



Etude d'impact des procédés réflectifs de toiture

Sommaire

1. PREAMBULE	4
2. SYNTHESE	5
3. INTRODUCTION	8
3.1. CADRE DE L'ETUDE	8
3.2. LIMITES DE L'ETUDE	9
3.3. INDICATEURS DE SORTIE	10
3.4. CARACTERISTIQUES DES TOITURES	11
3.5. PROCEDES REFLECTIFS ET VALEURS DE SRI	12
3.6. DONNEES METEOROLOGIQUES	13
4. BATIMENT INDUSTRIEL	14
4.1. BATIMENT RETENU.....	14
4.1.1. Caractéristiques générales	14
4.1.2. Modélisation du bâtiment	15
4.1.3. Prestations thermiques.....	16
4.1.4. Consignes de températures.....	17
4.1.5. Scénario d'occupation annuel	18
4.1.6. Apports internes	19
4.1.7. Inertie thermique.....	20
4.2. RESULTATS.....	21
4.2.1. Besoins de chauffage	22
4.2.2. Besoins de climatisation.....	24
4.2.3. Bilan chauffage/climatisation	26
4.2.4. Confort d'été.....	28
4.3. CAS PARTICULIERS	32
4.3.1. Impact de l'isolation de la toiture	32
4.3.2. Impact de l'isolation du plancher bas	34
4.3.3. Impact de la ventilation naturelle	35
4.3.4. Impact de la surface du bâtiment.....	36
4.3.5. Fichier météo de Strasbourg	37
5. BATIMENTS COMMERCIAUX	41
5.1. BATIMENT RETENU.....	41
5.1.1. Modélisation du bâtiment	41
5.1.2. Prestations thermiques.....	42
5.1.3. Consignes de températures.....	43
5.1.4. Scénario d'occupation annuel	43
5.1.5. Apports internes	44
5.1.6. Inertie thermique.....	44
5.2. RESULTATS.....	45
5.2.1. Besoins de chauffage	46
5.2.2. Besoins de climatisation.....	48
5.2.3. Bilan chauffage/climatisation	50
5.2.4. Confort d'été.....	52
5.3. CAS PARTICULIERS	56
5.3.1. Impact de l'isolation de la toiture	56
5.3.2. Impact de l'isolation du plancher bas	57
5.3.3. Impact de l'inertie du mobilier (rayonnage)	58
5.3.4. Impact des apports internes	59
5.3.5. Impact de la surface du bâtiment.....	60
6. BATIMENT DE BUREAUX	63
6.1. BATIMENT RETENU.....	63
6.1.1. Modélisation du bâtiment	63
6.1.2. Prestations thermiques.....	64
6.1.3. Consignes de températures.....	64
6.1.4. Scénario d'occupation annuel	65

6.1.5. <i>Apports internes</i>	66
6.1.6. <i>Inertie thermique</i>	66
6.2. RESULTATS.....	67
6.2.1. <i>Besoins de chauffage</i>	68
6.2.2. <i>Besoins de climatisation</i>	69
6.2.3. <i>Bilan chauffage/climatisation</i>	70
6.2.4. <i>Confort d'été</i>	73
7. BATIMENT DE LOGEMENTS COLLECTIFS.....	75
7.1. BATIMENT RETENU.....	75
7.1.1. <i>Modélisation du bâtiment</i>	75
7.1.2. <i>Prestations thermiques</i>	76
7.1.3. <i>Consignes de températures</i>	76
7.1.4. <i>Scénario d'occupation annuel</i>	77
7.1.5. <i>Apports internes</i>	77
7.2. RESULTATS.....	78
7.2.1. <i>Besoins de chauffage</i>	79
7.2.2. <i>Bilan chauffage/climatisation</i>	81
7.2.3. <i>Confort d'été</i>	83
7.3. VARIANTE : TOITURE EN COUVERTURE ZINC	85
7.3.1. <i>Bilan chauffage/climatisation</i>	86
7.3.2. <i>Confort d'été</i>	88

1. Préambule

Dans un contexte de réchauffement climatique et de hausse des épisodes de canicule, la question du confort d'été et des économies d'énergie devient de plus en plus préoccupante.

Les procédés réflectifs de toiture, également appelés « cool roof », sont de plus en plus mis en avant par les professionnels :

- Les procédés d'étanchéité réflectifs de couleur claire (membranes bitumineuses, membranes synthétiques, S.E.L.),
- Les peintures réflectives.

La CSFE^[1], l'UPMF^[2] et l'UMGCCP^[3] ont commandé une étude spécifique au bureau d'études thermiques Pouget Consultants. La FFB a financé cette étude dans le cadre de la collection « programme recherche développement métier FFB ».

Cette étude porte sur les températures et niveaux de confort dans le bâtiment et ne porte pas sur l'impact des procédés réflectifs sur le phénomène d'îlot de chaleur urbain à l'échelle d'un quartier. Elle apporte des données objectives sur un large périmètre d'analyse en France métropolitaine. Les paramètres étudiés sont les suivants :

- **Le type de bâtiment** : neuf (isolé), existant (peu isolé) ou réhabilité (amélioration de l'isolation de la toiture uniquement) ;
- **Le type d'usage du bâtiment** : industriel, commercial^[4], immeuble de bureaux, logements collectifs ;
- **Le type de support de toiture** : Tôle d'acier nervurées pour les bâtiments commerciaux et industriels, béton pour les bureaux et logements ;
- **La situation géographique du bâtiment** : Nantes, Paris, Marseille, Strasbourg (pour certains cas)
- **Le niveau de réflectivité du revêtement** : SRI^[5] variant de 5 à 115, indépendamment du type de procédé réflectif mis en œuvre ;
- **Le type de climat** : contemporain ou projection climatique à 2050 ;
- **L'impact de l'isolation thermique** de la toiture, du plancher bas, de la ventilation naturelle et de la surface du bâtiment.

Les résultats de cette étude sont à prendre en compte avec les précautions suivantes :

- Les conclusions ne peuvent pas être généralisées à tous les types de bâtiments. Les gains thermiques, personnalisés à chaque configuration et localisation de bâtiment, ne peuvent être calculés que par un bureau d'études thermiques ou toute autre entité disposant de capacités d'études (MOA, architecte, entreprise...).
- La dégradation de la réflectivité due à l'encrassement de la toiture n'est pas prise en compte. Une étude est en cours de réalisation par le CSTB pour évaluer l'impact de l'encrassement sur la réflectivité de la toiture, avec ou sans entretien.
- D'autres leviers tels que l'isolation, les protections solaires motorisées ou automatisées (stores, volets...), la ventilation naturelle, l'aération nocturne, le rafraîchissement naturel (ex géocooling) ou la maîtrise des apports de chaleur interne ont également un impact possible sur l'amélioration du confort et des besoins thermiques des bâtiments.
- Les travaux de toiture doivent être réalisés par des professionnels formés, que ce soit pour la mise en œuvre des procédés réflectifs ou pour leur entretien annuel destiné à prévenir l'encrassement, et donc à préserver les propriétés réflectives du système.

[1] CSFE : Chambre Syndicale Française de l'Etanchéité

[2] UPMF : Union Professionnelle des Métiers de la Finition

[3] UMGCCP : Union des Métiers du Génie Climatique, de la Couverture et de la Plomberie

[4] Le bilan énergétique des bâtiments industriels et commerciaux ne considère pas les process (ex : chambre froide, vitrine réfrigérée...etc).

[5] SRI : Indice de Réflectance Solaire

2. Synthèse

L'étude montre que l'impact des procédés réflectifs en toiture est fortement dépendant de l'usage du bâtiment (industrie, commerce, logement, ...), de ses propriétés thermiques initiales (niveaux d'isolation, inertie, ...), des leviers de gestion du confort mobilisés (ventilation naturelle, gestion des occultations, ...) et de son emplacement géographique. Chaque configuration est unique et les évaluations des gains éventuels liés à l'application de ces revêtements sont propres à chaque projet. Les conclusions de ce rapport ne sont donc valables uniquement pour les bâtiments étudiés lors de ces travaux.

Dans le cas de bâtiment chauffés et refroidis, il est nécessaire de faire le bilan complet sur l'année. En effet suivant le niveau de prédominance du refroidissement sur le chauffage, l'impact global ne sera pas équivalent.

Les tableaux proposés dans la synthèse donnent l'écart maximal entre un revêtement noir (SRI 5) et revêtement très réflectif (SRI 115).

Besoins de refroidissement : impact positif sur l'ensemble du territoire

Le tableau suivant présente l'impact, sur les besoins de refroidissement (kWh/m².an), de passer d'un SRI 5 à un SRI 115 pour les 4 usages de bâtiments et 3 fichiers météorologiques sur un climat contemporain :

Evolution des besoins de refroidissement sur un climat contemporain (kWh/m ² .an)		Nantes	Paris	Marseille
Procédé réflectif : SRI5 → SRI 115*				
Industrie (Type entrepôt)	Neuf	- 2	- 2	- 4
	Existant	- 3	- 4	- 11
	Existant - Toiture réhab.	- 1	- 1	- 3
Commerces (Type supermarché)	Neuf	- 4	- 4	- 7
	Existant	- 8	- 8	- 20
	Existant - Toiture réhab.	- 2	- 2	- 6
Bureaux ⁽¹⁾	Neuf	- 1	- 1	- 3
	Existant	- 1,5	- 2	- 6
	Existant - Toiture réhab.	- 0,5	- 0,5	- 2
Logements collectifs ⁽¹⁾	Neuf	x	x	-1
	Existant	x	-1	-3
	Existant - Toiture réhab.	x	x	-2

* Ecarts présentés entre deux valeurs de SRI « extrêmes »

(1) Gains annoncés uniquement pour le dernier niveau sous toiture. Pas d'impact pour les niveaux inférieurs

x : besoins de référence peu significatifs pour évaluer un gain

- ➔ Une hausse de la réflectivité implique toujours une baisse des besoins de froid.
- ➔ Moins la toiture est isolée, plus l'impact des procédés réflectifs est important sur la baisse des besoins de froid,
- ➔ Les régions les plus chaudes (Marseille) présentent le gain le plus élevé,
- ➔ Les gains sont faibles ou peu significatifs pour les usages et régions avec très peu de besoins de froid (exemple : Nantes et Paris en logements collectifs),
- ➔ Les gains sont les plus importants pour le bâtiment de commerce de notre étude qui présente les besoins de froid les plus élevés,
- ➔ Pour les bâtiments à plusieurs niveaux (exemple : logements et bureaux étudiés), le revêtement en toiture a un impact uniquement sur le niveau sous la toiture, il n'y a pas d'impact sur les niveaux inférieurs.

Si les bâtiments étaient **uniquement climatisés** et non chauffés, l'application d'un procédé réflectif peut s'avérer très bénéfique, notamment pour les configurations où les besoins de froid sont importants (commerces par exemple). Pour les bâtiments existants climatisés et non chauffés dont la toiture est peu isolée, le revêtement réflectif peut s'avérer aussi intéressant qu'une réhabilitation avec isolation (ce qui ne sera pas le cas sur un bilan thermique total dans le cas d'un bâtiment chauffé et refroidi). À la vue des résultats sur le bâtiment peu isolé, on peut estimer que les gains de besoins froids engendrés seraient supérieurs pour des bâtiments très peu ou pas isolé.

Les bénéfices projetés sur un climat à horizon 2050 (RCP8.5) sont accentués et détaillés dans la suite du rapport.

Bilan thermique (hiver/été) : impact variable au cas par cas

Le tableau suivant présente l'impact sur le bilan thermique total (hiver et été) de passer d'un SRI 5 à un SRI 115 pour les 4 usages de bâtiments et 3 fichiers météorologiques sur un climat contemporain :

Evolution des besoins totaux (chaud et froid) sur un climat contemporain (kWh/m ² .an)		Nantes	Paris	Marseille
Procédé réflectif : SRI5 → SRI 115*				
Industrie (Type entrepôt)	Neuf	- 1	-1,5	- 4
	Existant	0	- 2	- 9
	Existant - Toiture réhab.	0	- 0,5	- 3
Commerces (Type supermarché)	Neuf	- 3,5	- 3,5	- 6
	Existant	+0,5	- 2	- 13
	Existant - Toiture réhab.	/	- 1	- 4
Bureaux ⁽¹⁾	Neuf	0	0	- 2
	Existant	+2	+ 1	- 3
	Existant - Toiture réhab.	+1	+ 0,5	- 1
Logements collectifs ⁽¹⁾	Neuf	+1	+0,5	- 0,5
	Existant	+4	+3	0
	Existant - Toiture réhab.	+1,5	+1	0

* Ecarts présentés entre deux valeurs de SRI « extrêmes »

⁽¹⁾ Gains annoncés uniquement pour le dernier niveau sous toiture. Pas d'impact pour les niveaux inférieurs

Le bilan thermique entre les baisses des besoins de froid (climatisation) et les hausses des besoins de chauffage est variable suivant les configurations étudiées :

- ➔ Pour les bâtiments dont les besoins de chauffage représentent à minima 75% des besoins totaux (ex : bureaux à Paris et Nantes), l'application d'un procédé réflectif en toiture peut s'avérer défavorable,
- ➔ Pour les bâtiments dont les besoins de froids sont supérieurs à 30% des besoins totaux (bâtiments commerciaux par exemple), un revêtement réflectif s'avèrera positif sur le bilan global,
- ➔ Pour les régions chaudes (Marseille), quel que soit l'usage, le bilan sera toujours en faveur des procédés réflectifs,
- ➔ Pour les logements présentant une toiture légère (sans dalle béton), ces derniers sont plus sujets aux hausses de températures et apports solaires et l'application d'un procédé réflectif peut être intéressante dans certaines configurations,
- ➔ Pour les bâtiments à plusieurs niveaux (exemple : logements et bureaux), le revêtement en toiture a un impact uniquement sur le niveau sous la toiture, il n'y a pas d'impact sur les niveaux inférieurs.

Les bénéfices projetés sur un climat à horizon 2050 (RCP8.5) sont accentués et détaillés dans la suite du rapport.

Confort d'été : gains faibles à significatifs suivant les situations**- Nombre d'heures supérieurs à 28°C en occupation**

Le tableau suivant présente l'impact sur les heures supérieurs à 28°C en occupation de passer d'un SRI 5 à un SRI 115 pour les 4 usages de bâtiments et 3 fichiers météorologiques sur un climat contemporain :

Evolution des heures supérieures à 28C sur climat contemporain Procédé réflectif : SRI5 → SRI 115*		Nantes	Paris	Marseille
Industrie (Type entrepôt)	Neuf	x	-140h	- 80h
	Existant	x	-110h	- 130h
	Existant - Toiture réhab.	x	- 40h	- 50h
Commerces (Type supermarché)	Neuf	- 440h	- 280h	- 140h
	Existant	- 140 ⁽¹⁾	- 330h	- 225h
	Existant - Toiture réhab.	- 30 ⁽¹⁾	- 145h	- 90h
Bureaux ⁽²⁾	Neuf	-	-	-
	Existant	-	-	-
	Existant - Toiture réhab.	-	-	-
Logements collectifs ⁽²⁾	Neuf	x	x	-40h
	Existant	x	-10h	-80h
	Existant - Toiture réhab.	x	-5h	-30h

* Ecart présentés entre deux valeurs de SRI « extrêmes »

(1) Gain annoncé est limité car les durées d'inconfort du projet de référence sont faibles → couverture totale des temps d'inconfort

(2) Une ventilation naturelle par ouverture des fenêtres a été considéré pour ces résultats. Gains annoncés uniquement pour le dernier niveau sous toiture. Pas d'impact pour les niveaux inférieurs

x : inconfort peu significatif pour évaluer un gain

- ➔ Impact 2 à 3 fois plus important pour le bâtiment commercial par rapport au bâtiment industriel modélisé (type entrepôt),
- ➔ Pour le bâtiment de bureaux dont la ventilation naturelle par ouverture des fenêtres en période d'occupation est prise en compte, l'impact de la modification du revêtement réflectif va être peu ou pas significatif. Dans une configuration où ce levier n'est pas possible (zone de bruit forte, mauvaise gestion de l'occupant), la modification du revêtement réflectif peut être bien plus intéressante,
- ➔ Pour les bâtiments résidentiels, le recours à une ventilation naturelle n'est pas possible en journée lorsque le logement est inoccupé. Les températures peuvent s'avérer plus élevées dans le logement au retour des occupants en fin de journée ce qui explique dans gains plus conséquents, notamment sur des régions plus chaudes.

