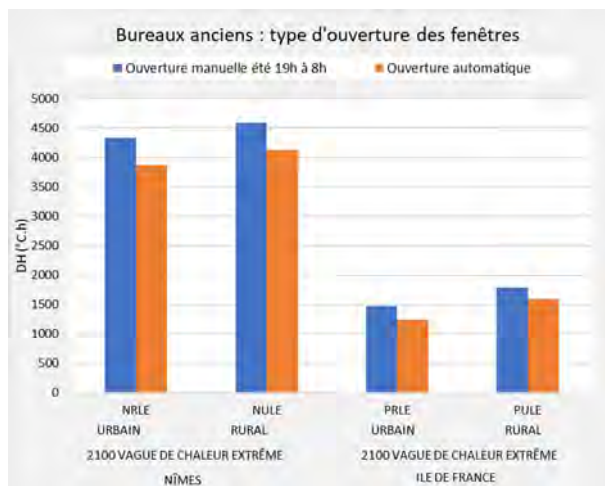


Figure 325 - Influence du type d'ouverture nocturne sur le niveau de confort sur des bureaux anciens, climat 2100 Nîmes et Paris, vague de chaleur extrême

Ventilation nocturne mécanique : utilisation de la ventilation mécanique contrôlée

L'utilisation de l'installation de ventilation mécanique contrôlée (VMC) pendant la nuit est également envisageable. Cette solution doit cependant être retenue si une ventilation naturelle par ouverture des fenêtres n'est pas possible.

Conditions de réalisation :

Obtenir un débit suffisant peut nécessiter un surdimensionnement de l'installation. En effet, l'installation de VMC est le plus souvent dimensionnée pour les besoins de renouvellement hygiénique de l'air qui sont rarement suffisants pour une ventilation nocturne efficace.

Contraintes et solutions associées :

L'utilisation de la VMC entraîne des consommations énergétiques pour les ventilateurs. Le fonctionnement sera limité aux périodes où l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur est le plus important pour maximiser le rapport consommation sur rafraîchissement. L'utilisation de la VMC peut également poser des problèmes acoustiques si les locaux sont utilisés la nuit. Cette solution est habituellement utilisée dans des locaux tertiaires inoccupés.

8.4.1.2. La protection solaire

La protection solaire est un autre levier important d'adaptation de l'enveloppe. Réduire les apports solaires doit être un des axes prioritaires de l'adaptation aux surchauffes.

Conditions de réalisation :

Les protections solaires sont efficaces dans les cas suivants :

- Extérieures plutôt qu'intérieures
- De préférence fixes, intégrées au bâti, ce qui leur permet d'être efficaces indépendamment de leur manipulation par les occupants
- Adaptées à l'orientation :
 - o des casquettes horizontales fixes ne sont efficaces qu'entre les orientations sud-est et sud-ouest
 - o les orientations est et ouest sont à protéger par des lames horizontales inclinées ou verticales
 - o les baies horizontales ou inclinées très exposées en été sont à éviter
- Si des protections mobiles sont retenues, leur efficacité dépendra de leur bonne utilisation par les occupants. Il faut alors notamment que ces protections permettent aux occupants :
 - o De conserver un niveau de confort lumineux suffisant quand elles sont utilisées en journée dans un espace occupé.
 - o D'être suffisamment perméables à l'air quand elles sont refermées la nuit en parallèle d'une ventilation nocturne par ouverture de fenêtre

L'efficacité des protections mobiles dépend de leur bonne utilisation par les occupants. Il faut alors notamment que ces protections permettent aux occupants :

- De conserver un niveau de confort lumineux suffisant quand elles sont utilisées en journée dans un espace occupé.
- D'être suffisamment perméables à l'air quand elles sont refermées la nuit en parallèle d'une aération nocturne par ouverture de fenêtre

On note que c'est ici aussi à la fois le comportement de l'occupant et la conception du bâtiment qui sont en jeu : **L'adaptation d'un bâti existant ou la conception d'un bâtiment neuf doivent fournir aux occupants les moyens de bien se protéger des apports solaires.**

Résultats des simulations :

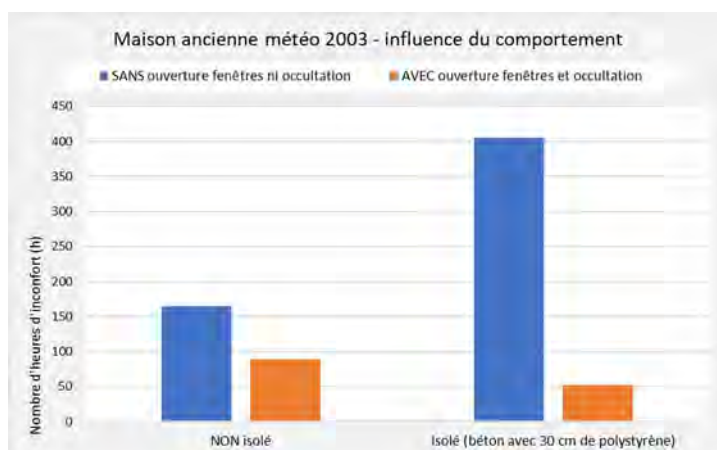


Figure 326 – Influence du comportement des occupants vis-à-vis des occultations et l'ouverture des fenêtre sur le confort d'été de la maison ancienne, climat Paris 2003

Dans l'exemple ci-dessous, les protections solaires suivantes ont été modélisées sur le bâtiment de bureaux :

Variante	Caractéristiques
Protec 0	Stores intérieurs seuls (sur double vitrage : $Sw_{ap} = 0,35$, fermeture 70 %)
Protec 1	Stores intérieurs + casquette sud + vitrage à contrôle solaire est et ouest (vitrage à contrôle solaire $U_w = 1,33 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $Sw = 0.18$)
Protec 2	Stores extérieurs (sur DV : $Sw_{ap} = 0,02$, fermeture 70 %)
Protec 3 (Base)	Stores extérieurs + casquette sud

Tableau 30 – hypothèses retenues pour la simulation de 4 niveaux de protection solaire pour le bâtiment de bureaux

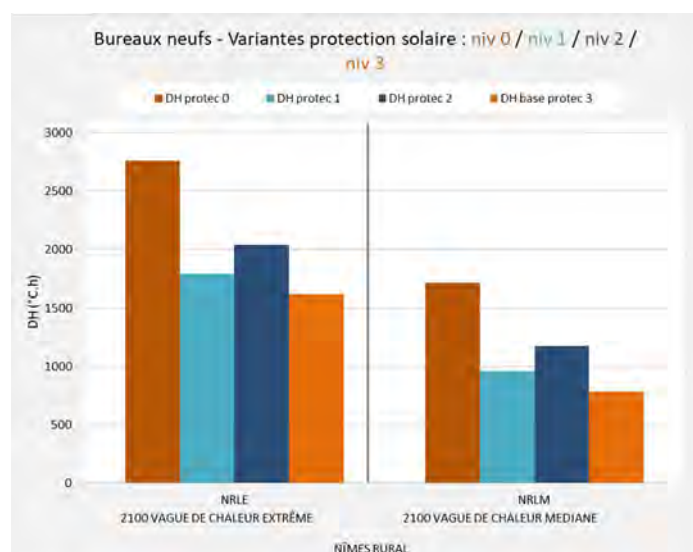


Figure 327 – Exemple de résultat obtenu pour différents niveaux de protection solaire sur les bureaux neufs, climat Nîmes rural 2100

8.4.1.3. Les apports internes : sobriété d'usage et efficacité énergétique

Diminuer les apports internes dégagés par les appareillages et éclairages présents dans les locaux est un autre levier d'adaptation à fort potentiel d'amélioration du confort.

A part l'eau chaude envoyée à l'égout par les machines à laver, toute consommation énergétique interne finit par se transformer en chaleur dans les locaux. Quasiment tous les appareils sont donc concernés : froid, cuisson, équipements de bureautique, hifi... Les postes les plus énergivores sont aussi ceux qui ont le plus d'impact sur le confort d'été.

Conditions de réalisation :

Diminuer les apports internes passe par une démarche de maîtrise de l'énergie sur tous les usages énergétiques internes aux locaux :

- Sobriété : adapter la taille et les durées d'utilisation des appareils : adapter notamment les modes de cuisson en été en évitant les cuissons longues au four ou en casserole, couper les veilles.
- Efficacité énergétique des appareils : choix d'appareils à hautes performances énergétiques, notamment sur les postes les plus énergivores (appareils de froid en logement, bureautique en bureaux...), surisolation les ballons d'eau chaude quand ils sont dans l'enveloppe chauffée.

Dans cette démarche, la durée et le niveau d'utilisation des appareillages (et parfois le choix des équipements, notamment en logement) est lié aux usages des occupants. Il s'agit d'un levier relativement important qui dépend de leur comportement.

Cette démarche présente un double avantage :

- Gains sur les consommations énergétiques pour les usages concernés
- Gains importants sur le confort d'été par baisse des apports internes

Résultats des simulations :

Ce levier n'a pas été étudié dans les simulations réalisées dans le cadre du projet : toutes ont été réalisées sur la base d'apports internes usuels invariants.

8.4.2. Conception d'une enveloppe efficace, adaptée aux surchauffes

8.4.2.1. Faut-il isoler ?

Si une ventilation nocturne est présente pour évacuer la chaleur emmagasinée pendant la journée, l'amélioration de l'isolation contribue à un meilleur confort d'été. Des parois opaques mieux isolées et des menuiseries plus isolantes protègent de la chaleur : elles limitent les apports de chaleur par conduction pendant la journée. Le bénéfice est d'autant plus grand que la ventilation nocturne est efficace.

Résultats des simulations :

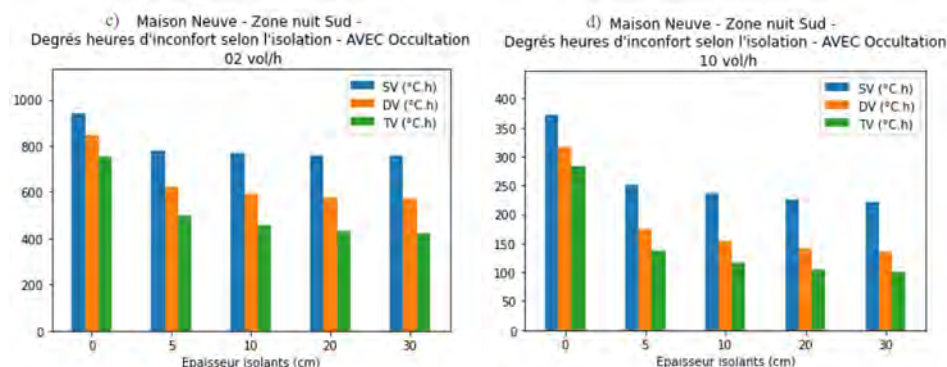


Figure 328 – influence du niveau d'isolation des parois et des menuiseries sur le confort d'été pour la maison neuve, selon le niveau d'aération nocturne (2 et 10 vol/h), climat Paris urbain 2100 vague de chaleur médiane

Conditions de réalisation :

Attention, les simulations montrent également que le niveau de confort peut être dégradé par l'isolation si aucune aération nocturne n'est prévue pour évacuer la chaleur emmagasinée dans la journée. Dans ces conditions une enveloppe plus isolée retient mieux cette chaleur et le confort est dégradé, c'est l'effet « bouteille thermos ». **L'approche de rénovation thermique et d'adaptation aux surchauffes doit être globale en agissant sur l'isolation et en maintenant la possibilité d'aérer les locaux la nuit.**

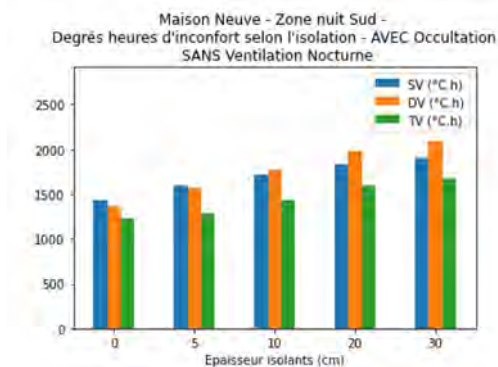


Figure 329 - influence du niveau d'isolation des parois et des menuiseries sur le confort d'été pour la maison neuve, sans aération nocturne, climat Paris urbain 2100 vague de chaleur médiane

8.4.2.2. Faut-il privilégier des isolants à fort déphasage ?

Que ce soit à épaisseur équivalente ou à résistance thermique équivalente, les résultats obtenus sur la maison des années 1970 montrent que le choix d'un isolant à fort déphasage a un effet faible sur le confort.