- Température opératives maximales (en occupation)

Evolution des températures opératives maximales Procédé réflectif : SRI5 → SRI 115*		Nantes	Paris	Marseille
Industrie (Type entrepôt)	Neuf	-1,1 °C	-1,1 °C	-1,1 °C
	Existant	-2,7 °C	-2,8 °C	-2,7 °C
	Existant - Toiture réhab.	- 0,8 °C	- 0,8 °C	- 0,8 °C
Commerces (Type supermarché)	Neuf	-0,8 °C	-0,8 °C	-0,9 °C
	Existant	-2,7 °C	-2,6 °C	-2,5 °C
	Existant - Toiture réhab.	- 0,7 °C	- 0,8 °C	- 0,7 °C
Bureaux	Neuf / Existant / Toiture réhab.	/	/	/
Logements collectifs	Neuf / Existant / Toiture réhab.	/	/	/

La modification d'un revêtement sombre par un procédé réflectif, pour un bâtiment industriel ou commercial, peut présenter une réduction de la température opérative maximale de 3°C pour une toiture non isolée et de 1°C pour une toiture isolée. L'écart n'est pas significatif sur les usages bureaux ou résidentiels. A noter qu'il s'agit de la température ressentie par l'occupant et que ce n'est pas un gain sur la valeur moyenne d'une saison chaude.

3. Introduction

3.1. Cadre de l'étude

Le cadre global de cette étude est le suivant :

- **4 usages de bâtiment :**
 - Industrie (entrepôt de stockage)
 - Commerce (supermarché)
 - Bureaux
 - Logements collectifs
- **3 niveaux de performances thermiques :**
 - Neuf (niveau RT2012 ou RE2020)
 - Existant (peu isolé)
 - Réhabilité (amélioration de l'isolation de la toiture uniquement)
- **6 fichiers météorologiques : 3 stations météorologiques x 2 types de climat**
 - **3 stations météorologiques** Paris / Nantes / Marseille
 - **2 types de climat :**
 - Climat moyen (moyenne 2000-2019)
 - Projection 2050 (données moyennes suivant scénario RCP 8.5 du GIEC considérant un réchauffement global planétaire de +4°C)
- **4 valeurs de SRI pour les procédés réflectifs : SRI5 / SRI40 / SRI80 / SRI115**

L'ensemble de ces données sont précisées dans la suite du document.

3.2. Limites de l'étude

- **Cas d'étude**

Pour la réalisation de cette étude, il a été nécessaire de figer le comportement thermique des bâtiments modélisés (apports internes, occupation, inertie du mobilier, ventilation mécanique et naturelle, gestion des occultations, ...). Il s'agit donc de modèles numériques réalisés suivant des données spécifiques et qui ne permettent pas de généraliser les conclusions à tous les types de bâtiments.

Les bâtiments industriels et commerciaux notamment ont presque autant de mode de fonctionnement qu'il existe de bâtiment. Par exemple un bâtiment industriel peut aussi bien être un bâtiment de stockage qu'un bâtiment intégrant des lignes de production avec de forts apports internes. Un bâtiment commercial peut être un magasin de prêt-à-porter, un hypermarché, un espace de vente automobile, ...

Pour **chaque** projet, les gains thermiques doivent donc être calculés par un BET, ou par toute autres entités (MOA, architecte, entreprise...) disposant de capacités d'étude nécessaires.

- **Vieillissement du procédé**

Cette étude ne prend pas en compte la dégradation de la réflectivité due à l'encrassement de la toiture. Une étude est en cours de réalisation par le CSTB pour évaluer l'impact de l'encrassement sur la réflectivité de la toiture, avec ou sans entretien.

- **Effet d'îlot de chaleur urbain (ICU)**

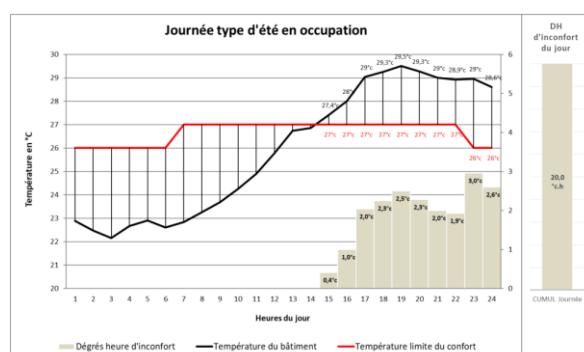
Les simulations sont réalisées à l'échelle du bâtiment uniquement. L'étude ne porte pas sur l'impact des procédés réflectifs sur l'effet d'îlots de chaleurs urbains.

3.3. Indicateurs de sortie

Pour chacun des cas étudiés, les données principales de sortie sont les suivantes :

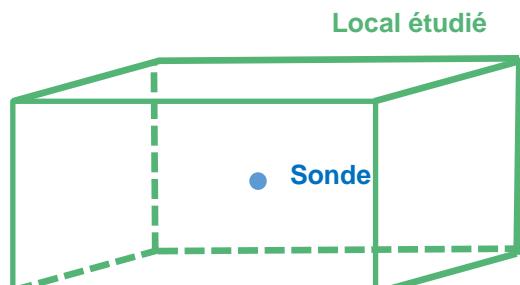
- **Besoins de chauffage (kWh/m².an)** : quantité d'énergie nécessaire au bâtiment pour atteindre les consignes de températures fixées sur la période de chauffage. Les besoins ne tiennent pas compte d'un système spécifique. Donnée exprimée en kWh et calculées sur une année.
- **Besoins de climatisation(kWh/m².an)** : quantité d'énergie nécessaire au bâtiment pour atteindre les consignes de températures fixées sur la période de refroidissement. Les besoins ne tiennent pas compte d'un système spécifique. Donnée exprimée en kWh et calculées sur une année.
- **Evolution des températures opératives intérieures (°C)** : les températures opératives correspondent aux températures ressenties par l'occupant. En simplifiant, il s'agit de la moyenne entre la température moyenne pondérée des surfaces du local et la température d'air intérieur.
- **Heures d'occupation supérieures à 28°C (heure)** : indicateur de confort comptabilisé à chaque pas de temps horaire lorsque la température opérative dépasse un seuil de 28°C (en occupation uniquement) et sans prise en compte d'une solution de refroidissement.
- **Degrés-Heure (°C.h)** : nouvel indicateur de confort intégré à la RE2020. Il s'agit de la somme des degrés ressentis au-dessus d'une température seuil de confort à chaque pas de temps horaire en occupation. Cet indicateur tient compte du confort adaptatif avec un seuil évolutif suivant les conditions de températures extérieures des jours précédents. Ceci pour considérer la capacité de l'occupant à s'adapter aux périodes chaudes.

Exemple de calcul DH sur une journée



Attention : les degrés-heures donnés par la suite ne sont pas comparables avec ceux issus d'un calcul réglementaire RE2020. Les DH de la RE2020 sont calculés avec un fichier météo caniculaire 2003, suivant des scénarios conventionnels d'usages et à l'échelle du bâtiment. Dans cette étude, les DH sont calculés suivant les fichiers météos initiaux, les scénarios spécifiques au modèle et à l'échelle du local.

Pour établir ces données de sorties, le modèle numérique considère **une sonde** (point de relevé des données) au centre du **local**. Les données de températures par exemple ne tiennent pas compte d'une potentielle stratification, notamment pour les grands volumes, il s'agit d'une valeur moyenne au **local**.

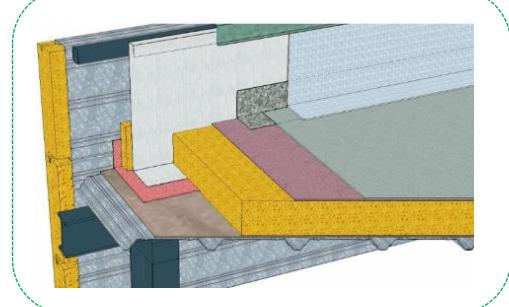


3.4. Caractéristiques des toitures

Trois procédés de toitures sont à l'étude :

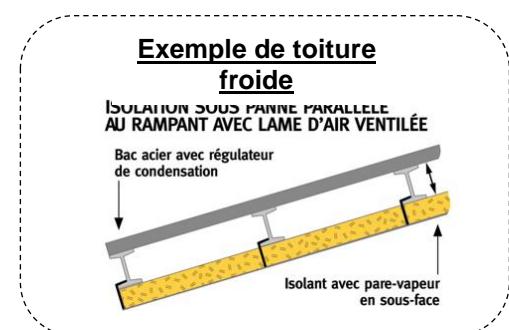
- Bac métallique + Isolation + membrane d'étanchéité

Composition de la toiture (extérieur vers intérieur)
Revêtement d'étanchéité bi-couche
Panneau isolant laine de roche <u>Version peu isolée</u> : 60 mm – Th 36 <u>Version isolée</u> : 200mm – Th 36 <i>Prise en compte des éléments de fixation ($\Delta U=0,03W/m^2.K$)</i>
Pare-vapeur
Tôle d'acier nervurée



- Couverture sèche en bac acier

Composition de la toiture (extérieur vers intérieur)
Tôle d'acier nervurée
Lame d'air ventilée (cas de toiture froide)
Panneau isolant laine de roche <u>Version peu isolée</u> : 50 mm – Th 36 <u>Version isolée</u> : 200mm – Th 36



- Toiture terrasse : dalle béton + isolation + membrane d'étanchéité

Composition de la toiture (extérieur vers intérieur)
Revêtement d'étanchéité bi-couche
Panneau d'isolation polyuréthane <u>Version peu isolée</u> : 60 mm – $\lambda=0,022 W/m/K$ <u>Version isolée</u> : 160mm à 200mm – $\lambda=0,022 W/m/K$
Dalle béton – 200mm

3.5. Procédés réflectifs et valeurs de SRI

Les revêtements réflectifs sont communément caractérisés par leur indice SRI (Solar Reflectance Index). Cet indicateur est dépendant de deux propriétés thermiques :

- Réflectivité solaire : part du rayonnement solaire réfléchi
- Emissivité thermique : capacité d'un matériau à absorber et émettre la chaleur par rayonnement infrarouge

L'indice de réflectance solaire (SRI) est calculé conformément à la norme ASTM E 1980-0.

Pour simplifier, une valeur de SRI de 0 correspondrait à un procédé noir et une valeur d'un SRI plus proche de 100 correspondrait à un procédé blanc.

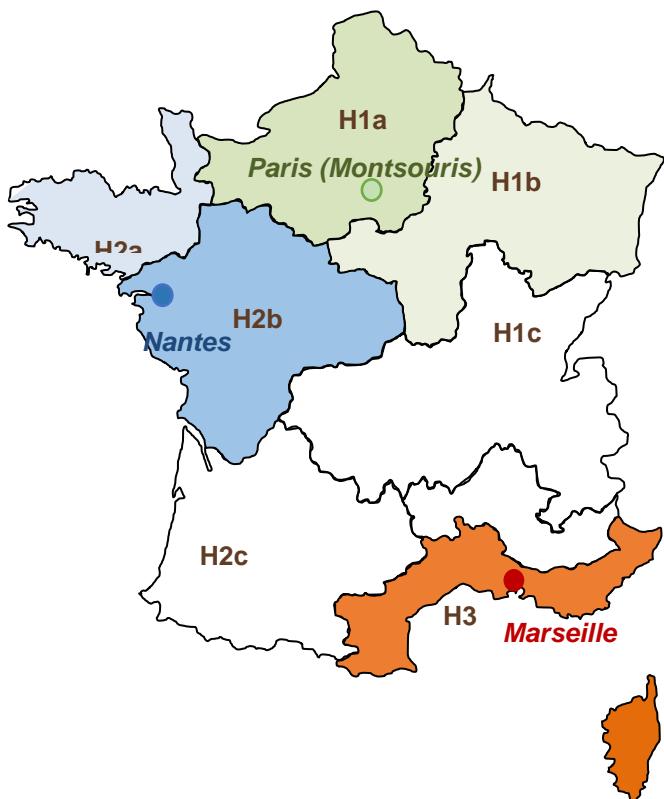
Dans le cadre de notre étude, nous avons fixé quatre valeurs de SRI dont les propriétés thermiques sont les suivantes :

	Réflectivité (-)	Emissivité (-)	SRI
Base	0,09	0,90	5
V1	0,38	0,85	40
V2	0,66	0,90	80
V3	0,91	0,87	115

Par simplification dans la suite de l'étude, nous communiquerons principalement en valeur de SRI.

3.6. Données météorologiques

Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu 6 fichiers météorologiques représentant 3 zones climatiques distinctes.



Nom	Nantes	Altitude	26 m
Longitude	1° 36' 0"O	Latitude	47° 10' 12"N

Nom	Paris	Altitude	75 m
Longitude	2° 19' 48"E	Latitude	48° 49' 12"N

Nom	Marseille	Altitude	6 m
Longitude	5° 13' 12"E	Latitude	43° 25' 48"N

Les données météorologiques utilisées pour effectuer les différentes simulations sont celles issues de la base de données **météonorm**. Les caractéristiques de ces stations sont les suivantes :

		Températures			DJU		Ensoleillement global horizontal (kWh/m ²)	
		Minimale	Maximale	Moyenne	Chaud (18°C)	Froid (18°C)	Période chauffage (15 oct. au 15 avril)	Période clim. (16 avril. au 14 oct.)
Nantes	Moyenne 2000 à 2019	-4,5°C	34,0°C	12,5°C	2205	276	351	971
	Prévisions GIEC à 2050 (RCP 8.5)	-3,4°C	35,5°C	14,0°C	1822	414	368	1011
Paris	Moyenne 2000 à 2019	-4,3°C	34,0°C	12,7°C	2217	314	304	857
	Prévisions GIEC à 2050 (RCP 8.5)	-3,0°C	36,6°C	14,5°C	1843	594	312	911
Marseille	Moyenne 2000 à 2019	-3,3°C	36,2°C	15,8°C	1543	820	485	1133
	Prévisions GIEC à 2050 (RCP 8.5)	-2,0°C	38,7°C	17,6°C	1265	1186	499	1146

Prévisions GIEC RCP 8.5 : scénario prévisionnel du GIEC le plus pessimiste dans notre capacité à réduire nos émissions de gaz à effet de serre avec probabilité d'une hausse des températures de 4°C à horizon 2100 (8.5 = forçage radiatif de 8.5 W/m²)

DJU (Degrés Jours Unifiés) : somme des différences entre la température extérieure une température de référence. Valeur permettant de comparer les climats les uns avec les autres. Plus les DJU sont élevés, plus le climat est rigoureux.

4. Bâtiment industriel

4.1. Bâtiment retenu

4.1.1. Caractéristiques générales

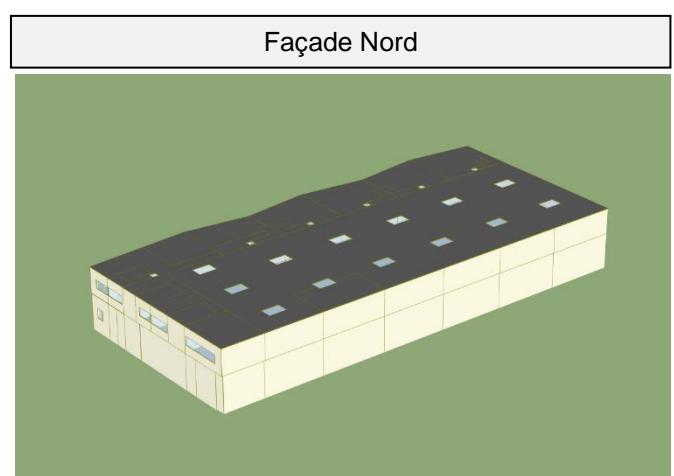
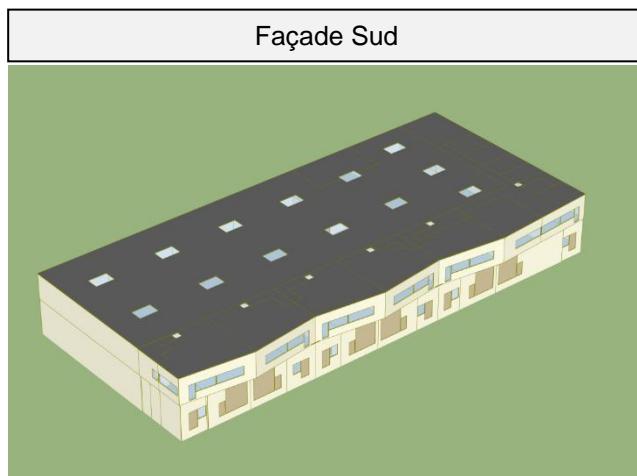
Bâtiment industriel – Petite surface	
Surface	SU Activité : 2065 m ² SU Bureaux : 835 m ²
Hauteur sous plafond	8,4 m
Prestations thermiques	Paragraphe suivant
Equipements techniques	Chauffage / Refroidissement / ECS : RAS* Ventilation : simple flux auto pour les sanitaires / ventilation naturelle pour la zone industrielle Eclairage : 8W/m ² - gestion non fractionnée – gestion manuelle

* les systèmes énergétiques ne sont pas modélisés

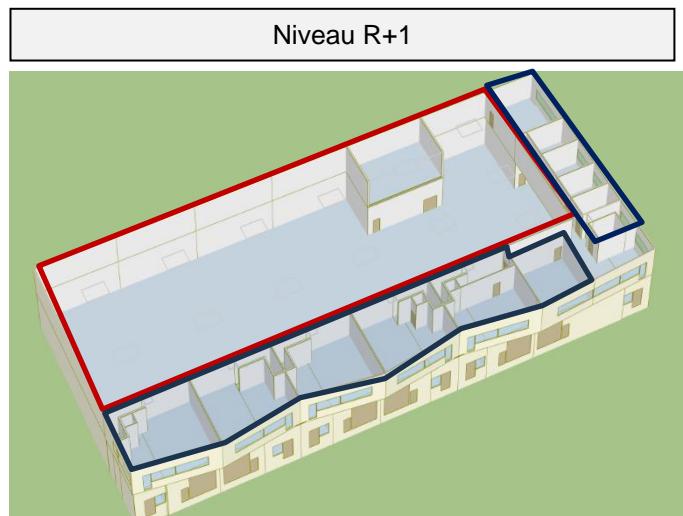
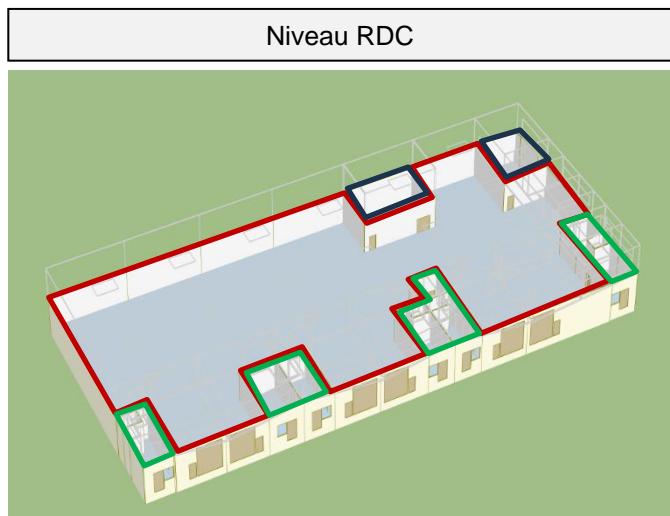


4.1.2. Modélisation du bâtiment

Ci-dessous la modélisation 3D du bâtiment présentée suivant différentes orientations



Le zonage est défini comme suit :



Entrepôt



Bureaux



Accueils

	Surface au sol	Volume brute
Entrepôt	1950 m ²	14 468 m ³
Bureaux	743 m ²	529 m ³
Accueils	182 m ²	814 m ³
Divers (WC, circulations, ...)	184 m ²	820 m ³

4.1.3. Prestations thermiques

	Neuf	Existant
Murs sur extérieur	Façade double peau Isolation laine de verre (130mm Th32 – R=4 m ² .K/W) Bardage métallique	Façade double peau Isolation laine de verre (60mm Th36 - R=1,7 m ² .K/W) Bardage métallique
Plancher bas sur terre-plein	Dalle béton non isolée	
Toiture	Bac métallique + Isolation LDR (200mm Th36 – R=5,5 m ² .K/W) + membrane d'étanchéité	Bac métallique + Isolation LDR (60mm Th36 – R=1,7 m ² .K/W) + membrane d'étanchéité
Porte	Porte sectionnelle (U = 1,12 W/m ² .K)	
Lanterneau	Urc = 2,5 W/m ² .K	
Perméabilité à l'air	1,7 m ³ /h.m ²	3,0 m ³ /h.m ²

4.1.4. Consignes de températures

Les besoins de chauffage et de refroidissement sont calculés pour maintenir les consignes de température suivantes :

Consignes de températures			
Zone		Industrie	Bureaux
Chauffage	<i>Occupation</i>	15°C	19°C
	<i>Inoccupation (≤ 48 heures)</i>	7°C	16°C
	<i>Absence prolongée (>48 heures)</i>	7°C	7°C
Refroidissement	<i>Occupation</i>	26°C	26°C
	<i>Inoccupation (≤ 48 heures)</i>	30°C	30°C
	<i>Absence prolongée (>48 heures)</i>	-	-

4.1.5. Scénario d'occupation annuel

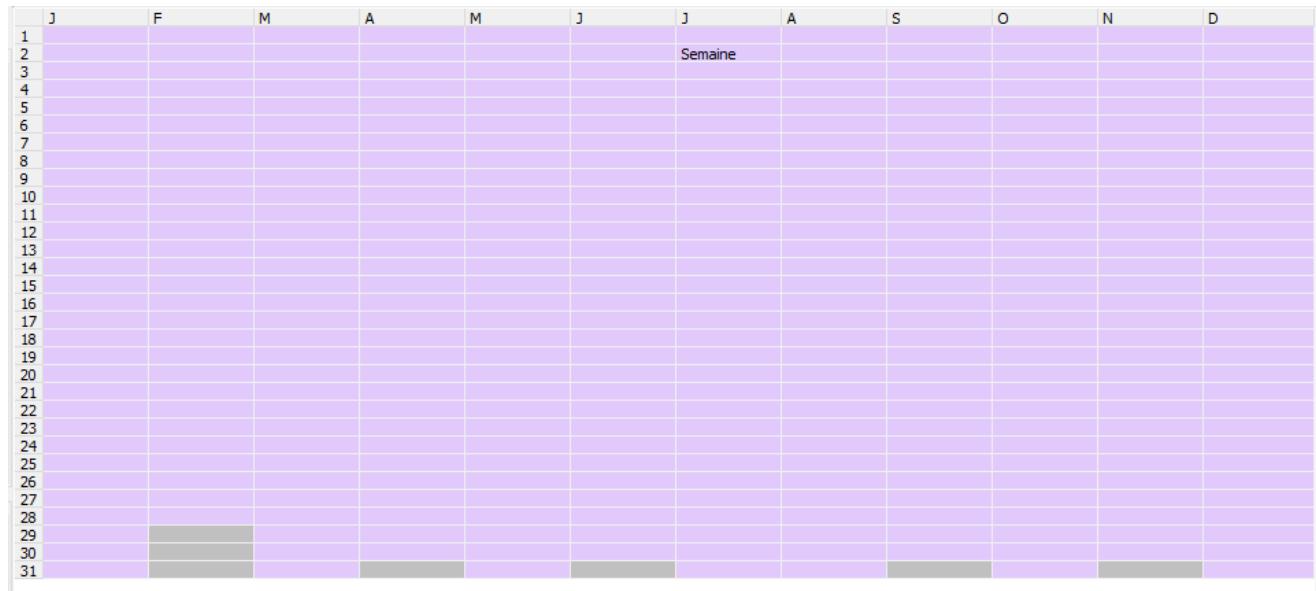
- Taux d'occupation

Taux d'occupation	
Bureaux	0,10 occ. /m ² (RE2020)
Industrie (8h-18h)	0,05 occ. /m ² (RT2012)

- Scénario annuel

Occupation hebdomadaire :

- *Bureaux → lundi à vendredi : 8h-18h*
- *Industriel → lundi à samedi : 8h-18h*



 Semaine normale

4.1.6. Apports internes

- Eclairage

Eclairage		
Zone	Industrie	Bureaux
Puissance installée	8 W/m ²	6 W/m ²
Niveau d'éclairement mini (0,90 m)	150 lux	300 lux
Gestion	Interrupteur manuel marche/arrêt	
Gradation	Gestion manuelle avec lumière du jour	

- Divers équipements

Les apports internes liés aux équipements (bureautique, équipements industriels, ...) peuvent représenter une part importante et sur un usage industriel, ceux-ci peuvent être très variables d'un projet à un autre.

En première approche, nous nous sommes référés aux hypothèses considérées dans la RE2020 :

Apports internes (hypothèses RE2020)		
Zone	Industrie	Bureaux
Occupation	2 W/m ²	16 W/m ²
Inoccupation	0 W/m	1,6 W/m ²

4.1.7. Inertie thermique

Un facteur impactant dans le comportement thermique de ce type de bâtiment est l'inertie thermique des éléments de stockage entreposés. En effet les bâtiments commerciaux et industriels peuvent présenter cette particularité de stocker une masse thermique importante et potentiellement variable en termes de quantité et de propriétés thermiques.

Le tableau ci-dessous donne quelques exemples de propriétés thermiques suivant différents éléments possibles de stockage :

	Capacité thermique (J/kg.k)	Masse volumique (kg/m3)
Liquide (eau)	4180	1000
Isolation (Laine de roche)	1030	25
PVC	1300	20
Autres éléments à définir

En première approche, avons considéré l'inertie suivante pour le mobilier des différentes zones :

	Inertie mobilier
Entrepôt	100 Wh/K/m ²
Bureaux	1 Wh/K/m ³
Accueils	1 Wh/K/m ³
Divers (WC, circulations, ...)	1 Wh/K/m ³

4.2. Résultats

Les tableaux suivants présentent les résultats initiaux pour les deux niveaux de prestations thermiques (neuf et existant) ainsi que pour les 6 fichiers météorologiques étudiés :

Prestations thermiques : Neuf Procédé réflectif : SRI 5		Besoins de chauffage (kWh/m ² .an)	Besoins de refroidissement (kWh/m ² .an)	Degrés-Heures (°C.h)	Heures >28°C (occupation)	T°C max
Nantes	Contemporain	1,8	2,2	3,6	19	28,6
	2050	0,8	6,0	270	390	29,8
Paris	Contemporain	2,5	3,9	133	197	30,3
	2050	1,0	9,9	1280	637	32,0
Marseille	Contemporain	0,7	17,4	2519	752	33,8
	2050	0,2	26,0	4510	1005	36,4

Pour des prestations thermiques performantes (niveau équivalent RE2020), on note à l'état initial :

- Besoins de chauffage : les besoins de chauffage pour l'espace entrepôt sont relativement faibles du fait de bonnes prestations thermiques et de consignes de température de 15°C en occupation et 7°C en inoccupation. Ces besoins sont réduits de plus de 50% sur une projection climatique à horizon 2050.
- Besoins de climatisation : pour l'ensemble des stations météorologiques, les besoins de climatisation sont supérieurs aux besoins de chauffage (écart fortement accentué en 2050).

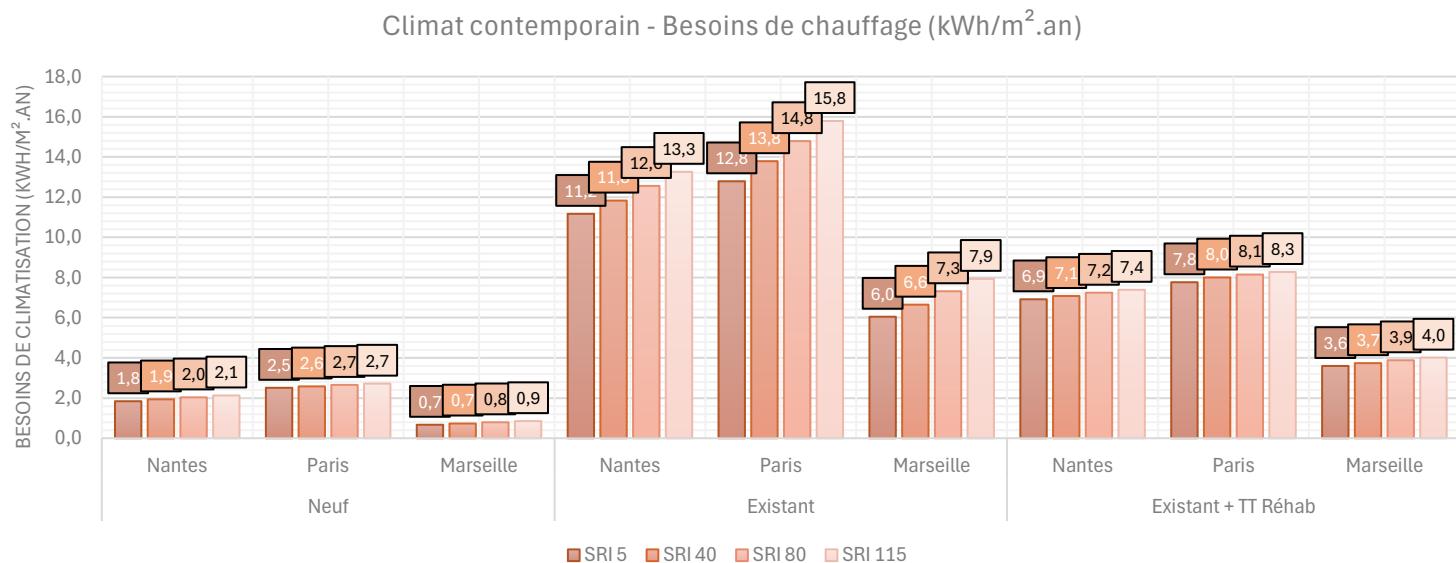
Prestations thermiques : Existant Procédé réflectif : SRI 5		Besoins de chauffage (kWh/m ² .an)	Besoins de refroidissement (kWh/m ² .an)	Degrés-Heures (°C.h)	Heures >28°C (occupation)	T°C max
Nantes	Contemporain	11,2	2,2	3	8	28,9
	2050	6,9	7,0	126	220	30,1
Paris	Contemporain	12,8	4,5	97	111	30,9
	2050	8,1	13,2	1030	550	32,7
Marseille	Contemporain	6,0	23,6	2179	663	34,2
	2050	3,1	36,5	3981	863	36,9

Pour des prestations thermiques réduites (bâtiment existant), on note à l'état initial :

- Besoins de chauffage : les besoins de chauffage sont supérieurs aux besoins de refroidissement pour les villes de Paris et Nantes sur un climat contemporain. La balance s'inverse pour un climat 2050. Les écarts avec des prestations thermiques performantes sont très significatifs, les besoins sont 5 à 8 fois supérieurs.
- Besoins de climatisation : les besoins de climatisation apparaissent plus importants par rapport au cas avec des prestations thermiques performantes. Une fois la consigne de refroidissement atteinte dans le bâtiment, celle-ci est mieux maîtrisée et conservée du fait d'une bonne enveloppe thermique.
- Degrés-Heures et nombre d'heures supérieurs à 28°C : une plus faible enveloppe thermique permet d'évacuer plus facilement la chaleur en période nocturne notamment. Pour le bâtiment plus performant thermiquement, si les températures intérieures ne sont pas maîtrisées (sans climatisation), il va prendre plus de temps pour que les températures redescendent.