Ce résultat s'explique par le fait que la capacité thermique de ces isolants à « fort déphasage » reste faible par rapport à des matériaux denses, par exemple, une couche de 15 cm de laine de bois a la capacité de 2 cm de béton. De plus, le flux de chaleur transmis par un isolant est faible, donc le déphasage d'un flux quasi nul ne peut pas avoir d'influence notable.

L'intérêt de ce type d'isolants n'apparaît que dans le cas de locaux sans aucun accès des matériaux à forte inertie thermique, comme des locaux situés sous une toiture isolée sous rampants ou des combles : le choix d'isolants denses pour ces parois présente alors un intérêt pour ces locaux directement concernés, mais il reste peu significatif par rapport à une inertie forte (voir § 8.4.2.4, notamment Figure 335).

Ces résultats relativisent les avantages en termes de confort d'été souvent mis en avant par les fabricants de ces matériaux.

Résultats des simulations :

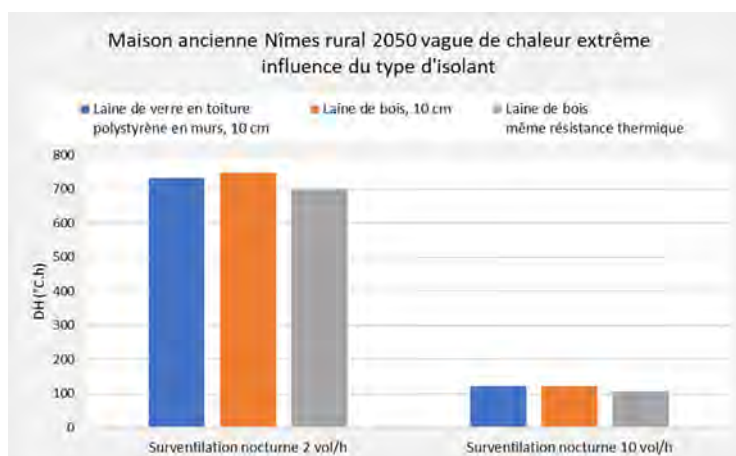


Figure 330 – Influence du type d'isolant, climat Nîmes rural 2050, vague de chaleur extrême

Résultats de simulations complémentaires :

Les résultats ci-dessous, complémentaires à ceux obtenus dans le projet Resilience, sont issus d'une note réalisée par le Lab Recherche Environnement⁴.

Une maison passive à inertie légère (planchers, murs, cloisons et plafonds en bois) y est étudiée sous le climat 2003 en Île-de-France.

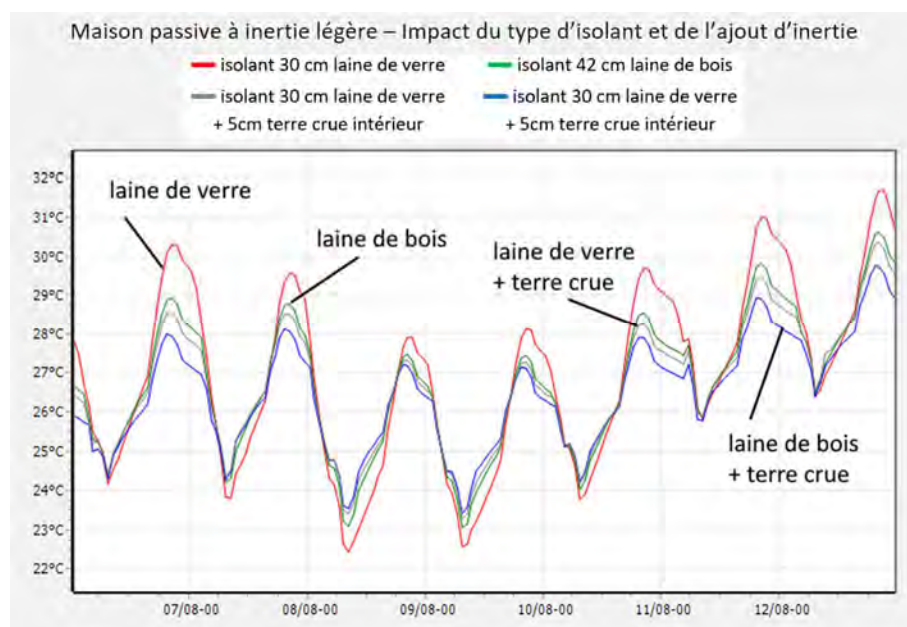


Figure 331 – Influence du type d'isolant et de l'ajout d'inertie sur le confort d'une maison passive sur une semaine de canicule, météorologie Paris 2003, comparaison de variantes à faible inertie thermique

Les résultats obtenus confirment que le choix d'un isolant à déphasage supérieur ne suffit pas à assurer un niveau de confort satisfaisant. L'ajout de terre crue s'avère plus efficace. Associer la laine de bois et la terre crue est encore plus performant, mais la température maximale reste élevée (proche de 30°C).

8.4.2.3. Quel type de vitrage ?

Les simulations effectuées montrent que le type de vitrage a une influence mesurée sur le confort d'été, notamment quand une protection solaire estivale est également prise en compte.

⁴ <https://www.lab-recherche-environnement.org/fr/article/note-sur-lanalyse-du-cycle-de-vie-des-materiaux-biosources/>

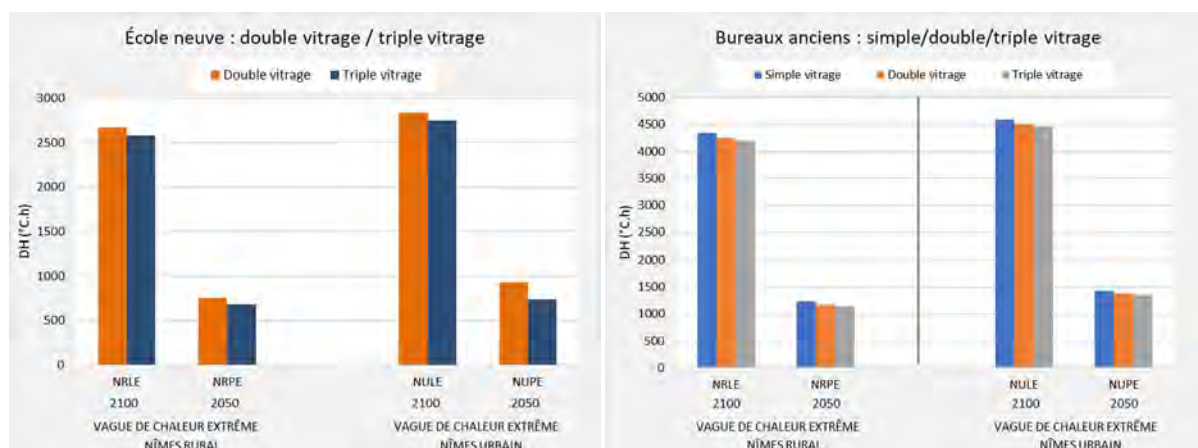


Figure 332 – Influence du type de vitrage sur le confort de l'école neuve et des bureaux anciens, climat Nîmes, vague de chaleur extrême

Les caractéristiques du vitrage interviennent à deux niveaux :

- Une conductivité (U_w) plus faible conduit à limiter les apports de chaleur par conduction et limite également les déperditions en hiver.
- Un facteur solaire (S_w) plus faible conduit à limiter les apports solaires à travers le vitrage mais limite également les apports solaires gratuits en hiver, ce qui est pénalisant pour les baies situées entre les orientations sud-est et sud-ouest.

Le choix du type de vitrage doit donc être réalisé en recherchant tout d'abord une faible conductivité et un facteur solaire élevé dans un objectif de performance d'hiver. Dans cette optique, le choix entre double et triple vitrage dépend plus de la rigueur climatique hivernale.

Un facteur solaire faible, dans une optique de contrôle des apports solaires, ne sera retenu que sur des orientations est ou ouest et si des protections solaires efficaces ne peuvent être mises en œuvre ou risquent d'être mal utilisées par les occupants.

Pour information, voici les valeurs usuelles des caractéristiques des menuiseries retenues pour la simulation des écoles.

Variante	Conductivité	Facteur solaire
Simple vitrage	$U_w = 5,23 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$	$S_w = 0,6$
DV ancien	$U_w = 3 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$	$S_w = 0,55$
Double vitrage	$U_w = 1,33 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$	$S_w = 0,49$
Triple vitrage	$U_w = 0,95 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$	$S_w = 0,43$

Tableau 31 – hypothèses retenues pour la simulation de différents types de vitrages pour les écoles

8.4.2.4. Le rôle de l'inertie

En lien avec la ventilation nocturne, dont elle va renforcer l'effet, l'inertie thermique disponible dans le bâtiment joue un rôle d'amortissement des pics de température. La chaleur excédentaire en journée est stockée en partie dans la masse thermique du bâtiment, puis restituée et évacuée la nuit ou dès que les conditions de température le permettent par la ventilation nocturne.

Conditions de réalisation :

Les choix de conception devront prendre en compte les points suivants :

- L'isolation par l'extérieur, afin que l'inertie du matériau dense de la façade soit en contact avec l'ambiance.
- Des parois lourdes (parpaings, béton, terre crue) en contact avec l'ambiance. Les dalles et murs intérieurs (refends ou séparatifs de logements) ont l'avantage d'être en contact avec l'ambiance des deux côtés alors que la façade ne l'est que sur une face.
- Les fortes épaisseurs de parois lourdes (au-delà de 20 cm) apportent peu au confort. Les échanges journaliers ont principalement lieu avec les premiers centimètres d'épaisseur des parois.
- Un plancher bas sur terre-plein permet de bénéficier de l'inertie du sol situé sous le bâtiment, il sera privilégié à un vide sanitaire si les autres contraintes du projet le permettent.
- Un plancher haut lourd, par exemple une toiture terrasse béton isolée par le dessus ou un plancher haut sous combles lourd (dalle béton), est également plus favorable qu'une toiture légère.