4.2.1. Besoins de chauffage

Les graphiques ci-dessous présentent les besoins de chauffage sur les trois stations météorologiques et les deux niveaux d'isolation suivant chacun des SRI étudiés :



On observe une augmentation des besoins de chauffage avec l'augmentation de la réflectivité des toitures pour les trois zones climatiques étudiées :

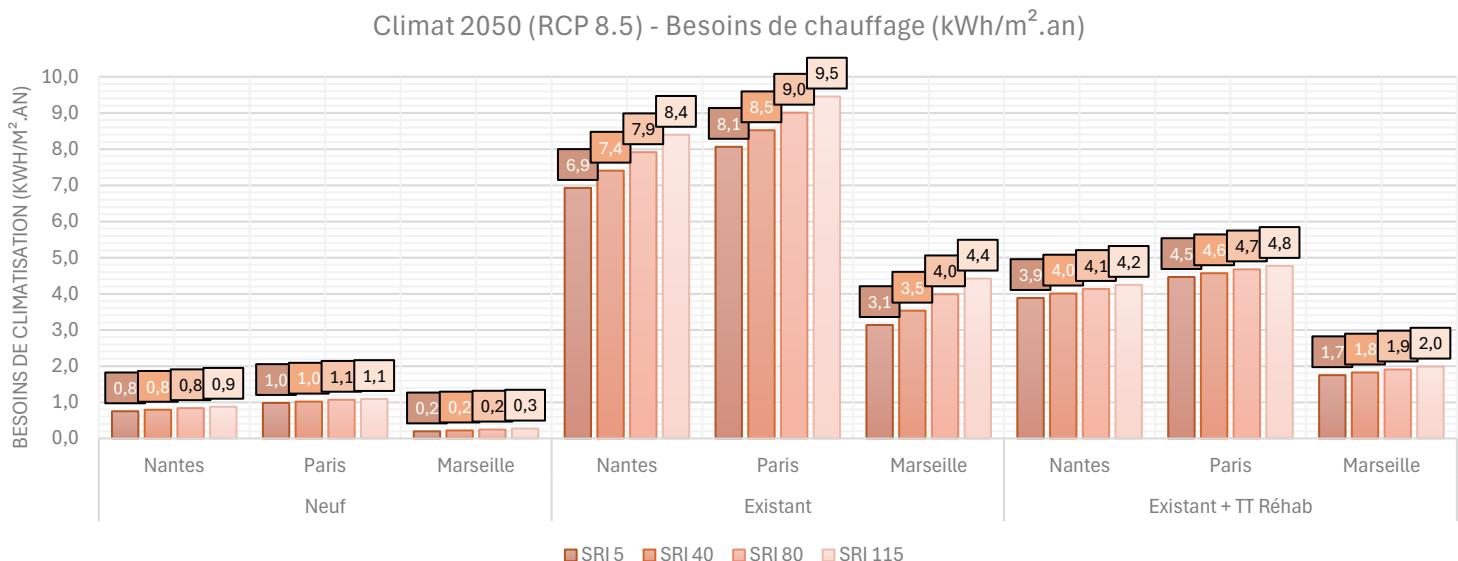
- Bâtiment neuf : +0,05 à +0,1 kWh/m² par palier de SRI
- Bâtiment existant : +0,5 à +0,7 kWh/m² par palier de SRI
- Bâtiment existant + toiture réhabilitée : +0,1 à +0,2 kWh/m² par palier de SRI

→ L'impact du procédé réflectif sur les besoins de chauffage est beaucoup plus significatif dans le cas d'un bâtiment et d'une toiture faiblement isolés qui réagit plus facilement aux apports solaires. Les gains en valeur absolue sont sensiblement équivalents pour chacune des zones climatiques, seul l'écart relatif varie réellement.

Le tableau suivant donne les écarts sur les besoins de chauffage pour passer d'un SRI5 à un SRI115 ainsi que d'un SRI40 à un SRI115 :

Evolution des besoins de chauffage suivant deux niveaux de SRI – Climat contemporain			
SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	+0,3 kWh/m ² .an (+16%)	+0,2 kWh/m ² .an (+8%)	+0,2 kWh/m ² .an (+27%)
Existant	+2,1 kWh/m ² .an (+19%)	+1,6 kWh/m ² .an (+13%)	+1,9 kWh/m ² .an (+31%)
Existant (Toiture réhabilitée)	+0,5 kWh/m ² .an (+7%)	+0,5 kWh/m ² .an (+7%)	+0,4 kWh/m ² .an (+12%)
SRI 40 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	+0,2 kWh/m ² .an (+10%)	+0,1 kWh/m ² .an (+5%)	+0,1 kWh/m ² .an (+16%)
Existant	+1,4 kWh/m ² .an (+12%)	+1,1 kWh/m ² .an (+8%)	+1,3 kWh/m ² .an (+19%)
Existant (Toiture réhabilitée)	+0,3 kWh/m ² .an (+5%)	+0,4 kWh/m ² .an (+5%)	+0,3 kWh/m ² .an (+8%)

Pour la projection climatique 2050 :



Pour une projection climatique à horizon 2050, on note une augmentation des besoins de chauffage plus faible que celle constatée sur un climat actuel :

- Bâtiment neuf : +0,02 à +0,05 kWh/m² par palier de SRI
- Bâtiment existant : +0,4 à +0,5 kWh/m² par palier de SRI
- Bâtiment existant + toiture réhabilitée : +0,08 à +0,13 kWh/m² par palier de SRI

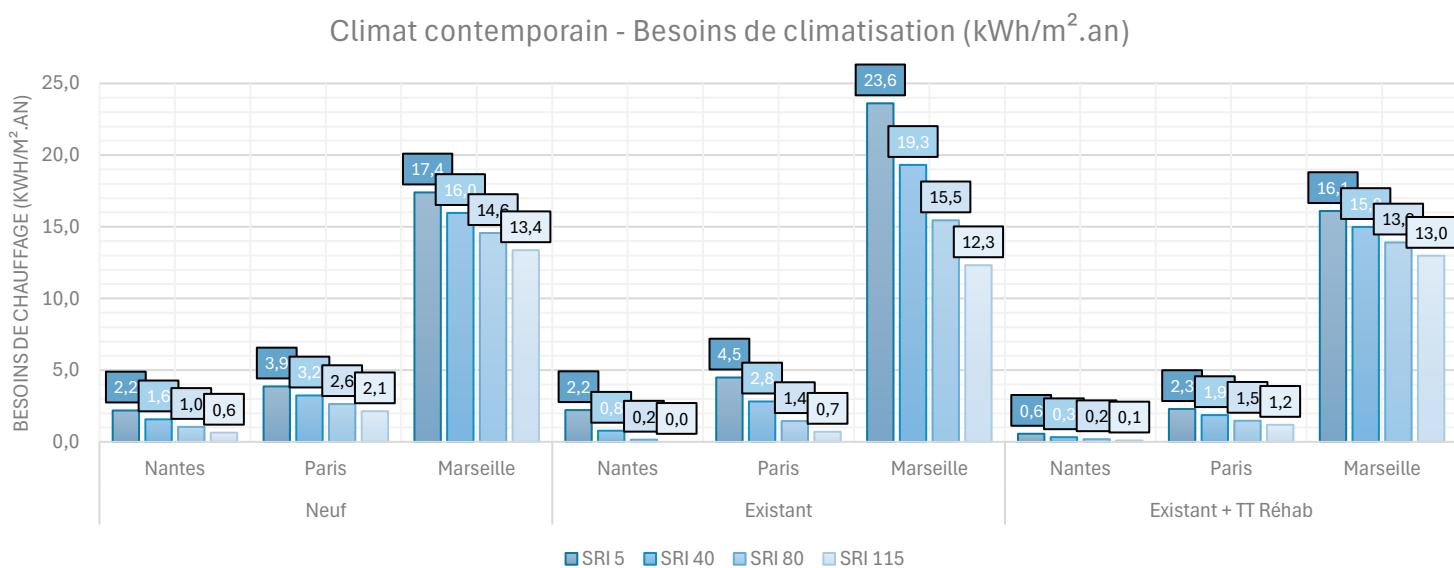
Le tableau suivant donne les écarts sur les besoins de chauffage pour passer d'un SRI5 à un SRI115 ainsi que d'un SRI40 à un SRI115 :

Evolution des besoins de chauffage suivant deux niveaux de SRI – Climat 2050 (RCP 8.5)			
SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	+0,1 kWh/m ² .an (+17%)	+0,1 kWh/m ² .an (+11%)	+0,1 kWh/m ² .an (+39%)
Existant	+1,5 kWh/m ² .an (+21%)	+1,4 kWh/m ² .an (+17%)	+1,3 kWh/m ² .an (+19%)
Existant (Toiture réhabilitée)	+0,4 kWh/m ² .an (+9%)	+0,3 kWh/m ² .an (+7%)	+0,2 kWh/m ² .an (+14%)
SRI 40 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	+0,1 kWh/m ² .an (+11%)	+0,1 kWh/m ² .an (+7%)	+0,1 kWh/m ² .an (+24%)
Existant	+1,0 kWh/m ² .an (+13%)	+0,9 kWh/m ² .an (+11%)	+0,9 kWh/m ² .an (+25%)
Existant (Toiture réhabilitée)	+0,2 kWh/m ² .an (+6%)	+0,2 kWh/m ² .an (+4%)	+0,2 kWh/m ² .an (+9%)

4.2.2. Besoins de climatisation

Les graphiques ci-dessous présentent les besoins de climatisation sur les trois stations météorologiques et les deux niveaux d'isolation suivant chacun des SRI étudiés :

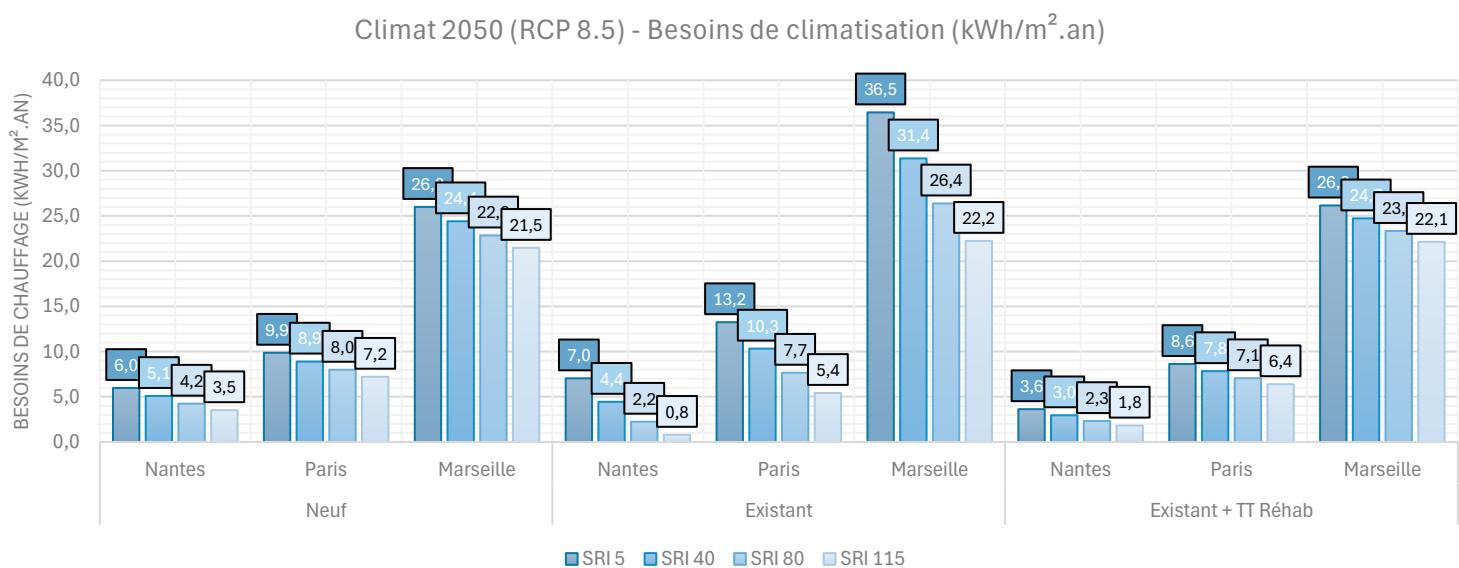
Le tableau suivant donne les écarts sur les besoins de climatisation pour passer d'un SRI5 à un SRI115 ainsi que d'un SRI40 à un SRI115 :



Evolution des besoins de climatisation suivant deux niveaux de SRI – Climat contemporain			
SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-1,5 kWh/m ² .an (-70%)	-1,7 kWh/m ² .an (-45%)	-4,0 kWh/m ² .an (-23%)
Existant	-2,2 kWh/m².an (-100%)	-3,8 kWh/m ² .an (-84%)	-11,3 kWh/m ² .an (-48%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-0,5 kWh/m ² .an (-83%)	-1,1 kWh/m ² .an (-48%)	-3,1 kWh/m ² .an (-19%)
SRI 40 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-0,9 kWh/m ² .an (-60%)	-1,1 kWh/m ² .an (-34%)	-2,6 kWh/m ² .an (-23%)
Existant	-0,8 kWh/m².an (-100%)	-2,1 kWh/m ² .an (-75%)	-7,0 kWh/m ² .an (-36%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-0,2 kWh/m ² .an (-71%)	-0,7 kWh/m ² .an (-36%)	-2,0 kWh/m ² .an (-13%)

Le gain annoncé est limité par les faibles besoins du projet de référence → couverture totale des besoins (100%)

Pour la projection climatique 2050 :

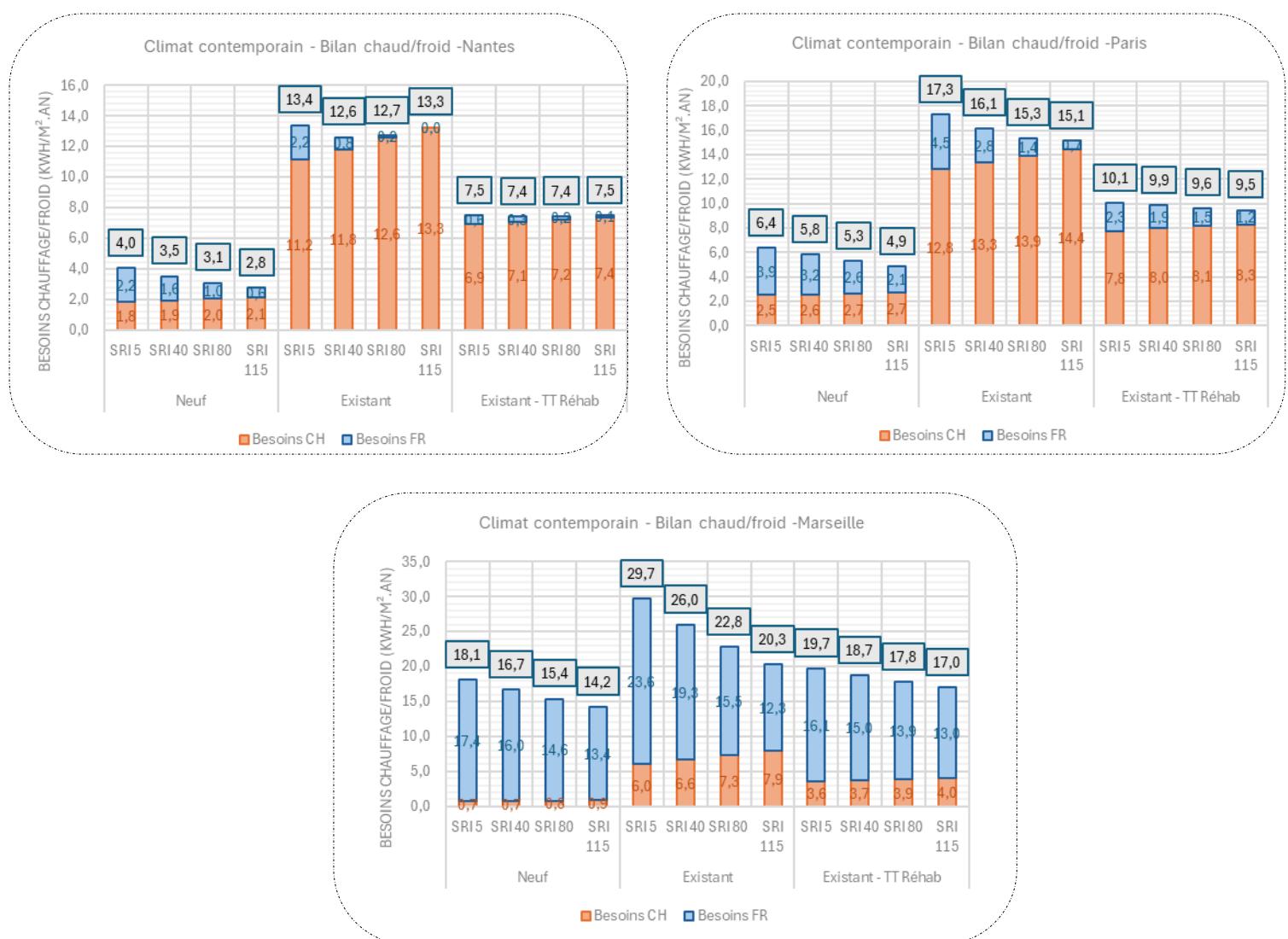


Le tableau suivant donne les écarts sur les besoins de climatisation pour passer d'un SRI5 à un SRI115 ainsi que d'un SRI40 à un SRI115 :