Il est également à noter qu'avec une stratégie basée sur la ventilation nocturne et une forte inertie, on constate tout au long de l'été une montée en température progressive des bâtiments. Cet effet s'accroît :

- Lors des vagues de chaleur, quand la température nocturne ne permet plus un rafraîchissement suffisant de l'inertie
- Si les occupants ne réalisent pas correctement l'ouverture des fenêtres ou sont simplement absents

Malgré cet effet, les simulations montrent que sur l'année complète incluant l'intersaison, l'été et la vague de chaleur, une inertie forte est plus favorable au confort, elle doit être accompagnée d'une bonne aération dès que les conditions de température le permettent.

Résultats des simulations :

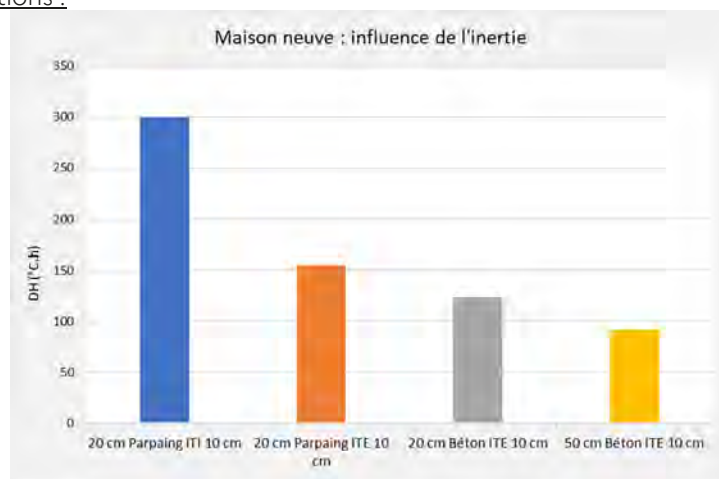


Figure 333 – Influence de l'inertie de la façade sur le confort de la maison neuve, climat Paris urbain 2100 vague de chaleur médiane

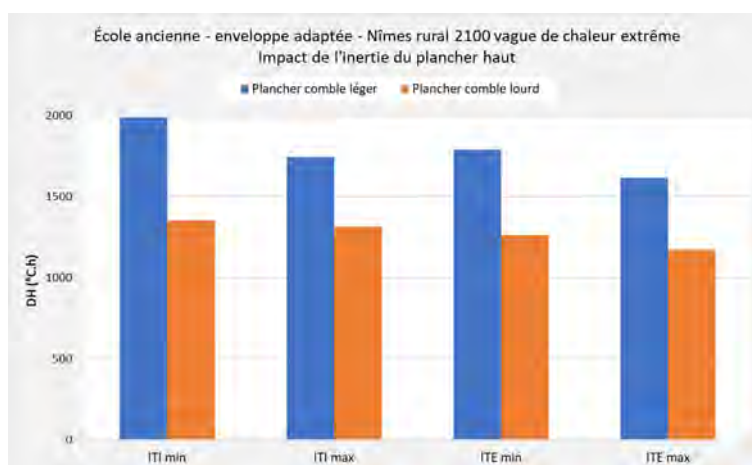


Figure 334 - Influence de l'inertie du plancher haut sur le confort de l'école ancienne, météo Nîmes rural 2100 vague de chaleur extrême

Résultats de simulations complémentaires :

Les résultats ci-dessous, complémentaires à ceux obtenus dans le projet Resilience, sont issus d'une note réalisée par le Lab Recherche Environnement⁵.

Une maison passive à inertie légère (planchers, murs, cloisons et plafonds en bois) y est comparée à la même maison avec une inertie forte (planchers et murs en béton), toujours étudiée sous le climat 2003 en Île-de-France.

⁵ <https://www.lab-recherche-environnement.org/fr/article/note-sur-lanalyse-du-cycle-de-vie-des-materiaux-biosources/>

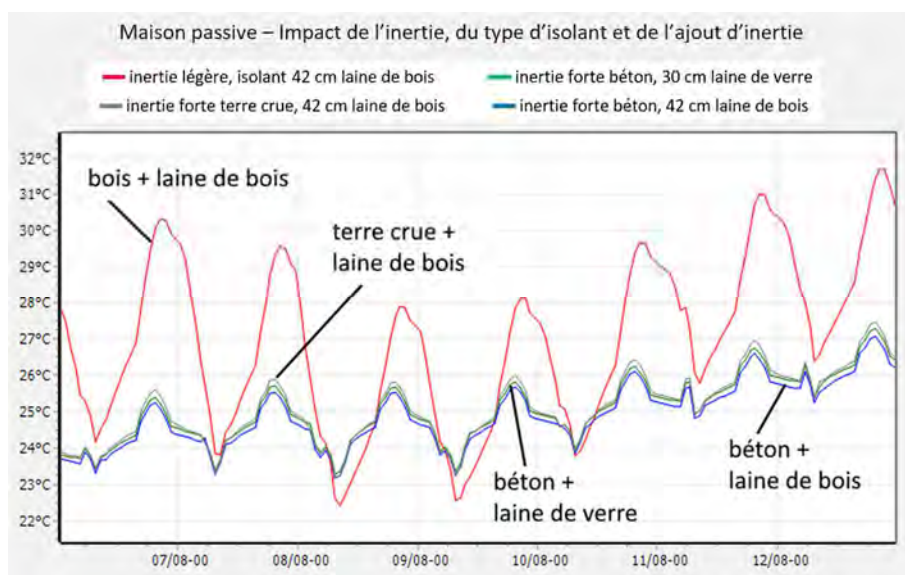


Figure 335 - Influence de l'inertie et du type d'isolant sur le confort d'une maison passive sur une semaine de canicule, météorologie Paris 2003, comparaison de variantes à faible et forte inertie thermique

Ces résultats complémentaires montrent que la forte inertie thermique réduit la surchauffe de manière très significative, alors que le changement d'isolant n'a que très peu d'effet dans le cas d'un bâtiment inerte. La température de 28°C atteinte après 14 jours de canicule est nettement plus supportable que les 32°C obtenus avec la variante biosourcée à faible inertie. La terre crue est un peu moins efficace que le béton du fait d'une conductivité plus faible, mais les niveaux de température sont semblables.

Pour obtenir un niveau d'inertie thermique suffisant, des produits sont proposés dans lesquels des matériaux biosourcés sont intégrés à du béton ou à de la terre. Sur la même maison passive ont été testés du béton de chanvre et du béton de bois comparés à du béton lourd et à une inertie légère.

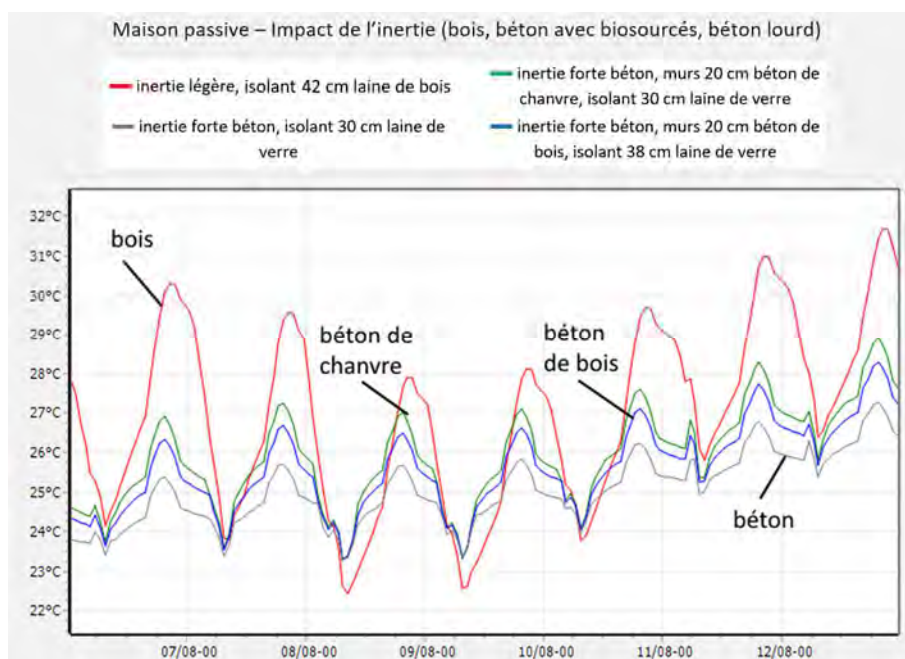


Figure 336 - Influence de l'inertie sur le confort d'une maison passive sur une semaine de canicule, météorologie Paris 2003, comparaison de bétons biosourcés au bois et au béton lourd

Les bétons biosourcés réduisent les surchauffes de manière plus significative que l'isolant à déphasage plus important (ici la laine de bois), mais leur masse volumique et leur conductivité thermique sont moins élevées que celles du béton ou de la pierre, ce qui réduit leur capacité à stocker la chaleur lors des pics de température. La température maximale est alors plus élevée que celle de la variante béton. **Pour obtenir une meilleure performance en termes de résilience (et similairement de stockage des apports**

solaires en hiver), il est préférable de séparer les couches de matériaux isolants et de matériaux inertes (à placer du côté intérieur par rapport à l'isolant).

L'inertie thermique atténue les surchauffes lors des vagues de chaleur, mais risque-t-elle de les prolonger à la fin de ces périodes ? En fait des mesures effectuées sur le HLM des années 1960 en 2003 ont montré que la température intérieure décroît rapidement dès que la température extérieure décroît, à condition d'ouvrir les fenêtres ce que les occupants font en général assez naturellement.

8.4.2.5. Les revêtements et la végétalisation des façades et toitures

Une autre mesure d'adaptation testée a pour objectif de limiter les apports thermiques liés au rayonnement incident sur les parois et toitures. Ce traitement des apports solaires est réalisé soit :

- en recourant à des revêtements à faible absorptivité (peintures blanches réfléchissantes extérieures notamment)
- en végétalisant les façades et toitures.

En plus de l'effet de masque, les végétaux participent également au rafraîchissement des bâtiments par l'évapotranspiration, mécanisme naturel des plantes, qui produit un rafraîchissement par évaporation du rideau végétal. Ceci induit cependant une consommation d'eau en fonction de l'ampleur de la végétalisation et du choix des plantes.

L'évapotranspiration des végétaux et la mise en œuvre de revêtements extérieurs plus réfléchissants participent également à l'établissement d'un microclimat plus frais aux alentours du bâtiment, qui n'a pas été étudié dans cette étude.