Evolution des besoins de climatisation suivant deux niveaux de SRI – Climat 2050 (RCP 8.5)			
SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-2,5 kWh/m ² .an (-41%)	-2,7 kWh/m ² .an (-27%)	-4,5 kWh/m ² .an (-17%)
Existant	-6,2 kWh/m ² .an (-89%)	-7,8 kWh/m ² .an (-59%)	-14,2 kWh/m ² .an (-39%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-1,8 kWh/m ² .an (-50%)	-2,2 kWh/m ² .an (-26%)	-4,0 kWh/m ² .an (-15%)
SRI 40 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-1,6 kWh/m ² .an (-31%)	-1,7 kWh/m ² .an (-19%)	-2,9 kWh/m ² .an (-12%)
Existant	-3,7 kWh/m ² .an (-82%)	-4,9 kWh/m ² .an (-47%)	-9,1 kWh/m ² .an (-29%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-1,1 kWh/m ² .an (-39%)	-1,4 kWh/m ² .an (-18%)	-2,6 kWh/m ² .an (-10%)

4.2.3. Bilan chauffage/climatisation

Les graphiques suivants présentent les bilans des besoins de chauffage et de refroidissement suivant la performance thermique du bâtiment (Neuf, Existant, Existant + toiture isolée) et les revêtements appliqués :

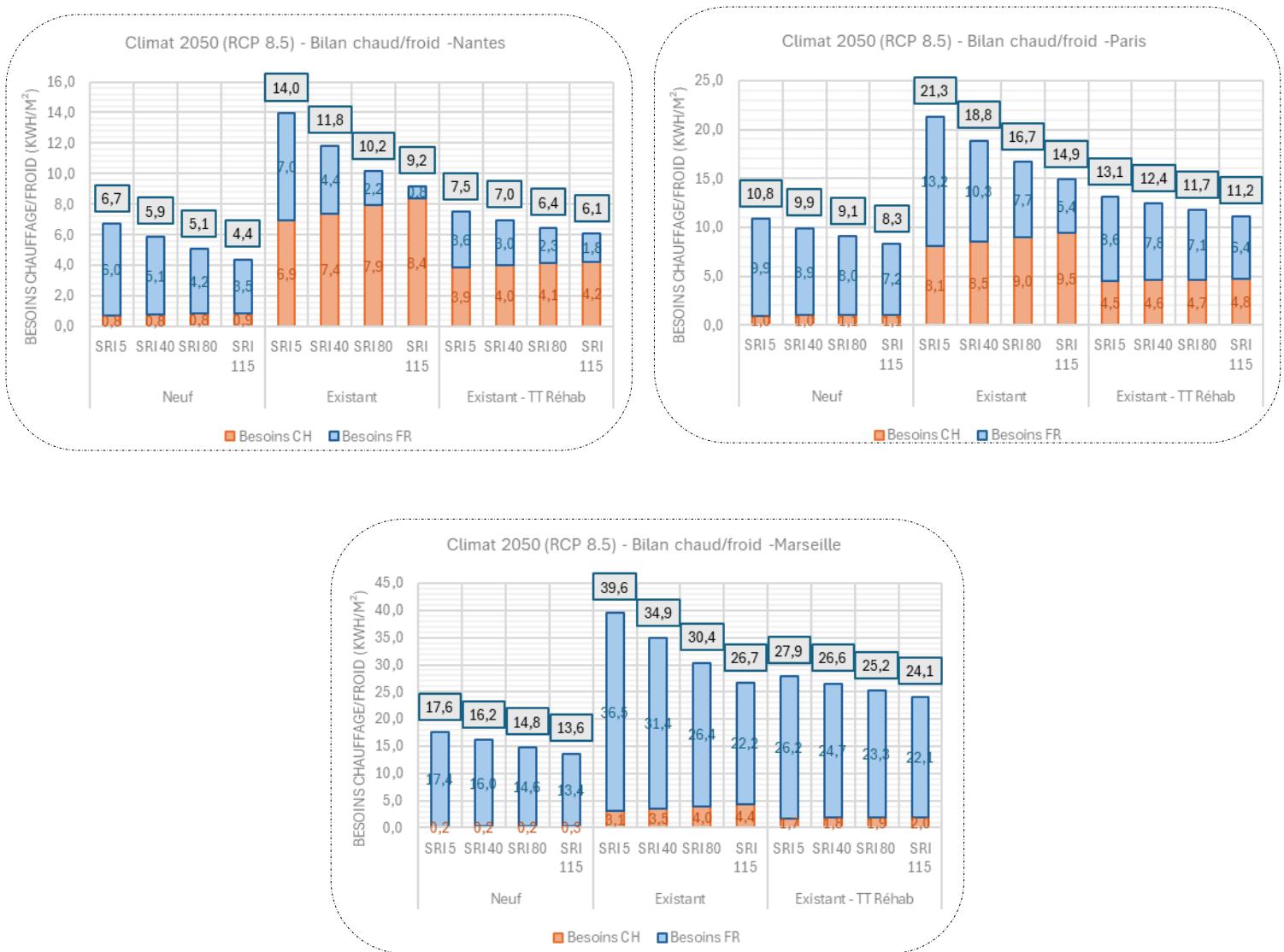


Evolution du bilan chauffage/climatisation – Bâtiment industriel – Climat contemporain			
SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-1,3 kWh/m ² .an (-31%)	-1,5 kWh/m ² .an (-24%)	-3,8 kWh/m ² .an (-21%)
Existant	-0,1 kWh/m ² .an (-1%)	-2,2 kWh/m ² .an (-12%)	-9,4 kWh/m ² .an (-32%)
Existant (Toiture réhabilitée)	+0,0 kWh/m ² .an (+0%)	-0,6 kWh/m ² .an (-6%)	-2,7 kWh/m ² .an (-14%)

Pour un climat contemporain, on note que pour l'ensemble des configurations, le remplacement d'un revêtement sombre en toiture par un procédé réflectif est positif sur le bilan chauffage/refroidissement pour le bâtiment industriel étudié.

L'impact est le plus important pour des toitures peu/pas isolées et sur des régions chaudes (ex : Marseille).

Les graphiques ci-dessous sont ceux pour le climat 2050 (RCP 8.5) :

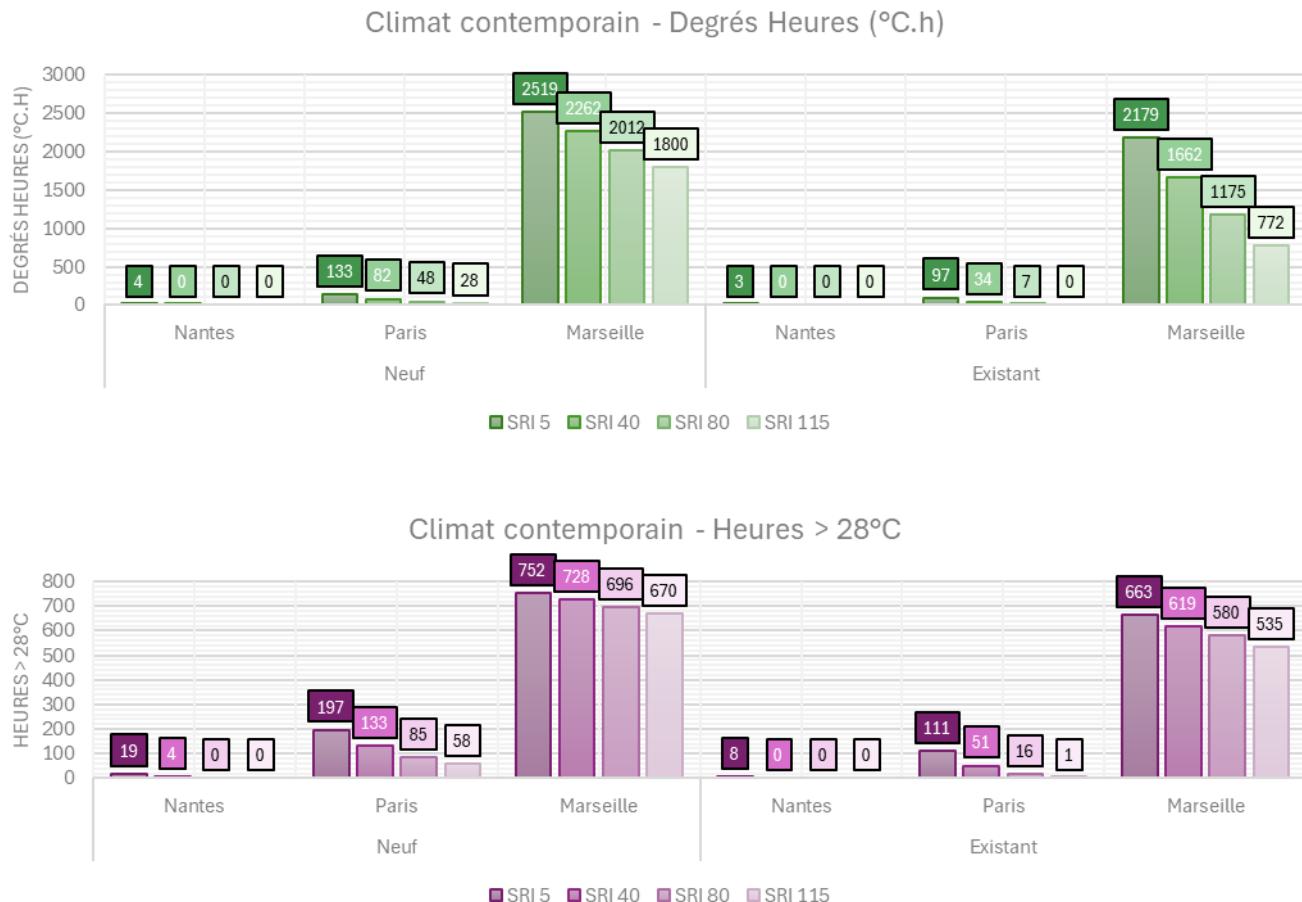


Evolution du bilan chauffage/climatisation – Bâtiment industriel – Climat 2050 (RCP 8.5)				
SRI 5 → SRI 115		Nantes	Paris	Marseille
Neuf		-2,3 kWh/m ² .an (-35%)	-2,5 kWh/m ² .an (-23%)	-4,0 kWh/m ² .an (-22%)
Existant		-4,8 kWh/m ² .an (-34%)	-6,4 kWh/m ² .an (-30%)	-12,9 kWh/m ² .an (-33%)
Existant (Toiture réhabilitée)		-1,5 kWh/m ² .an (-19%)	-1,9 kWh/m ² .an (-15%)	-3,8 kWh/m ² .an (-14%)

Pour une projection climatique à horizon 2050, le constat réalisé précédemment est accentué avec des gains globaux sur l'année encore plus conséquents.

4.2.4. Confort d'été

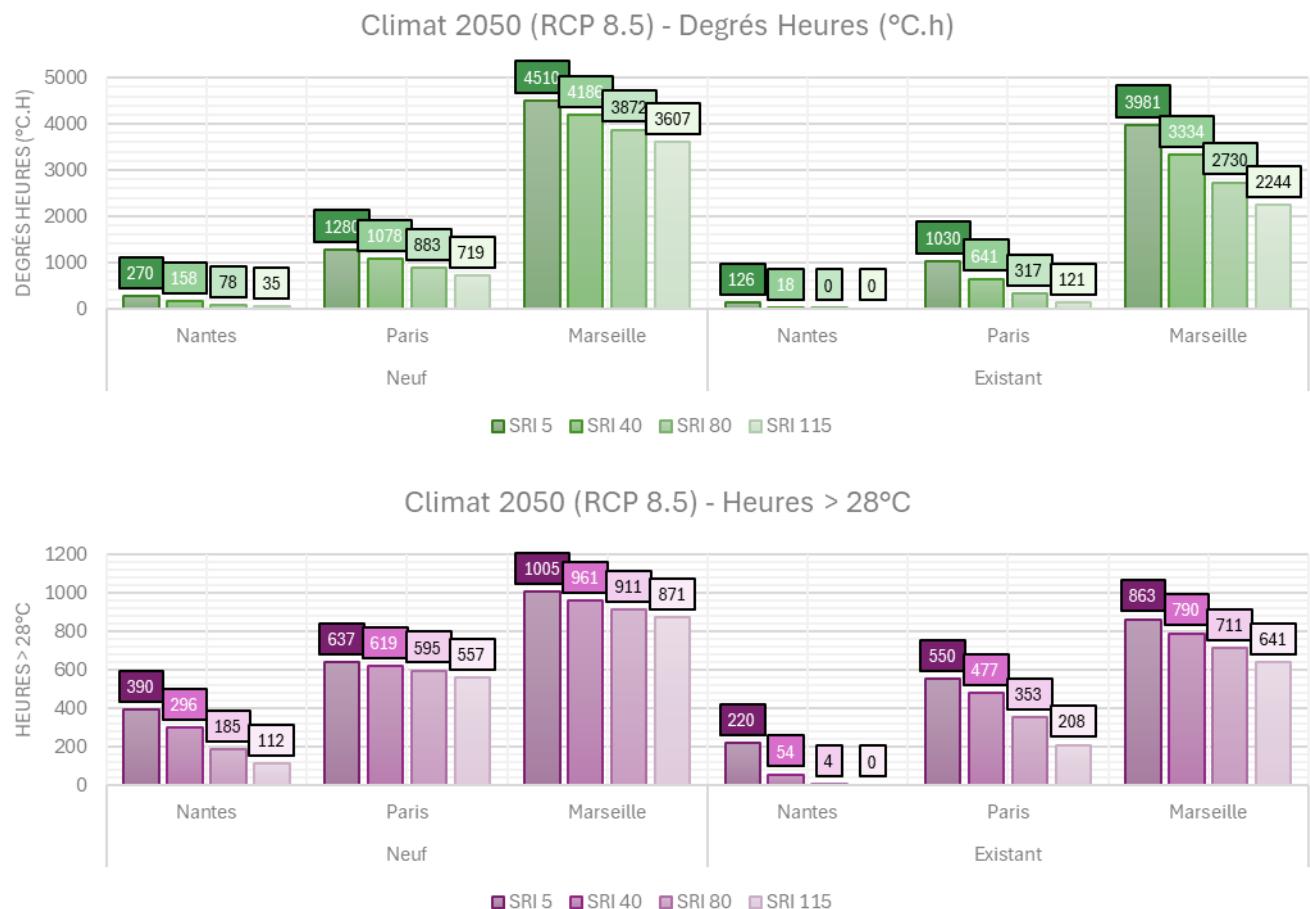
Les graphiques ci-dessous présentent les niveaux et évolutions des indicateurs de confort d'été (Degrés-Heures et nombre d'heures supérieures à 28°C) :



Evolution des indicateurs de confort suivant deux niveaux de SRI – Climat contemporain						
	Degrés-Heures (°C.h)			Nombre d'heures > 28°C		
	Nantes	Paris	Marseille	Nantes	Paris	Marseille
SRI 5 → SRI 115						
Neuf	-4 °C.h (-100%)	-106 °C.h (-79%)	-719 °C.h (-29%)	-19h (-100%)	-139h (-71%)	-82h (-11%)
Existant	-3 °C.h (-100%)	-97 °C.h (-100%)	-1407 °C.h (-65%)	-8h (-100%)	-110h (-99%)	-128h (-19%)
SRI 40 → SRI 115						
Neuf	-	-54 °C.h (-66%)	-462 °C.h (-20%)	-4h (-100%)	-75h (-56%)	-58h (-8%)
Existant	-	-34 °C.h (-100%)	-891 °C.h (-54%)	-	-50h (-98%)	-84h (-14%)

Le gain annoncé est limité par les faibles durées d'inconfort du projet de référence → couverture totale des temps d'inconfort (100%)

Pour la projection climatique 2050 :

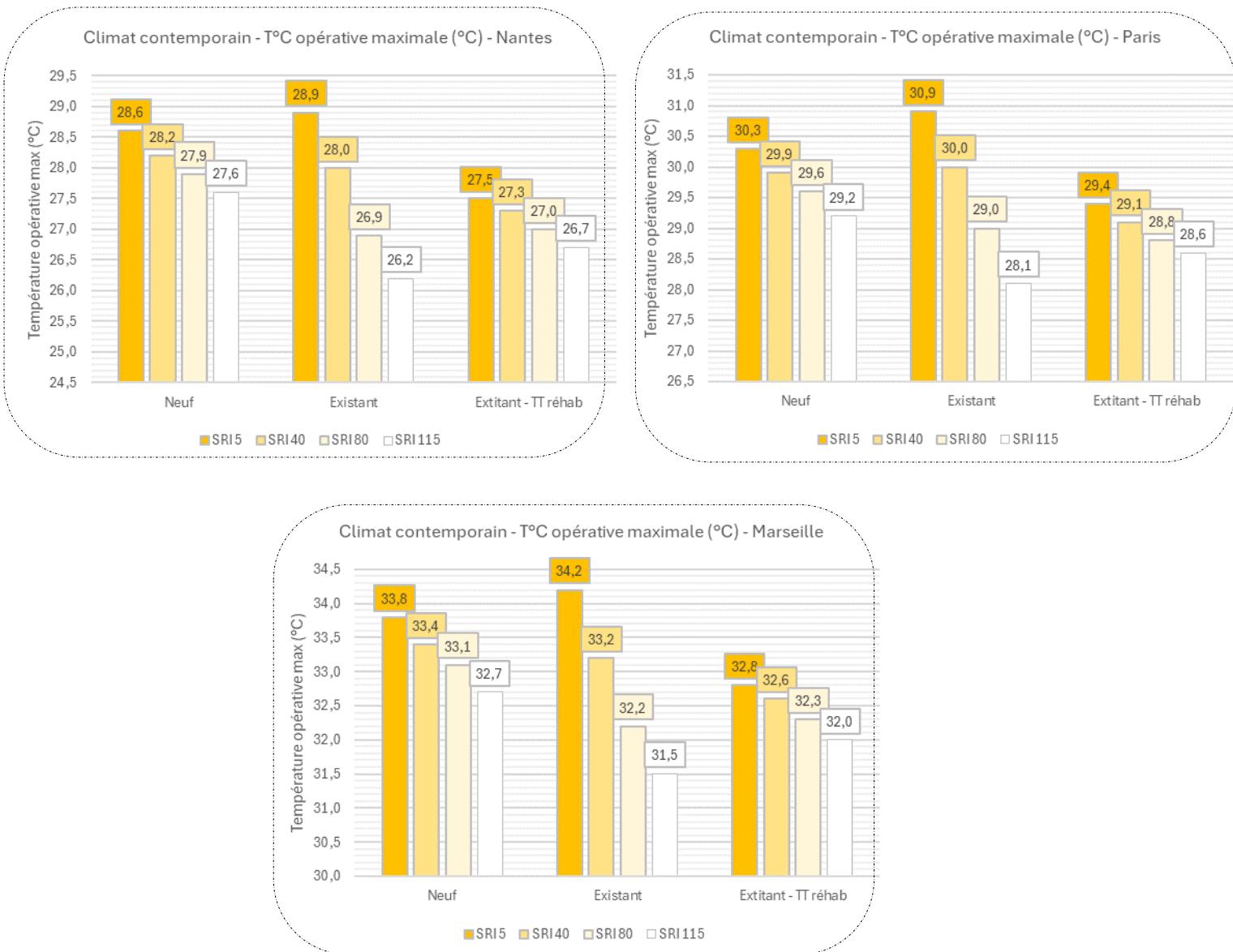


Evolution des indicateurs de confort suivant deux niveaux de SRI – Climat 2050 (RCP 8.5)						
	Degrés-Heures (°C.h)			Nombre d'heures > 28°C		
	Nantes	Paris	Marseille	Nantes	Paris	Marseille
SRI 5 → SRI 115						
Neuf	-235 °C.h (-87%)	-562 °C.h (-44%)	-903 °C.h (-20%)	-278h (-71%)	-80h (-13%)	-134h (-13%)
Existant	-126 °C.h (-100%)	-910 °C.h (-88%)	-1738 °C.h (-44%)	-220h (-100%)	-342h (-62%)	-222h (-26%)
SRI 40 → SRI 115						
Neuf	-123 °C.h (-78%)	-359 °C.h (-33%)	-579 °C.h (-14%)	-184h (-62%)	-62h (-10%)	-90h (-9%)
Existant	-18 °C.h (-100%)	-520 °C.h (-81%)	-1090 °C.h (-33%)	-54h (-100%)	-269h (-56%)	-149h (-19%)

Le gain annoncé est limité par les faibles durées d'inconfort du projet de référence → couverture totale des temps d'inconfort (100%)

- L'impact de la toiture réflective est plus significatif pour les bâtiments existants,
- Plus les conditions de températures extérieures sont élevées (ex : Marseille), moins le gain en relatif est important. Le constat va dans le même sens entre un climat contemporain et une projection 2050, le gain en relatif est moins élevé pour ce dernier du fait d'un impact plus conséquent de l'élévation des températures extérieures.

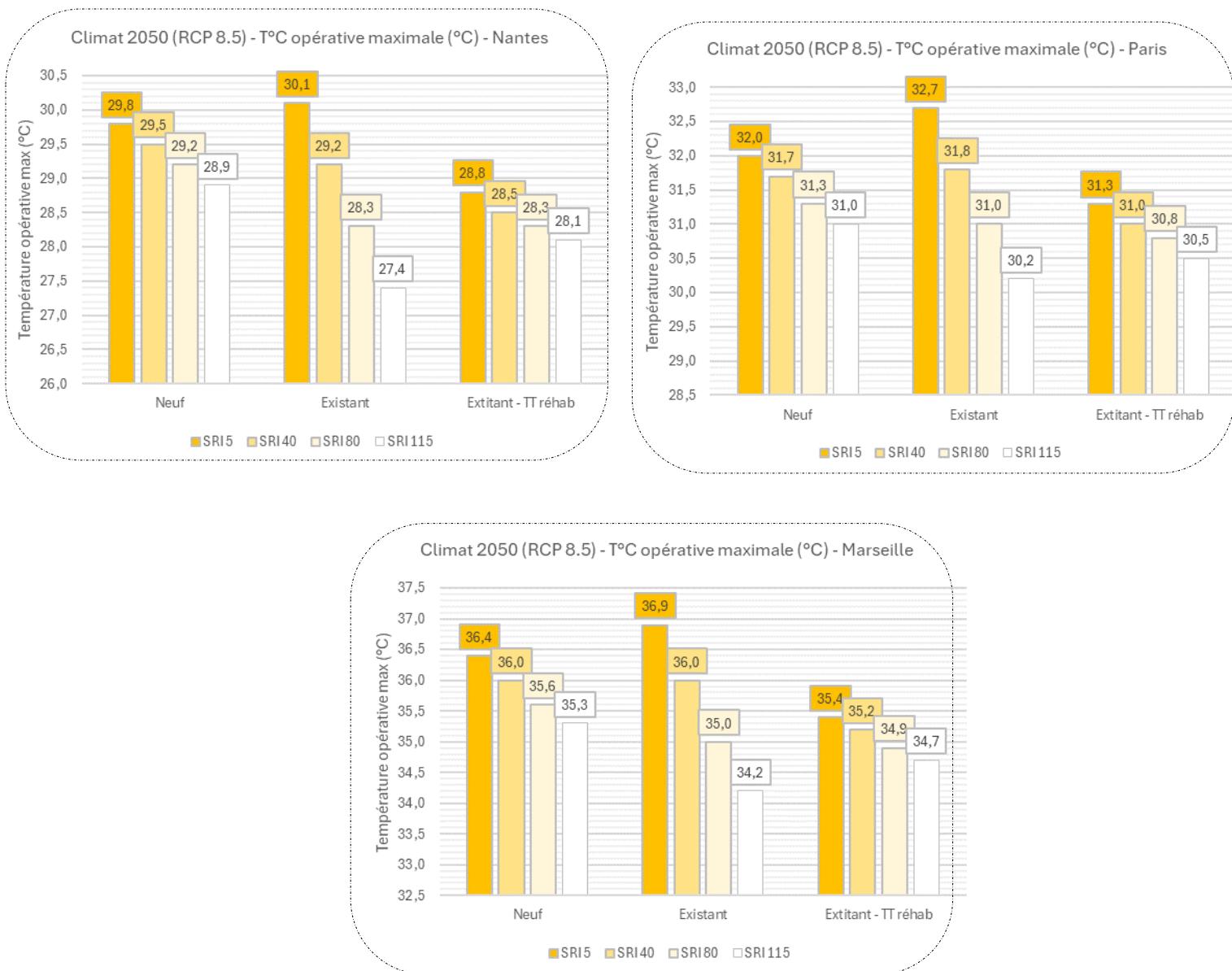
Les graphiques ci-dessous présentent les évolutions des températures opératives maximales :



Evolution des températures opératives maximales – Climat contemporain			
SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-1,1 °C	-1,1 °C	-1,1 °C
Existant	-2,7 °C	-2,8 °C	-2,7 °C
Existant (Toiture réhabilitée)	- 0,8 °C	- 0,8 °C	- 0,8 °C

Pour le bâtiment industriel étudié, lorsque la toiture est isolée, l'application d'un procédé réflectif permet de réduire jusqu'à 1°C la température opérative maximale dans le bâtiment et jusqu'à 3°C pour le cas d'une toiture non isolée.

Pour la projection climatique 2050 :



Evolution des températures opératives maximales – Climat 2050 (RCP 8.5)

SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-0,9 °C	-1,0 °C	-1,1 °C
Existant	-2,7 °C	-2,5 °C	-2,7 °C
Existant (Toiture réhabilitée)	- 0,7 °C	- 0,8 °C	- 0,7 °C

Le constat est sensiblement équivalent à celui effectué pour le climat contemporain :

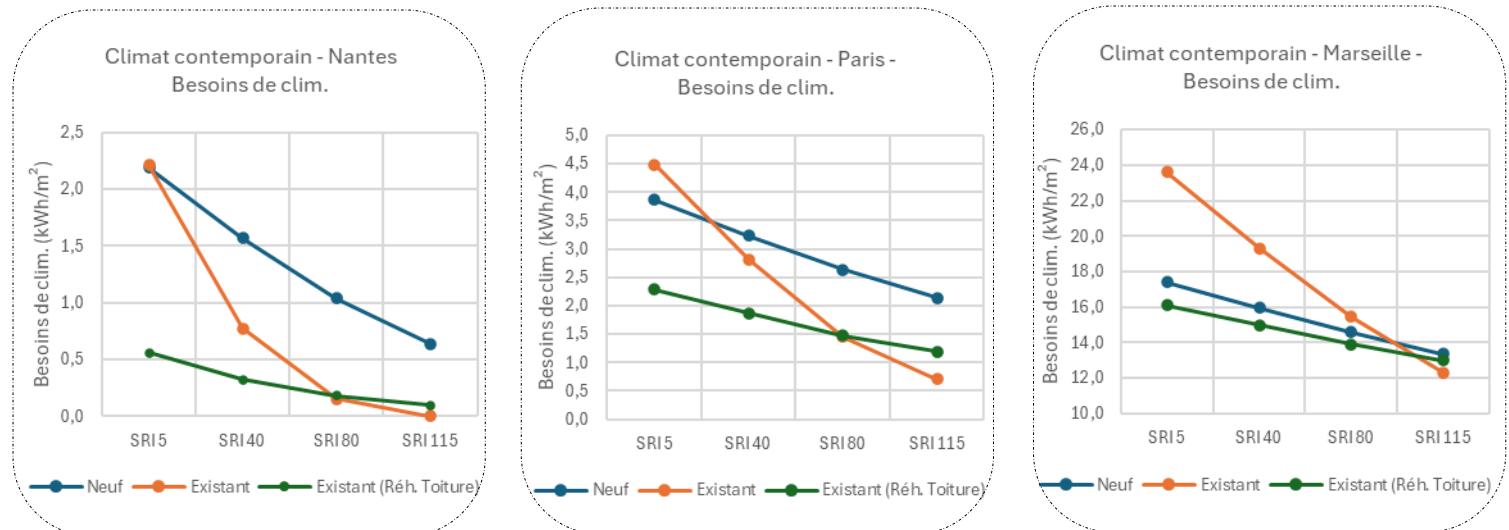
- Toiture isolée : réduction de 1°C de la température opérative maximale avec un procédé réflectif
- Toiture non isolée : réduction de 2,7°C de la température opérative maximale avec un procédé réflectif