Les résultats obtenus montrent que l'effet d'un revêtement clair ou d'une végétalisation :

- Est important dans le cas de bâtiment non isolés, il est pertinent notamment sur des entrepôts non isolés et à la structure légère
- Est relativement faible dans le cas de parois bien isolées

Résultats des simulations :

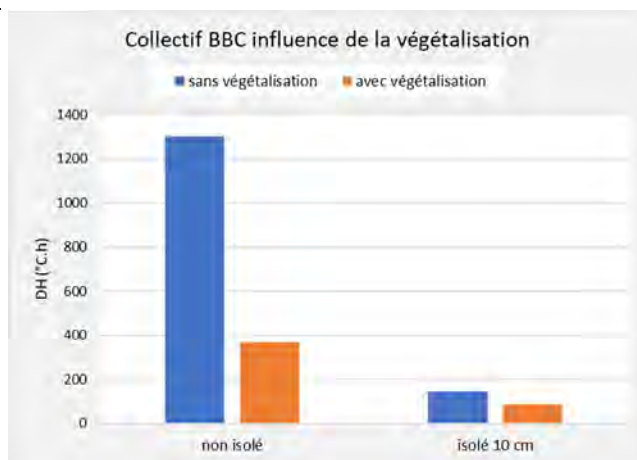


Figure 337 - Influence de la végétalisation sur le confort du logement collectif BBC, climat Paris urbain 2100 vague de chaleur médiane

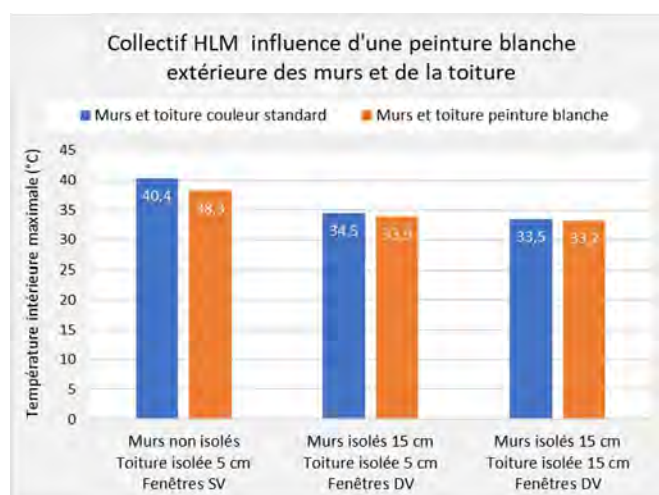


Figure 338 - Influence de la végétalisation sur le confort du logement collectif HLM, climat Paris urbain 2100 vague de chaleur extrême

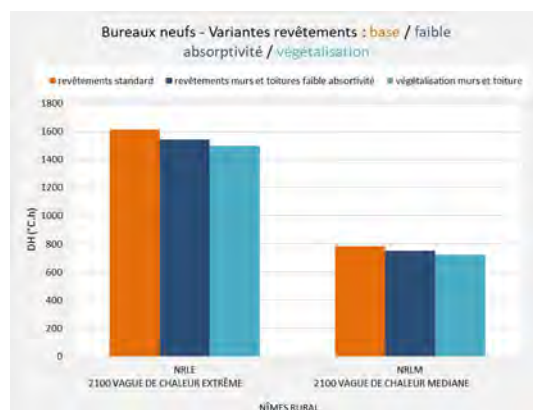


Figure 339 – influence des revêtements à faible absorptivité ou de la végétalisation sur le confort des logements collectifs BBC et des bureaux neufs, climat Nîmes rural 2100

8.4.3. Systèmes actifs de rafraîchissement et climatisation

En complément des mesures d'adaptation liées au bâti, des dispositifs de rafraîchissement actifs à haute efficacité énergétique ont également été simulés. Ces dispositifs sont étudiés en tant qu'alternatives à une climatisation active classique.

8.4.3.1. Brasseurs d'air (ventilateurs plafonniers)

Le brassage d'air améliore la sensation de confort des occupants en mettant l'air en mouvement. Une vitesse d'air de 0,5 à 1 m/s sur la peau des occupants favorise l'évaporation de la transpiration et amène l'occupant à ressentir une température 2 à 3 °C inférieure à la température ambiante selon la vitesse et le degré d'humidité de l'air.

Résultats des simulations :

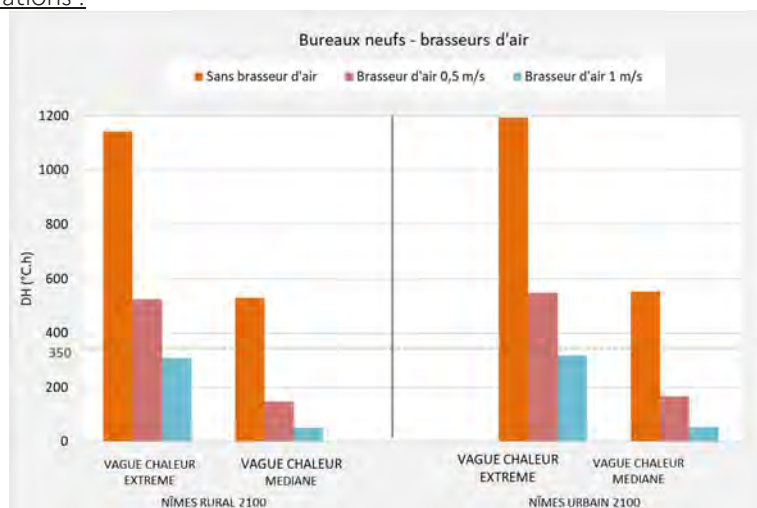


Figure 340 – effet d'un brasseur d'air sur le confort dans les bureaux neufs (bâti adapté), climat Nîmes 2100

En diminuant de 2 à 3 degrés la température ressentie, les brasseurs d'air écrêtent les pics de chaleur ressentis dans les locaux et allongent considérablement les périodes de confort. Ces dispositifs ne constituent cependant pas un réel apport de froid, ce qui limite leur capacité de rafraîchissement à ces quelques degrés d'écart. Leur apport serait insuffisant dans le cas de locaux présentant une surchauffe trop importante, c'est la raison pour laquelle ils doivent s'inscrire dans une démarche globale d'adaptation du bâti préalable (voir § 8.5).

Conditions de réalisation :

A la différence des ventilateurs sur pied, les ventilateurs plafonniers permettent d'atteindre les vitesses d'air nécessaires sur une surface de pièce plus importante et dans des conditions de confort acoustique acceptables pour une utilisation prolongée.

Une attention particulière sera apportée à la bonne conception des ventilateurs plafonniers sur les points suivants :

- Implantation : un brasseur d'air met efficacement en mouvement l'air dans un rayon de l'ordre de 1,5 à 2 m autour de son emplacement.
- Dimensionnement : retenir des brasseurs d'air de diamètre large (diamètre > 1.2 m) pour qu'ils puissent fonctionner à faible vitesse pour le confort acoustique des occupants
- Efficacité énergétique : retenir des brasseurs équipés de moteurs à courant continu, plus silencieux et plus robustes, avec une efficacité énergétique d'au moins 500 m³/h/W.

8.4.3.2. Puits climatique

Le principe du puits climatique, aussi appelé puits canadien ou puits provençal, est de faire pré-rafraîchir l'air qui va être insufflé dans le bâtiment en le faisant préalablement passer dans un échangeur air-sol constitué d'un conduit enterré à 1,5 à 2 m de profondeur dans le sol sur une distance d'environ 40 m. Ce dispositif mobilise la fraîcheur du sol dont la température varie peu sur l'année à cette profondeur.

L'air est rafraîchi de 7 à 15 °C par rapport à l'extérieur, selon la longueur, le diamètre, la conductivité thermique et la profondeur du tube, le débit d'air et la nature du sol.

Conditions de réalisation :

Le puits climatique est souvent associé à une ventilation double flux dont il prétraite l'air neuf. Il contribue en été à diminuer de quelques degrés l'ambiance intérieure selon le débit traité par le puits. Pour des performances optimales, une régulation fine de cet apport d'air neuf rafraîchi est nécessaire, notamment en basculant entre air issu du puits le jour et air extérieur la nuit.

Des précautions de mise en œuvre doivent être prises pour éviter que l'humidité issue de la condensation ne dégrade la qualité de l'air intérieur.

Résultats des simulations :

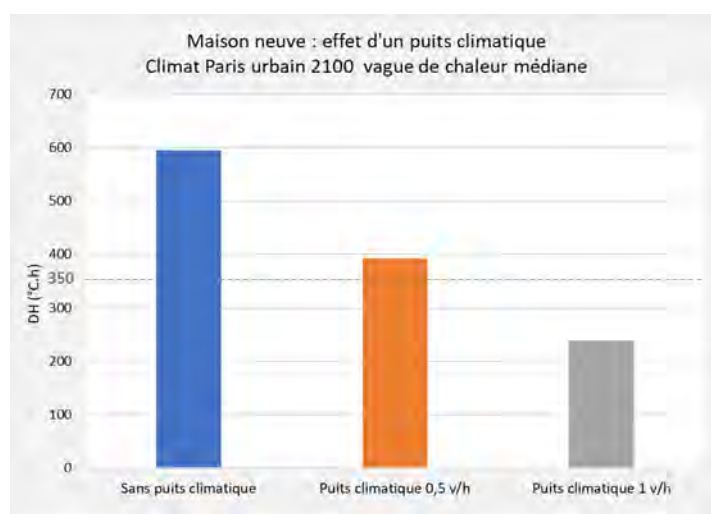


Figure 341 – Impact d'un puits climatique sur le confort de la maison neuve (bâti adapté), climat Paris urbain 2100 vague de chaleur médiane

Les simulations montrent qu'en diminuant effectivement de 2 à 3 °C les températures intérieures, le puits climatique **écrête les pics de chaleur et allonge notablement les périodes de confort**.

L'apport de froid reste cependant limité par la capacité de l'échangeur air-sol et par le débit traité. Se limiter au débit hygiénique est souvent insuffisant (de l'ordre de 0,7 à 1 vol/h en logement ou en bureaux). Atteindre 2 à 3 vol/h permet un apport de froid plus conséquent, mais nécessite de prévoir un dimensionnement suffisant du puits climatique et de l'installation de ventilation, ce qui peut entraîner des coûts importants (terrassement, gaines et moteur de ventilation...).

La capacité de rafraîchissement est donc ici aussi limitée à quelques degrés d'écrtage, elle serait également insuffisante dans le cas de locaux présentant une surchauffe trop importante, c'est la raison pour laquelle le puits climatique doit s'inscrire dans une démarche globale d'adaptation du bâti préalable (voir § 8.5).

8.4.3.3. Rafraîchissement adiabatique

Le principe du rafraîchissement adiabatique, aussi appelé rafraîchissement par évaporation, repose sur un changement d'état liquide à gazeux. Cette réaction est endothermique, elle absorbe de l'énergie

sous forme de chaleur. Les systèmes adiabatiques utilisent ainsi l'évaporation d'eau afin de refroidir l'air ambiant, ils peuvent être :

- Directs : l'air ambiant est refroidi en le faisant circuler au contact d'une surface mouillée, ce qui va également apporter de l'humidité à l'air ambiant.
- Indirects : le flux primaire arrive dans l'air ambiant sans être humidifié car il est rafraîchi via un échangeur par un flux secondaire. Ce flux secondaire est rafraîchi par évaporation en circulant en contact d'une surface mouillée, il augmente sa teneur en humidité.
- Indirects à point de rosée : dans ce cas, la technologie utilisée permet de refroidir l'air soufflé sous sa température humide, ce qui augmente la capacité de rafraîchissement du système.

Résultats des simulations :

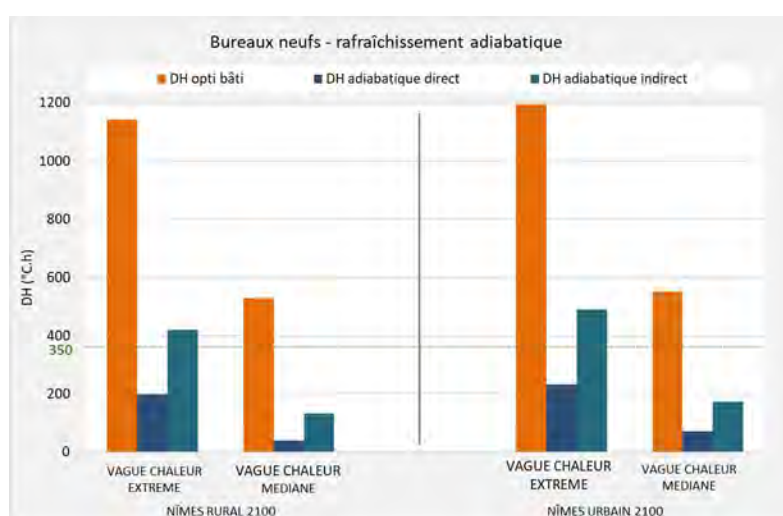


Figure 342 - Impact du rafraîchissement adiabatique sur le confort des bureaux neufs (bâti adapté), climat Nîmes 2100

Les simulations montrent un effet très important sur les conditions de confort, l'apport de froid est important pour une consommation énergétique modique mais moyennant une consommation d'eau.

Contraintes et solutions associées :

Les rafraîchisseurs d'air mobiles, souvent vendus en grande surface de bricolage et installés en logement **utilisent le principe du rafraîchissement adiabatique par humidification directe de l'air**. Attention, dans le cas de l'humidification directe, l'apport d'humidité important dans les locaux, peut avoir des effets négatifs sur le confort, la santé et la pérennité des ouvrages. L'humidification indirecte sera donc à privilégier.

Cette technologie voit son efficacité se dégrader fortement si l'humidité extérieure augmente. Dans ce cas, l'humidification supplémentaire de l'air n'est pas possible ce qui annule l'effet de refroidissement. Elle est donc moins pertinente pour les climats chauds et humides qui peuvent être rencontrés.

8.4.3.4. La climatisation, comment limiter les consommations

La climatisation est un recours évident pour limiter les surchauffes. Elle n'a pas fait l'objet d'une étude complète dans le cadre de ce projet, mais elle a été partiellement étudiée, notamment pour servir de base de comparaison avec les variantes faisant l'objet d'adaptations alternatives. Les enseignements suivants ont toutefois pu être retirés des résultats.

Pour limiter les consommations de climatisation, comme pour les dispositifs de rafraîchissement, il conviendra de l'envisager dans une démarche globale intégrant le bâti et les occupants :

- Un travail préalable sur le bâti est indispensable pour limiter les besoins de froid.

- Un travail important avec les occupants est indispensable, la consommation est très sensible au niveau de consigne de température retenu. La consigne « réglementaire » à 26°C est très souvent abaissée par habitude ou par comparaison avec d'autres ambiances surclimatisées (commerces, véhicules...).

Pour limiter les consommations de climatisation, les pistes suivantes peuvent également être suivies :

Choix d'un émetteur limitant par nature la puissance d'émission de froid

Les planchers et plafonds rafraîchissants par exemple ont une puissance d'émission de froid limitée, la température de surface de ces émetteurs est en effet limitée par les risques de condensation. Le système est alors intrinsèquement bridé : la production de froid est disponible et contribue à un écrêtage, mais les risques d'abaissement trop importants de la consigne et de surconsommation sont limités. On parle dans ce cas plus de rafraîchissement que de climatisation.

Climatiser de façon ciblée

Les simulations confirment que, dans un logement, climatiser uniquement la pièce principale conduit à une amélioration globale du confort, y compris de façon notable sur les autres pièces notamment.

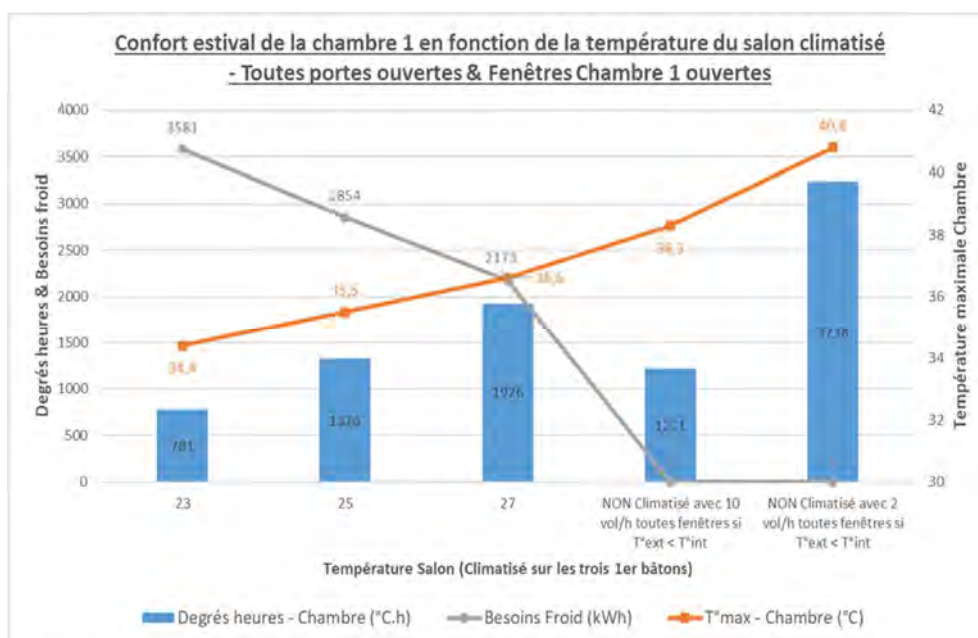


Figure 343 - Maison 1970 : impact de la climatisation de la pièce principale sur le confort de la chambre, climat Nîmes Urbain 2100, vague de chaleur extrême

Mobiliser la géothermie

La climatisation sur géothermie permet de produire du froid avec une pompe à chaleur avec de très bonnes performances. L'avantage est également dans ce cas de ne pas contribuer à l'îlot de chaleur urbain. Un fonctionnement en mode géocooling peut même être envisagé selon les régimes de température de la source amont et des émetteurs (par exemple entre des sondes géothermiques et un plancher rafraîchissant). La PAC ne fonctionne pas la source amont est reliée aux émetteurs via un échangeur.

Articuler plusieurs systèmes actifs

Les simulations ont également permis de tester l'intérêt de combiner intelligemment deux systèmes actifs : les brasseurs d'air et la climatisation.

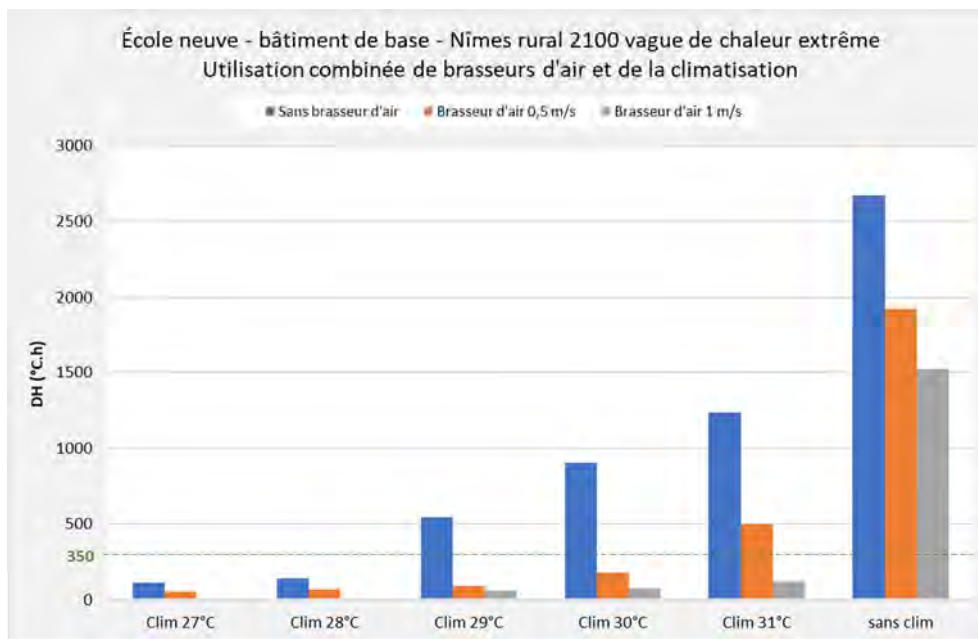


Figure 344 - Effet de l'utilisation combinée de la climatisation et d'un brasseur d'air dans l'école neuve, climat Nîmes Urbain 2100, vague de chaleur extrême

Les résultats montrent que le confort peut être obtenu soit :

- Logiquement en climatisant à 27 ou 28°C de consigne sans utiliser de brasseurs d'air
- Soit en augmentant la consigne à 29 ou 30°C et en utilisant en complément un brasseur d'air

La stratégie combinant un abaissement moindre de la température par la climatisation et une amélioration de la température ressentie conduit à un confort suffisant pour une consommation énergétique moindre.

Ici encore l'utilisateur a une place centrale dans l'obtention combinée du confort et de la performance énergétique. Il doit être parfaitement informé et motivé pour opter pour la stratégie qui conduit au confort à moindre coût en combinant les deux systèmes.

- S'il a la main sur la consigne de température, il est beaucoup plus simple pour lui de baisser la consigne que de pour être en situation de confort
- S'il n'a pas la main sur la consigne, la seule action qui lui reste est de mettre en route le brasseur d'air

Alimenter la climatisation avec une production photovoltaïque

Enfin, une fois ces précautions prises pour en limiter les consommations, les consommations résiduelles de climatisation peuvent être alimentées par une production photovoltaïque.

8.5. Quelle stratégie pour une adaptation à long terme ?

8.5.1. L'action sur le bâti est-elle suffisante ?

Les résultats présentés ci-dessous montrent le niveau de confort atteints avec une action sur plusieurs leviers d'adaptation du bâti : protection solaire extérieure, ventilation nocturne automatisée, triple vitrage, forte isolation par l'extérieur pour les bâtiments anciens.