4.3. Cas particuliers

4.3.1. Impact de l'isolation de la toiture

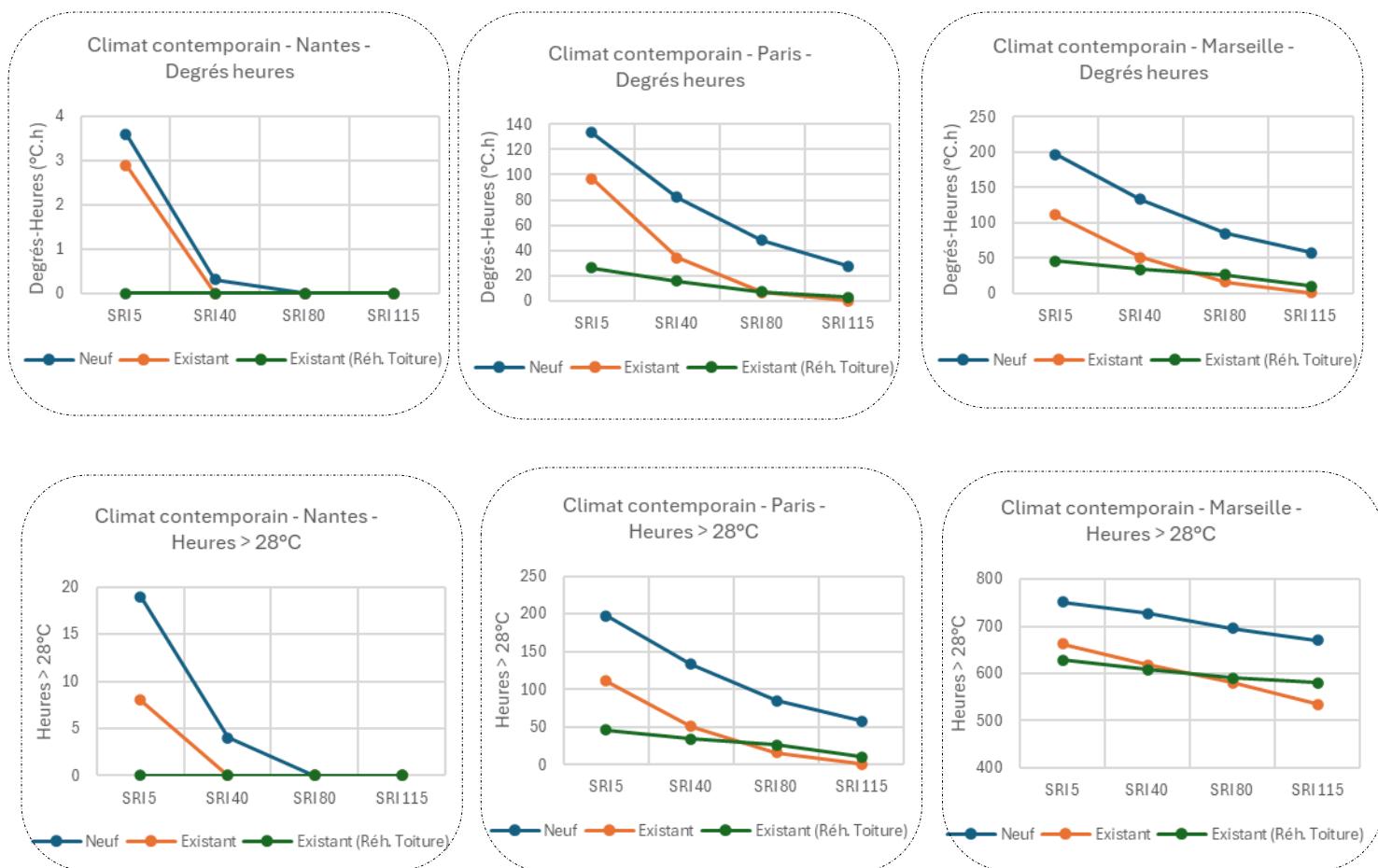
Les graphiques ci-dessous présentent l'évolution des besoins de climatisation suivant trois niveaux de performances thermiques du bâtiment pour un climat contemporain :

- Bâtiment neuf (prestations RE2020)
- Bâtiment existant
- Bâtiment existant avec toiture réhabilitée (20cm LdR)

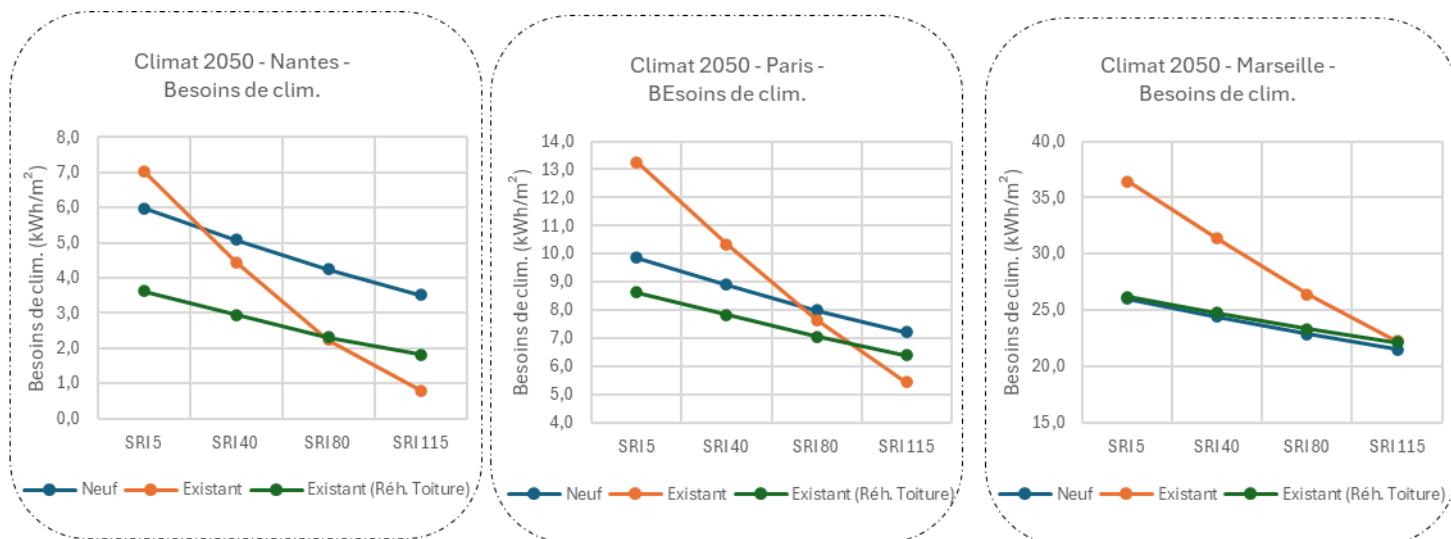


- Un **bâtiment existant dont la toiture a été isolée** présente des besoins de climatisation plus faibles pour des couvertures plus sombres. Pour ces configurations la résistance thermique en toiture atténue les variations du flux thermique. Une faible isolation du reste de l'enveloppe et une plus importante perméabilité à l'air vis-à-vis d'une **construction neuve** expliquent également des besoins plus faibles. La tendance s'inverse avec une élévation du SRI. Plus la réflectivité de la toiture est importante, moins la résistance thermique n'a d'influence sur les variations du flux thermique en toiture.
- L'impact d'une toiture « cool roof » est plus important pour le cas d'une toiture faiblement isolée (cf évolution des courbes orange)
- L'isolation thermique de la toiture est contre-productive pour le rafraîchissement lorsqu'on a recours à une toiture fortement réflective. La résistance thermique de la toiture réduit la possibilité d'évacuer la chaleur par la toiture.

L'évolution des indicateurs de confort d'été (Degrés-Heures, heures >28°C) apporte des conclusions similaires sur le couple réflectivité solaire et isolation thermique de la toiture :



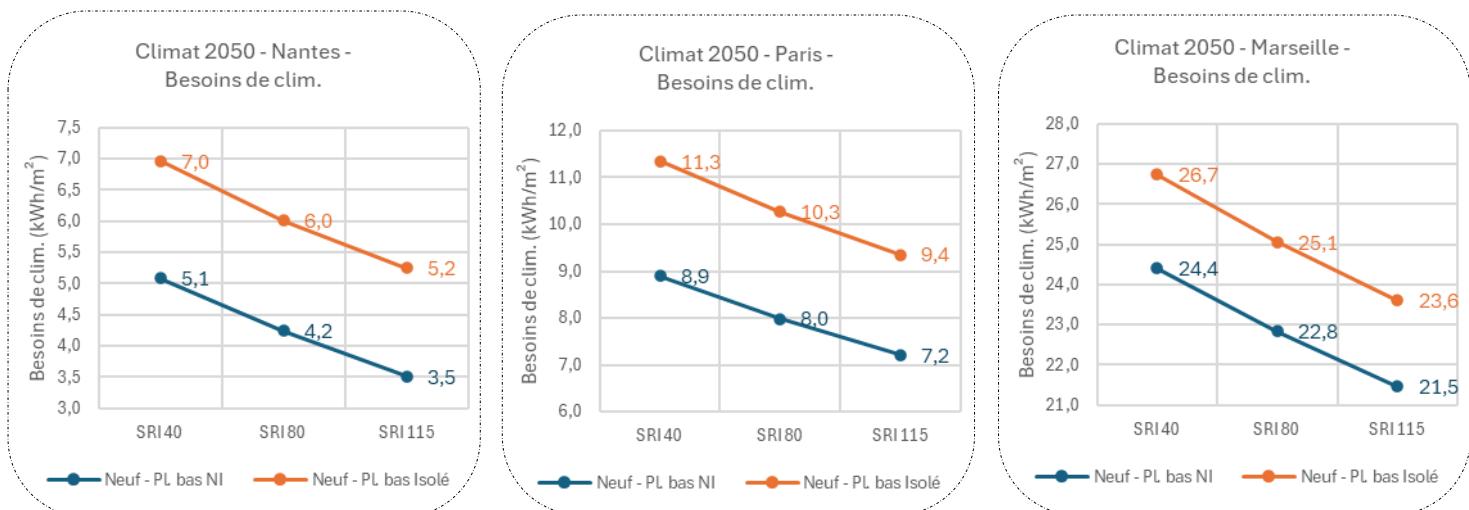
Les graphiques ci-dessous font l'analyse similaire sur les besoins de climatisation pour une projection climatique 2050 :



4.3.2. Impact de l'isolation du plancher bas

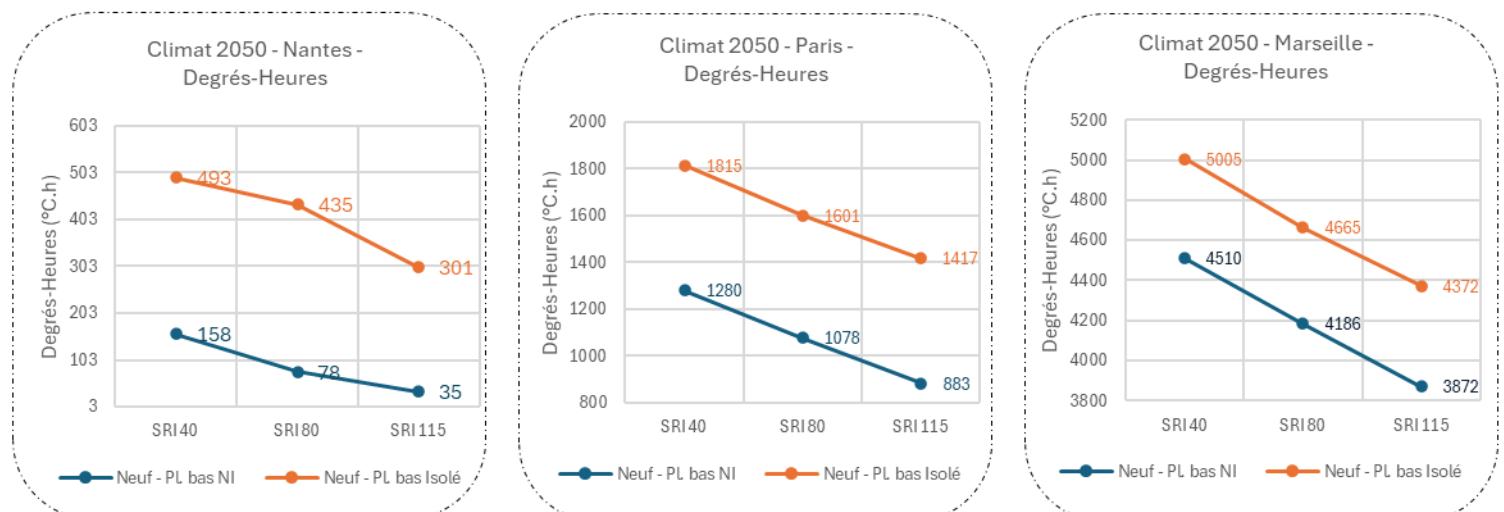
Dans cette partie, nous avons regardé l'impact de l'isolation du plancher bas sur les indicateurs de besoins de climatisation et de confort d'été. Pour le cas de référence, le plancher bas en contact avec le terre-plein n'est pas isolé. Le bâtiment bénéficie alors de l'inertie du sol impactant significativement le rafraîchissement passif.

Pour cette configuration, nous avons intégré une isolation thermique de 8cm de polyuréthane ($R_{isolant} = 3,6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) sous la dalle béton du plancher bas. Les simulations ont uniquement été modélisées sur une projection climatique 2050.



- **Isoler thermiquement le plancher bas** va couper le bénéfice de l'inertie du sol et donc augmenter les besoins de climatisation du bâtiment. On note une augmentation moyenne de l'ordre de 2 kWh/m² pour les stations météos.
- En moyenne l'impact de réflectivité de la toiture en valeur absolue est sensiblement équivalent entre le cas d'un plancher bas **non isolé** et **isolé**.
- Pour l'indicateur de besoins de climatisation, bénéficier de l'inertie thermique du sol est aussi bénéfique que de passer d'un SRI 40 à un SRI 115

L'analyse sur l'indicateur Degrés-Heures est sensiblement identique :



4.3.3. Impact de la ventilation naturelle

La ventilation naturelle est un des leviers les plus impactant vis-à-vis du confort estival dans sa capacité à évacuer la chaleur d'un local. Les charges thermiques accumulées en journée peuvent notamment être évacuées la nuit lorsque les conditions de températures extérieures le permettent. Ceci peut également se faire en période d'occupation en journée.

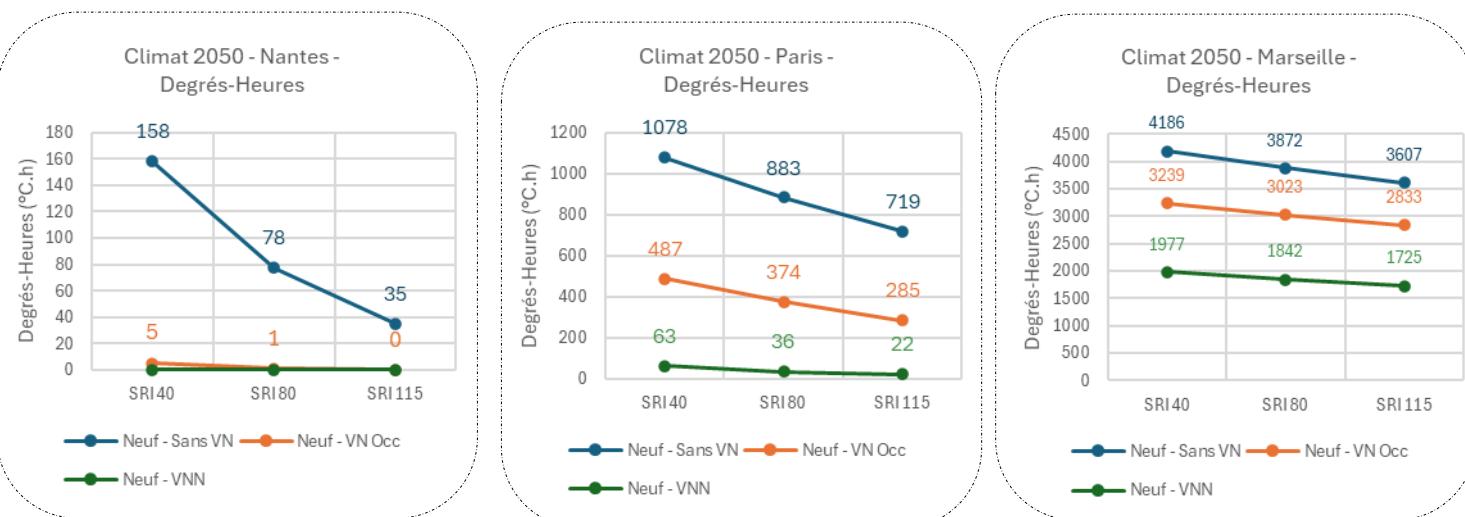
La ventilation naturelle est cependant dépendante de plusieurs facteurs :

- Part ouvrable des ouvertures (ex : ouverture à la française → 80% / ouverture coulissante → 40%),
- Caractère traversant du local,
- Gestion des ouvertures (nécessité d'une occupation en gestion manuelle / possibilité d'intrusion si ouverture nocturne / ...),
- Températures extérieures,
- Perméabilité de l'occultation associée à la menuiserie si celle-ci est fermée

Le cas initial étant considéré sans ventilation naturelle, nous avons en première approche modélisé deux possibilités d'ouverture des lanterneaux en toiture :

- Ventilation naturelle en journée et en occupation (pas de possibilité d'ouverture en inoccupation)
- Ventilation naturelle nocturne (en inoccupation)

Les lanterneaux ont été considérés avec une ouverture maximale de 40% et l'ouverture est effective lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure.