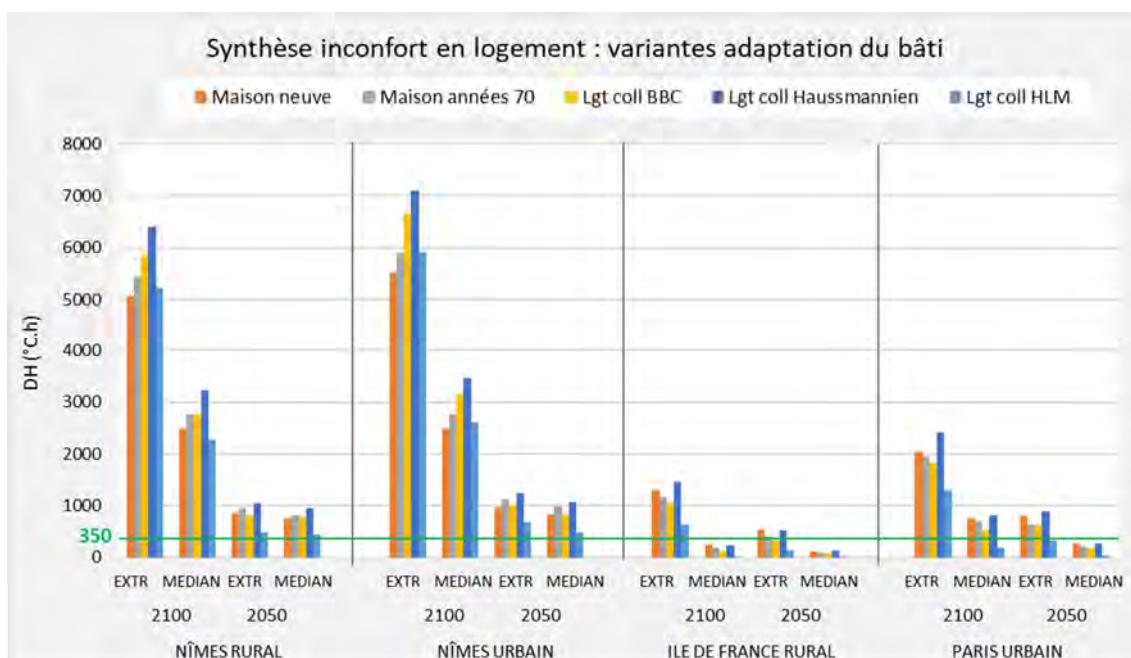


Figure 345 - Synthèse des niveaux d'inconfort obtenus sur les bâtiments de logement avec adaptations du bâti

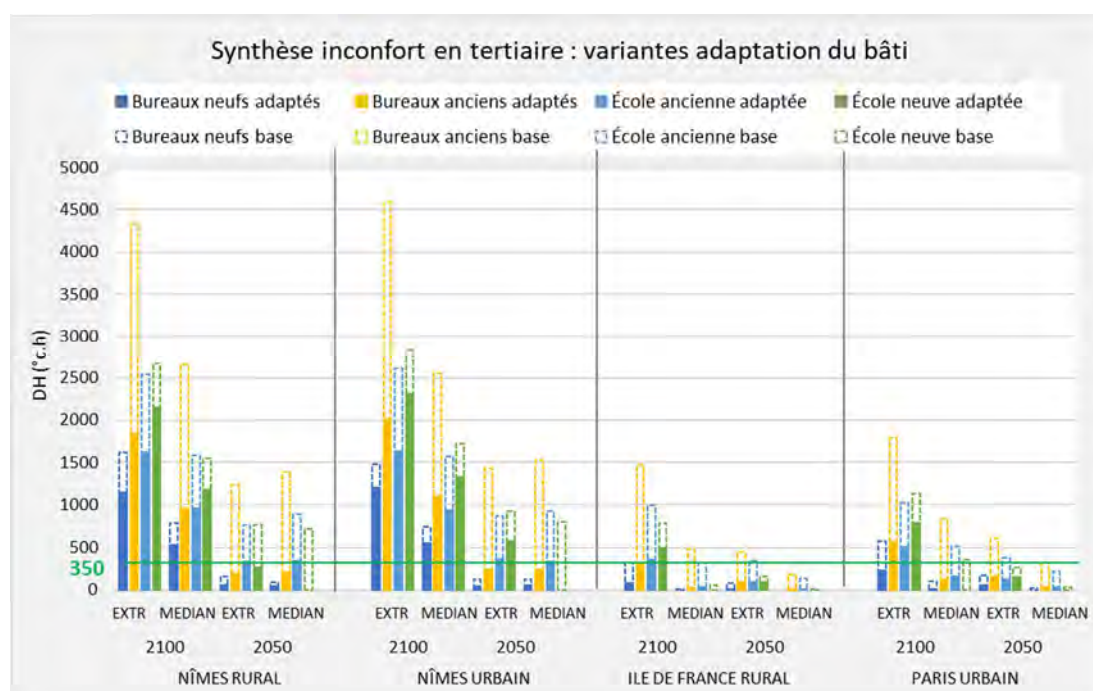


Figure 346 - Synthèse des niveaux d'inconfort obtenus sur les bâtiments tertiaires avec adaptations du bâti

Les simulations montrent qu'en adoptant une stratégie d'adaptation forte du bâti les conditions de confort sont nettement améliorées. **Cependant, les actions d'adaptation sur le bâti seules ne sont pas suffisantes pour garantir des conditions de confort pour les climats projetés en fin de siècle sur tous les bâtiments :**

- En bâtiments tertiaires, le confort n'est assuré que pour les climats projetés 2050.
- En logement, le confort n'est assuré que pour les climats projetés 2050 les moins critiques.

Pour assurer un confort sur la totalité des climats projetés d'ici la fin de siècle, en plus d'une action forte d'adaptation du bâti indispensable et à faire en priorité, la mise en place de dispositifs de rafraîchissement actifs seront nécessaires à terme pour écrêter les vagues de chaleur les plus importantes.

8.5.2. La mise en place d'un système actif est-elle suffisante ?

La mise en œuvre de dispositifs « actifs » de contrôle des surchauffes ne doit être envisagée qu'après un travail le plus complet possible d'adaptation du bâti.

- Dans le cas de la climatisation : climatiser un bâti non adapté conduirait naturellement à des surconsommations
- Dans le cas de dispositifs de rafraîchissement, comme évoqué ci-dessus, leur capacité de rafraîchissement est limitée à un écrêtage des surchauffes. Les mettre en œuvre sur un bâti non adapté ne suffit pas à obtenir des conditions de confort suffisantes.

8.5.3. Une stratégie globale à intégrer aux démarches de conception

Il convient donc de prévoir une stratégie d'adaptation à long terme mêlant :

- Sobriété des usages des occupants, anticiper leur niveau d'implication dans la gestion du bâtiment, et la nature subjective des sensations de confort
- Conception d'un bâti efficace, adapté aux surchauffes
- Équipements actifs de rafraîchissement pour écrêter les pics de surchauffes résiduels

Cette démarche globale d'adaptation est à introduire dans les habitudes de conception de bâtiments neufs et de rénovation, comme un enjeu fort.

Sur l'adaptation du bâti, les mesures d'adaptation au confort d'été peuvent être :

- Compatibles avec la recherche de la performance d'hiver (isolation, étanchéité à l'air notamment),
- Antagonistes avec la performance d'hiver (vitrages à facteurs solaires bas limitant les apports solaires gratuits d'hiver) ou le confort visuel (limitation des surfaces vitrées)

La conception d'une enveloppe devra donc chercher en permanence la meilleure synthèse entre ces différents objectifs : privilégier par exemple les protections solaires amovibles aux vitrages à faible facteur solaire, dimensionner les protections fixes pour limiter le rayonnement en été sans trop réduire les apports en hiver.

Sur les systèmes de rafraîchissement, anticiper pour disposer d'un apport de froid bien dimensionné et performant a un impact fort sur les choix de systèmes énergétiques à mettre en place :

- Choix d'un système réversible,
- Ventilation double flux pour pouvoir insuffler de l'air rafraîchi par puits climatique ou rafraîchissement adiabatique
- Précâblage pour l'installation ultérieure de brasseurs d'air

8.5.3.1. Leviers pour la conception de bâtiments neufs adaptés au changement climatique

Famille de mesures	Mesure d'adaptation	Testé dans Resilience	Effet sur le confort	Sensibilité au comportement des occupants	Contraintes	Niveau de coût
Occupants et usages internes	Gestion des ouvrants par les occupants	O	***	Oui	Action sur les protections solaires et l'ouverture des baies. Besoin de pédagogie et d'accompagnement.	Sans surcoût
	Apports internes	N	**	Oui	Choix des équipements et durée d'usage	€
Architecture bioclimatique	Orientation principale	N	**	Non	Eviter les orientations Est et Ouest. Autres paramètres à prendre en compte : insertion au site, vues, acoustique, urbanisme...	Sans surcoût
	Taux d'ouverture des façades	N	**	Non	Assurer un éclairage naturel suffisant.	Sans surcoût
Conception du bâti	Protection solaire (casquettes, volets, stores)	O	***	Oui si gestion manuelle	Perméable pour la ventilation nocturne et ménager le confort visuel.	€
	Isolation	O	*	Non	En façade privilégier l'ITE pour l'inertie. Isolant denses en combles et rampants	€€

Famille de mesures	Mesure d'adaptation	Testé dans Resilience	Effet sur le confort	Sensibilité au comportement des occupants	Contraintes	Niveau de coût
	Type de vitrage	○	*	Non	Double ou triple vitrage performant. Facteurs solaires faibles sauf au Sud.	€
	Étanchéité à l'air	N	*	Non		€
	Inertie	○	***	Non	Action possible sur façades (privilégier l'isolation par l'extérieur), structure, planchers (privilégier les matériaux lourds)	€€
	Type de plancher bas (vide sanitaire ou terre-plein)	○	*	Non	Privilégier plancher bas sur terre-plein	€
	Type de plancher haut	○	**	Non	Privilégier des planchers hauts à forte inertie (dalle béton...)	€€
	Aération nocturne (ouverture des fenêtres)	○	***	Oui si gestion manuelle	Bonne gestion par les occupants si manuelle, maintenance si automatique. Autres contraintes si ouverture des fenêtres : bruit, pluie, intrusion, moustiques	€
	Revêtements extérieurs clairs (peintures réfléchissantes)	○	*	Non		€
	Végétalisation (murs et toitures)	○	*	Non		€€
Systèmes actifs	Brasseurs d'air (ventilateurs plafonniers)	○	**	Oui	Hauteur sous pales > 2,3 m.	€
	Rafraîchissement par évaporation (adiabatique)	○	***	Non	Perte d'efficacité en climats humides. Le plus souvent couplé à une VMC double flux.	€
	Puits climatique (canadien, provençal)	○	**	Non	Emprise au sol et terrassements importants. Le plus souvent couplé à une VMC double flux.	€€
	Climatisation	○	***	Oui, si réglage manuel de la consigne		€

Tableau 32 - Panel des mesures d'adaptation en conception neuve

8.5.3.2. Leviers d'adaptation mobilisables en rénovation

Famille de mesures	Mesure d'adaptation	Testé dans Resilience	Effet sur le confort	Sensibilité au comportement des occupants	Contraintes	Niveau de coût
Occupants et usages internes	Gestion des ouvrants par les occupants	○	***	Oui	Action sur les protections solaires et l'ouverture des baies. Besoin de pédagogie et d'accompagnement.	Sans surcoût

Famille de mesures	Mesure d'adaptation	Testé dans Resilience	Effet sur le confort	Sensibilité au comportement des occupants	Contraintes	Niveau de coût
	Apports internes	N	***	Oui	Choix des équipements et durée d'usage	€
Adaptation du bâti	Protection solaire (casquettes, volets, stores)	O	***	Oui si gestion manuelle	Perméable pour la ventilation nocturne et ménager le confort visuel.	€
	Isolation	O	*	Non	En façade privilégier l'ITE pour l'inertie. Isolant denses en combles et rampants	€€
	Type de vitrage	O	*	Non	Double ou triple vitrage performant. Facteurs solaires faibles sauf au Sud.	€
	Étanchéité à l'air	N	*	Non		€
	Inertie	O	***	Non	Action possible sur façades	€€
	Aération nocturne (ouverture des fenêtres)	O	***	Oui si gestion manuelle	Bonne gestion par les occupants si manuelle, maintenance si automatique. Autres contraintes si ouverture des fenêtres : bruit, pluie, intrusion, moustiques	€
	Revêtements extérieurs clairs (peintures réfléchissantes)	O	*	Non		€
	Végétalisation (murs et toitures)	O	*	Non		€€
Systèmes actifs	Brasseurs d'air (ventilateurs plafonniers)	O	**	Oui	Hauteur sous paves > 2,3 m.	€
	Rafraîchissement par évaporation (adiabatique)	O	***	Non	Perte d'efficacité en climats humides. Le plus souvent couplé à une VMC double flux.	€€
	Puits climatique (canadien, provençal)	O	**	Non	Emprise au sol et terrassements importants. Le plus souvent couplé à une VMC double flux.	€€
	Climatisation	O	***	Oui, si réglage manuel de la consigne		€

Tableau 33 - Panel des mesures d'adaptation en rénovation

8.5.4. Quel est l'impact environnemental des mesures d'adaptation ?

Le projet a également permis de vérifier que les mesures d'adaptation au changement climatique proposées n'entraînent pas d'impacts environnementaux adverses sur le cycle de vie des bâtiments. En effet il faut éviter par exemple que les effets bénéfiques sur la santé liés à la réduction des surchauffes ne soient annihilés par des émissions toxiques liées à la fabrication des produits de construction mis en œuvre.

Pour étudier les impacts environnementaux liés à l'adaptation au changement climatique des bâtiments, l'approche adoptée est de comparer les ACV de deux bâtiments ayant des conditions de confort semblables : le bâtiment qui a fait l'objet d'adaptations « Bâtiment adapté » et le bâtiment de base, non adapté, mais équipé de la climatisation.

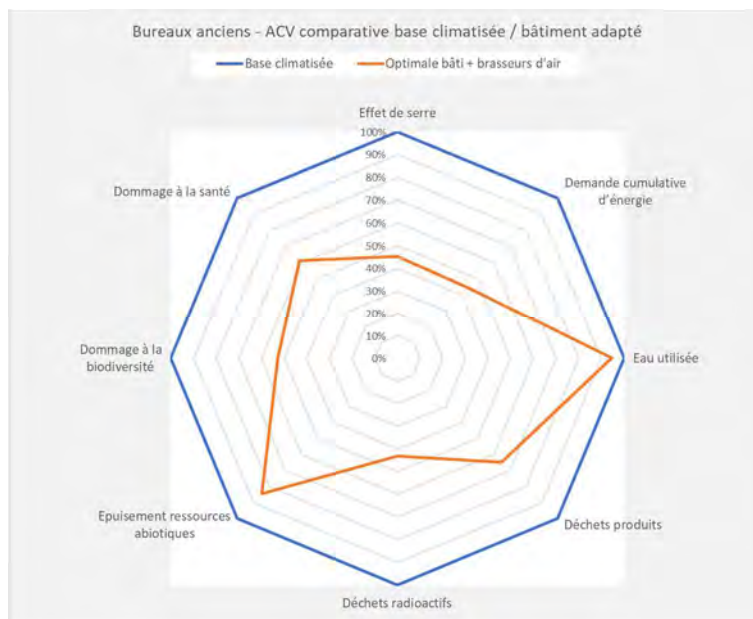


Figure 347 - Comparaison des impacts pour les différents types de rafraîchissement pour le bâtiment de bureaux ancien

Les résultats d'ACV montrent bien que les bâtiments adaptés présentent des impacts environnementaux diminués par rapport à la base climatisée pour quasiment tous les indicateurs. Cette diminution est importante pour les indicateurs effet de serre, demande cumulative d'énergie, déchets, déchets radioactifs, dommage à la santé et dommage à la biodiversité. La quantité d'eau utilisée sur le cycle de vie reste sensiblement la même qu'en base, elle est peu impactée par les mesures d'adaptation prises. Il faut noter que la production d'électricité consomme de l'eau, donc la climatisation électrique (et dans une moindre mesure le rafraîchissement adiabatique) contribue à augmenter l'indicateur d'utilisation d'eau.

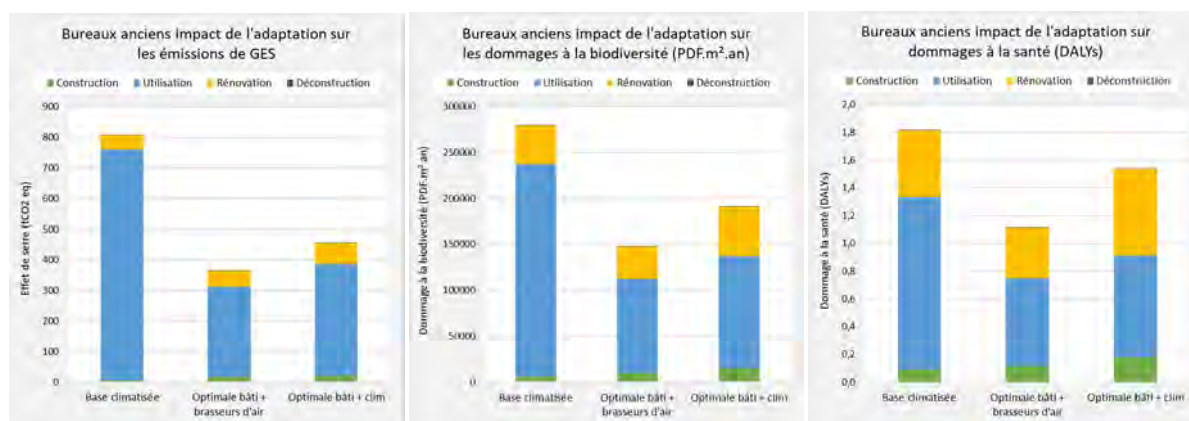


Figure 348 - détail des impacts par étape pour 3 indicateurs selon la stratégie d'adaptation pour les bureaux anciens

L'analyse des résultats par étape montre que les impacts liés à la mise en œuvre des mesures d'adaptation des bâtiments sont très largement compensés par les diminutions d'impacts réalisées pendant l'étape d'utilisation, tout au long de la vie du bâtiment.

La diminution des impacts à l'étape utilisation provient majoritairement des baisses de consommation de chauffage. En effet, une approche globale de l'adaptation aux surchauffes conduit également à une amélioration de la performance énergétique hivernale (isolation, étanchéité à l'air par exemple).

8.5.5. Quel impact économique des mesures d'adaptation ?

De la même façon que pour les impacts environnementaux, l'impact économique des mesures d'adaptation mesuré à long terme est favorable. **Les coûts d'investissement liés à la mise en œuvre des mesures d'adaptation des bâtiments sont compensés par les diminutions de coûts d'exploitation.** Ici encore, une approche globale de l'adaptation aux surchauffes conduit également à une amélioration de la performance énergétique hivernale (isolation, étanchéité à l'air par exemple). **La diminution des coûts d'exploitation provient majoritairement des baisses de consommation de chauffage.**

8.6. Conclusions et perspectives

L'étude a tout d'abord montré le niveau d'adaptation nécessaire pour faire face aux climats projetés d'ici la fin du siècle.

- Une action d'adaptation sur le bâti seule peut être suffisante pour garantir le confort pour certains bâtiments pour les climats projetés en 2050. En revanche, pour assurer un confort sur la totalité des climats projetés d'ici la fin de siècle, en plus d'une action forte d'adaptation du bâti indispensable et à faire en priorité, la mise en place de dispositifs de rafraîchissement actifs seront nécessaire à terme pour écrêter les vagues de chaleur les plus importantes.
- La mise en œuvre de dispositifs « actifs » de contrôle des surchauffes ne doit être envisagée qu'après un travail le plus complet possible d'adaptation du bâti pour éviter les sous-dimensionnements ou les surconsommations.

Il convient donc de prévoir une stratégie progressive d'adaptation à long terme faisant intervenir les trois étapes suivantes dans cet ordre :

- Sobriété des usages des occupants : les occupants doivent être mobilisés pour contribuer à la résilience, par exemple par une gestion appropriée des protections solaires et des ouvrants, ainsi que par la sobriété dans l'usage d'équipements qui génèrent des apports de chaleur dans les locaux.
- Conception d'un bâti efficace, adapté aux surchauffes et fournissant aux occupants les moyens de contrôler efficacement les surchauffes, notamment en termes de protection solaire et d'aération. Le rôle important de l'isolation thermique est à souligner, en plus de réduire les besoins de chauffage, elle protège aussi de la chaleur et doit constituer une priorité parmi les mesures d'adaptation.
- Enfin et en complément des actions précédentes, des équipements actifs de rafraîchissement pour écrêter les pics de surchauffes résiduels. Les dispositifs à haute performance énergétique seront privilégiés (brasseurs d'air, rafraîchissement adiabatique...). Si la climatisation est retenue, pour en limiter les consommations, il est possible de limiter les consignes, climatiser des locaux de façon ciblée, utiliser la climatisation à une consigne plus élevée en combinaison avec un brasseur d'air ou l'alimenter avec du photovoltaïque.

Le projet a enfin permis de vérifier que les mesures d'adaptation au changement climatique proposées n'entraînent pas d'impacts environnementaux adverses sur le cycle de vie des bâtiments et que les coûts d'investissement liés à la mise en œuvre des mesures d'adaptation des bâtiments sont compensés par les diminutions de coûts d'exploitation.

9. Conclusion / Perspectives

Des données climatiques prospectives à l'horizon moitié et fin de siècle ont été élaborées pour deux régions climatiques (Ile de France et Nîmes), avec ou sans prise en compte d'un effet d'îlot de chaleur. Ces données ont permis d'évaluer le niveau de confort thermique d'un échantillon de bâtiments, récents ou anciens (logements, tertiaire, écoles) en utilisant un indicateur en degrés-heures d'inconfort, intégrant à la fois l'intensité et la durée des surchauffes. Différentes mesures d'amélioration ont été évaluées. S'agissant de prospective, il n'est pas possible de se baser sur des mesures donc la simulation numérique a été utilisée mais des études de validation avaient été menées antérieurement, par rapport à des mesures et à des outils de référence internationaux.

Ces activités de recherche ont permis de rédiger un cahier de recommandations à l'intention des professionnels de la rénovation thermique et des maîtres d'ouvrage. Des échanges ont eu lieu sur les orientations et les résultats de ces travaux dans le cadre d'un séminaire externe au début, au milieu et à la fin du projet.

Parmi les perspectives envisageables, on peut citer :

- L'élaboration de données climatiques prospectives pour d'autres climats, par exemple les différentes zones climatiques de la réglementation,
- L'étude d'autres archétypes, par exemple les bâtiments de santé,
- L'étude de systèmes innovants concernant par exemple la ventilation naturelle anti-bruit, la climatisation adiabatique à point de rosée, le géocooling,
- les liens entre les mesures à l'échelle d'un bâtiment et à l'échelle d'un quartier.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akbari H., Matthews H. D., Global cooling updates: Reflective roofs and pavements, *Energy and Buildings* 55(2012) 2–6
- Albers R.A.W., Bosch P.R., Blocken B., van den Dobbelsteen A.A.J.F., van Hove L.W.A., Spit T.J.M., van de Ven F. van Hooff T., Rovers V., Overview of challenges and achievements in the climate adaptation of cities and in the Climate Proof Cities program, *Building and Environment* 83 (2015), pp 1-10
- Belcher, S. E., Hacker, J. N. et Powell, D. S., 2005. Constructing design weather data for future climates. In : *Building Services Engineering Research and Technology* (2005) Vol. 26, n° 1, p. 49-61
- Brun A., Spitz C., Wurtz E. and Mora L., Behavioural comparison of some predictive tools used in a low-energy building, Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, July 27-30, 2009
- Chan ALS. Developing future hourly weather files for studying the impact of climate change on building energy performance in Hong Kong. *Energy and Buildings* 2011; 43:2860–8.
- Collins L, Natarajan S, Levermore G. Climate change and future energy consumption in UK housing stock. *Building Serv Eng Res Technol* 2010; 31:75–90
- Costa H., Floater G., Hooyberghs H., Verbeke S. and De Ridder K., Climate change, heat stress and labour productivity: A cost methodology for city economies, Centre for Climate Change Economics and Policy Working Paper No. 278, July 2016
- Cox R., Drews M., Rode C., Balslev Nielsen S., Simple future weather files for estimating heating and cooling demand, *Building and Environment* 83 (2015) pp 104-114
- Crawley DB. Estimating the impacts of climate change and urbanization on building performance. *J Building Performance Simulation* 2008; 1:91–115.
- De Perthuis C., Hallegatte S., Lecocq F., 2010, *Economie de l'adaptation au changement climatique*. Rapport du Conseil Economique pour le Développement Durable. 90 p.
- de Wilde P., Coley D., The implications of a changing climate for buildings, *Building and Environment* (2012) Vol. 55, pp 1-7
- Dupin, N., Peuportier, B., Duer, K., Cohen, M., Favre, B., Mejri, O. and Vorger, E. Evaluation of ventilative cooling in a single family house - Characterization and modelling of natural ventilation, Sustainable building conference, Barcelona, October 2014
- Frank T. Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland. *Energy and Buildings* 2005; 37:1175–1185.
- Givoni B., Comfort, climate analysis and building design guidelines, *Energy and Buildings*, 18 (1992) 11-23
- Gromke CB, Blocken B, Janssen WD, Merema B, van Hooff T, Timmermans HJP. CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Building and Environment* 2015; 83:11-26.

- Guan L. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings. *Building and Environment* 2009; 44:793–800.
- Gupta R, Gregg M. Using UK climate change projections to adapt existing English homes for a warming climate. *Building and Environment* 2012;55 :20-42.
- Hacker JN, De Saulles TP, Minson AJ, Holmes MJ. Embodied and operational carbon dioxide emissions from housing: a case study on the effects of thermal mass and climate change. *Energy and Buildings*, 40 (2008) 375–384
- Holmes MJ, Hacker JN. Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century. *Energy and Buildings* 2007; 39:802–814
- Huijbregts M.A.J. et al. 2016. 'ReCiPe 2016 - A Harmonized Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level - Report I: Characterization'. RIVM Report 2016-0104. Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment.
- ISO 7730 : 2005, Ergonomie des ambiances thermiques -- Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local
- Jenkins DP, Peacock AD, Banfill PFG. Will future low-carbon schools in the UK have an overheating problem? *Building and Environment* 2009; 44:490–501.
- Jenkins DP, Patidar S, Banfill PFG, Gibson GJ. Probabilistic climate projections with dynamic building simulation: predicting overheating in dwellings. *Energy and Buildings* 2011; 43:1723–1731.
- Jenkins DP, Patidar S. and Simpson S., *Quantifying Change in Buildings in a Future Climate and Their Effect on Energy Systems, Buildings* (2015), Vol. 5, pp 985-1002
- Jolliet, O., Saadé-Sbeih M., Shaked S., Jolliet A., and Crettaz P., 2015. *Environmental Life Cycle Assessment*. CRC Press. CRC Press.
- Jouzel J., *Le climat de la France au XXIe siècle - Volume 4 - Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer*, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie
- Kendrick C, Ogden R, Wang X, Baiche B. Thermal mass in new build UK housing: a comparison of structural systems in a future weather scenario. *Energy and Buildings* 2011; 48: 40–49.
- Kershaw T, Eames M, Coley D. Assessing the risk of climate change for buildings: a comparison between multi-year and probabilistic reference year simulations. *Building and Environment* 2011; 46: 1303–1308.
- Kolokotroni M, Ren X, Davies M, Mavroganni A. London's urban heat island: impact on current and future energy consumption in office buildings. *Energy and Buildings* 2012; 47: 302–311.
- Lomas KJ, Ji Y. Resilience of naturally ventilated buildings to climate change: advanced natural ventilation and hospital wards. *Energy and Buildings* 2009 ; 41 :629–653.
- Maillard P., David F., Dechesne M., Bailly J.B., Lesueur E., 2014. Caractérisation des îlots de chaleur urbains et test d'une solution d'humidification de chaussée dans le quartier de la Part-Dieu à Lyon. *Techniques, Sciences, Méthodes*, 6, 23–35.
- Mairie de Paris, *Stratégie de Résilience de Paris*, Octobre 2017

- Mavrogianni A, Davies M, Batty M, Belcher SE, Bohnenstengel SI, Carruthers D, et al. The comfort, energy and health implications of London's urban heat island. *Building Serv Eng Res Technol*; 2011:35–52.
- Mavrogianni A, Wilkinson P, Davies M, Biddulph P, Oikonomou E. Building characteristics as determinants of propensity to high indoor summer temperatures in London dwellings. *Building and Environment*; 2012:55.
- Millet J.-R., Videau J.-B., Peuportier B., Cardonnel C., Prévot S., Bouchet J.-A., Moujalled B., Salomon T., Allard F., Groupe Scientifique sur le Confort d'Eté, Rapport final, Décembre 2011
- Montazeri H, Blocken B, Hensen JLM. Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis. *Building and Environment* 2015 ; 83: 129-141.
- Munaretto, F., Recht, T., Schalbart, P. and Peuportier, B. Empirical validation of different internal superficial heat transfer models on a full-scale passive house. *Journal of Building Performance Simulation*, June 2017
- ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique), Changement Climatique - Coûts des impacts et pistes d'adaptation, Rapport au Premier ministre et au Parlement, La documentation Française, 2009
- ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique), Vers un 2e plan d'adaptation au changement climatique pour la France Enjeux et recommandations, La documentation Française, 2017
- Peuportier, B., Leurent, F. and Roger-estradé, J. (coordination), Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures, Tome 2, Presses de l'Ecole des Mines, 546p, janvier 2019
- Peuportier B., Thiers S., Les maisons passives : sont-elles confortables ? écologiques ? *Revue Chauffage, Ventilation et Climatisation*. No 857, pp. 22-25, janvier-février 2009
- Peuportier B., Bancs d'essais de logiciels de simulation thermique, Journée SFT-IBPSA « Outils de simulation thermo-aérodynamique du bâtiment », La Rochelle, mars 2005
- Peuportier B., Efficacité énergétique, Opération de réhabilitation en HLM, Fiche ARENE Ile de France, mars 2004
- Peuportier, B. Assessment and design of a renovation project using life cycle analysis and Green Building Tool, Sustainable Building 2002 Conference, Oslo, septembre 2002
- Pomianowski M., Hede Andersen C., Heiselberg P., Technical potential of evaporative cooling in Danish and European Condition, *Energy Procedia* 78 (2015) 2421 – 2426
- Porritt SM, Cropper PC, Shoa L, Goodier CI. Ranking of interventions to reduce dwelling overheating during heat waves. *Energy and Buildings* 55(2012)16–27
- Pyke C, McMahon S, Larsen L, Rajkovich N, Rohloff A. Development and analysis of climate sensitivity and climate adaptation opportunities indices for buildings. *Building and Environment*; 2012:55, ppp 141-149.
- Radhi H. Evaluating the potential impact of global warming on the UAE residential buildings - A contribution to reduce the CO2 emissions. *Building and Environment* 2009 ; 44 : 2451–2462.

- Robert A, Kummert M. Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. *Building and Environment*; 2012;55, pp 150-158.
- Roders M., Straub A., Assessment of the likelihood of implementation strategies for climate change adaptation measures in Dutch social housing, *Building and Environment* 83 (2015), pp 168-176
- Roux C., Schalbart P., Assoumou E. and Peuportier B., Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts, *Applied Energy* 184 (2016), pp. 619-629
- Seppanen O, Fisk WJ, Faulkner D. Control of temperature for health and productivity in offices. 2004. Report NBNL-55448.
- Smith ST, Hanby VI, Harpham C. A probabilistic analysis of the future potential of evaporative cooling systems in a temperate climate. *Energy and Buildings* 2011; 43:507–516.
- Synnefa A., Saliari M., Santamouris M., Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens, *Energy and Buildings* 55 (2012) 7–15
- Tomlinson CJ, Chapman L, Thornes JE, Baker CJ. Including the urban heat island in spatial heat risk assessment strategies: a case study for Birmingham, UK. *Int J Health Geographics* 2011; 10:42.
- van Hooff T., Blocken B., Hensen J.L.M. Timmermans H.J.P., On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for residential buildings, *Building and Environment* 82 (2014), pp 300-316
- Vorger E., Schalbart P., Peuportier B., Integration of a Comprehensive Stochastic Model of Occupancy in Building Simulation to Study how Inhabitants Influence Energy Performance, 30th International PLEA Conference, Ahmedabad, December 2014
- Wan KKW, Li DHW, Liu D, Lam JC. Future trends of building heating and cooling loads and energy consumption in different climates. *Building and Environment* 2011; 46:223–234.
- Wang X, Chen D, Ren Z. Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia. *Building and Environment* 2010; 45:1663–1682.
- Williams D, Elghali L, Wheeler R, France C. Climate change influence on building lifecycle greenhouse gas emissions: case study of UK mixed-use development. *Energy and Buildings* 48 (2012) 112–126

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFPIA	Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

RÉSILIANCE ADAPTATION DES BÂTIMENTS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le changement climatique impose d'adapter les bâtiments pour assurer un niveau de confort suffisant durant des périodes de canicule de plus en plus sévères. L'enjeu est de parvenir à cet objectif à moindre coût et à moindre impact environnemental, en construction neuve mais aussi en ce qui concerne le parc existant.

Après une phase d'état de l'art et de retours d'expérience sur la canicule de 2019, des données de projection climatique ont été élaborées, une liste de mesures d'adaptation et des échantillons de bâtiments types ont été constitués (maisons individuelles, logements collectifs, bâtiments tertiaires) en considérant différentes époques de construction. Des critères de performance ont été définis pour évaluer l'efficacité des différentes solutions d'adaptation proposées. Ces critères concernent les risques de surchauffe, en tenant compte de la notion de confort adaptatif, mais aussi la performance environnementale évaluée par analyse de cycle de vie (en incluant les effets éventuels des mesures d'adaptation sur les besoins de chauffage et de climatisation). L'objectif est ainsi d'évaluer les mesures d'adaptation par différents indicateurs, par exemple : degrés-heures d'inconfort, bilan CO₂, indicateurs ACV concernant la santé, la biodiversité et les ressources, coûts.

Les clefs de la résilience face aux vagues de chaleur

- *Un comportement adapté (fermer des protections solaires les journées chaudes, ouvrir la nuit pour rafraîchir,*
- *Un bâti efficace (isolation thermique, vitrages, ventilation naturelle),*
- *Et si besoin un système actif alimenté de préférence par une énergie renouvelable (photovoltaïque par exemple).*