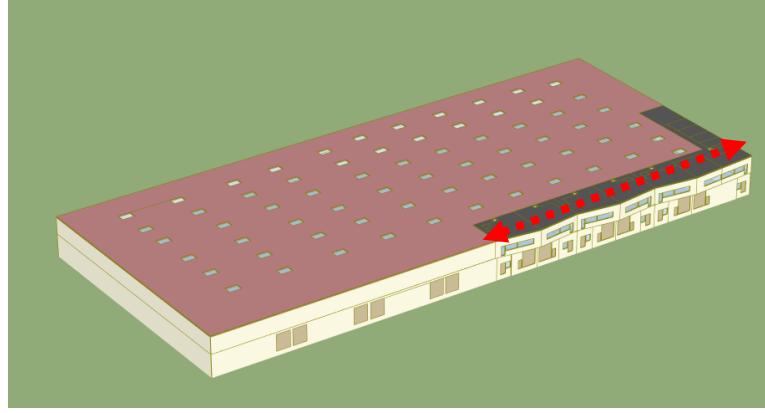
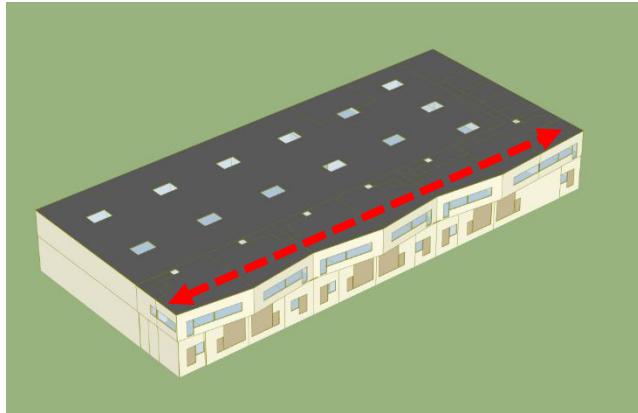


A noter que nous avons regardé l'impact d'une ventilation naturelle uniquement par les portes sectionnelles situées en façade du bâtiment (en occupation seulement). L'impact est négligeable à l'échelle du bâtiment.

- La **ventilation naturelle diurne** via les lanterneaux permet de réduire significativement l'inconfort. Le gain sur les degrés-heures est plus important que le recours à une membrane réflective (SRI 115) dans le cas **sans ventilation naturelle**,
- La **ventilation naturelle nocturne** est le levier le plus performant pour réduire l'inconfort sur le bâtiment étudié,
- L'impact d'une toiture type « cool roof » est plus significatif pour une configuration **sans ventilation naturelle** possible par les lanterneaux.

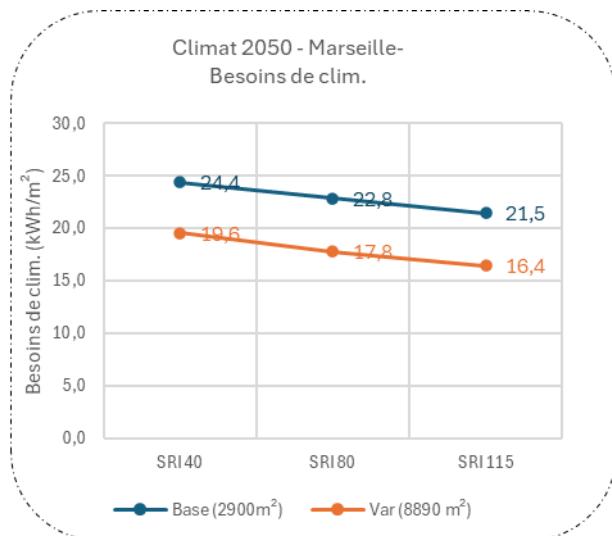
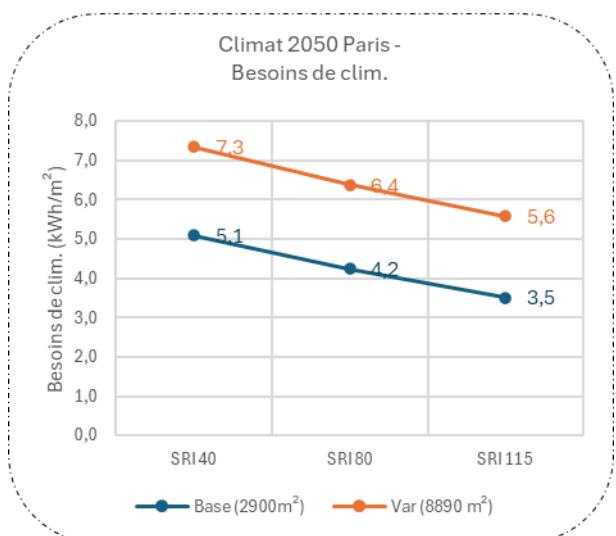
4.3.4. Impact de la surface du bâtiment

Nous avons également agrandi le bâtiment de référence d'une surface 4 fois supérieure pour vérifier si les ordres de grandeurs évalués précédemment étaient équivalents.



	Référence	Variante
Surface au sol de l'entrepôt	1950 m ²	8886 m ²
Surface totale toiture (83 m ² de lanterneaux)	2306 m ²	9200 m ² (400 m ² de lanterneaux)
Volume totale du bâtiment	19 130m ³	77 960 m ³
Part de la toiture sur les surfaces déperditives	35%	40%

Pour ce cas, nous avons regardé dans un premier temps l'évolution des besoins de climatisation pour les deux bâtiments :



➔ Les évolutions sont similaires pour les deux surfaces, seul le point de référence varie. Il n'apparaît pas pertinent de reprendre l'ensemble des simulations pour un second bâtiment

4.3.5. Fichier météo de Strasbourg

Le tableau suivant présente les données météorologiques pour les climats contemporain et 2050 pour les 3 villes précédemment étudiés ainsi que la ville de Strasbourg :

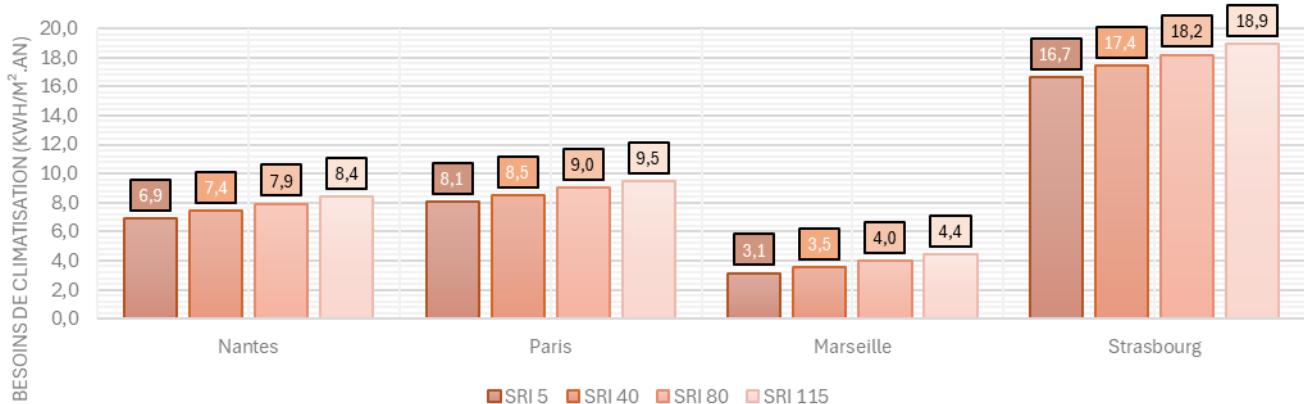
		Températures			DJU		Ensoleillement global horizontal (kWh/m ²)	
		Minimale	Maximale	Moyenne	Chaud (18°C)	Froid (18°C)	Période chauffage (15 oct. au 15 avril)	Période clim. (16 avril. au 14 oct.)
Nantes	Moyenne 2000 à 2019	-4,5°C	34,0°C	12,5°C	2205	276	351	971
	Prévisions GIEC à 2050 (RCP 8.5)	-3,4°C	35,5°C	14,0°C	1822	414	368	1011
Paris	Moyenne 2000 à 2019	-4,3°C	34,0°C	12,7°C	2217	314	304	857
	Prévisions GIEC à 2050 (RCP 8.5)	-3,0°C	36,6°C	14,5°C	1843	594	312	911
Marseille	Moyenne 2000 à 2019	-3,3°C	36,2°C	15,8°C	1543	820	485	1133
	Prévisions GIEC à 2050 (RCP 8.5)	-2,0°C	38,7°C	17,6°C	1265	1186	499	1146
Strasbourg	Moyenne 2000 à 2019	-9,2°C	34,7°C	11,3 °C	2721	346	309	862
	Prévisions GIEC à 2050 (RCP 8.5)	-7,6°C	37,4 °C	13,3 °C	2283	616	314	924

- Besoins de chauffage**

Climat contemporain - Bâtiment existant - Besoins de chauffage (kWh/m².an)

Evolution des besoins de chauffage suivant deux niveaux de SRI – Climat contemporain

Existant	Nantes	Paris	Marseille	Strasbourg
SRI 5 → SRI 115	+2,1 kWh/m ² .an (+19%)	+1,6 kWh/m ² .an (+13%)	+1,9 kWh/m ² .an (+31%)	+2,8 kWh/m ² .an (+12%)
SRI 40 → SRI 115	+1,4 kWh/m ² .an (+12%)	+1,1 kWh/m ² .an (+8%)	+1,3 kWh/m ² .an (+19%)	+1,9 kWh/m ² .an (+8%)

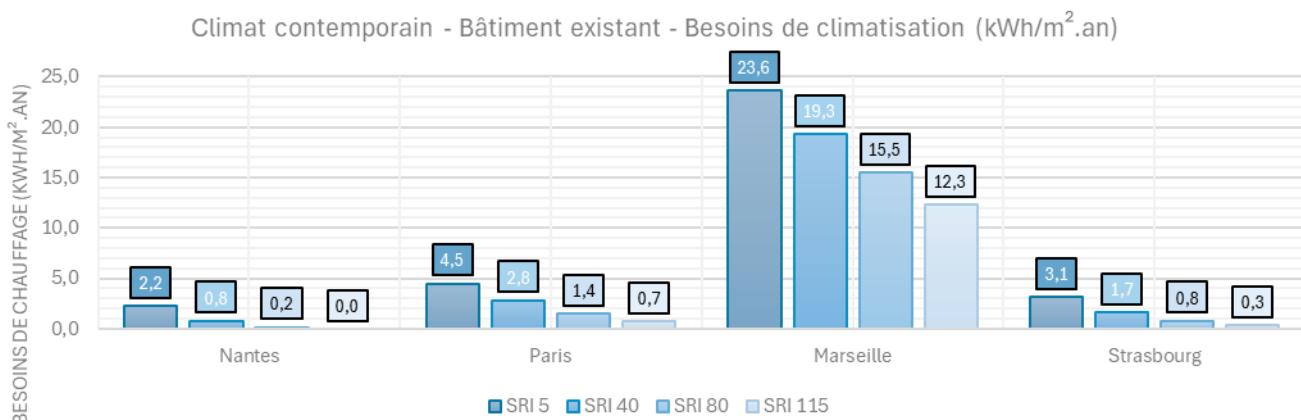
Climat 2050 (RCP 8.5) - Bâtiment existant - Besoins de chauffage (kWh/m².an)

Evolution des besoins de chauffage suivant deux niveaux de SRI – Climat 2050 (RCP 8.5)

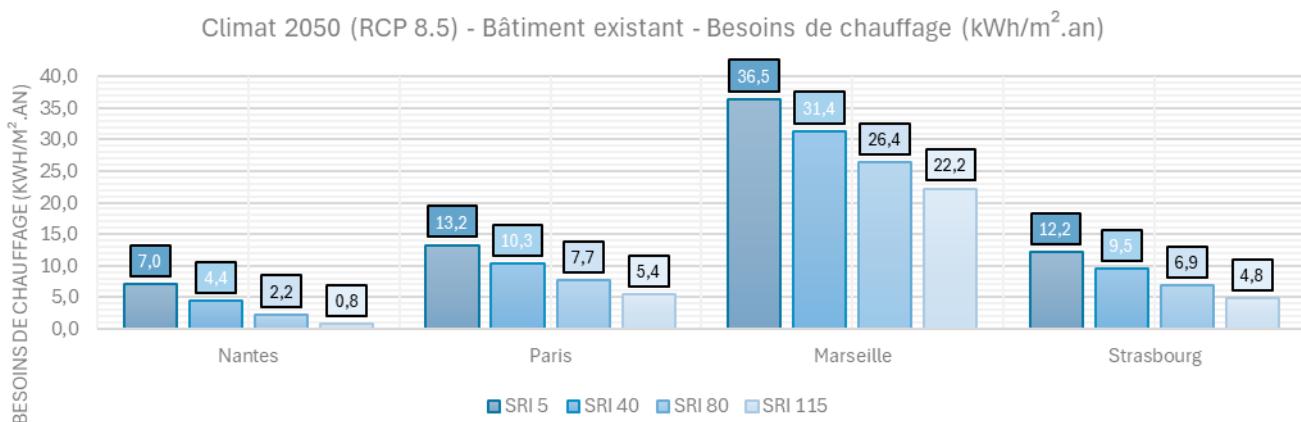
Existant	Nantes	Paris	Marseille	Strasbourg
SRI 5 → SRI 115	+1,5 kWh/m ² .an (+21%)	+1,4 kWh/m ² .an (+17%)	+1,3 kWh/m ² .an (+19%)	+2,3 kWh/m ² .an (+14%)
SRI 40 → SRI 115	+1,0 kWh/m ² .an (+13%)	+0,9 kWh/m ² .an (+11%)	+0,9 kWh/m ² .an (+25%)	+1,5 kWh/m ² .an (+9%)

→ Le climat étant plus rigoureux sur la période hivernale pour la ville de Strasbourg, l'augmentation des besoins à la suite de l'intégration d'une toiture cool roof est sensiblement plus importante que pour les autres villes. Cependant le gain en relatif est moins élevé du fait d'un impact moindre des apports solaires en toiture.

- **Besoins de climatisation**



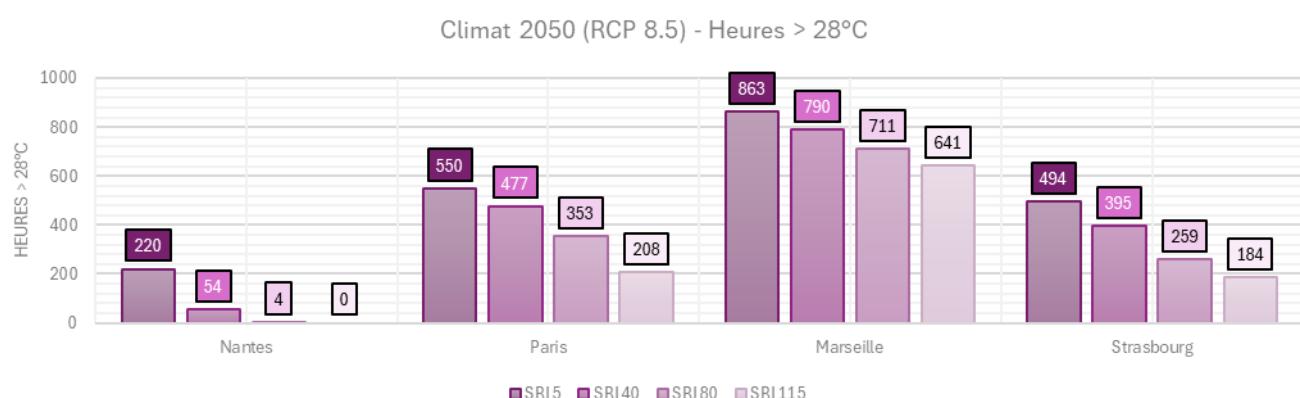
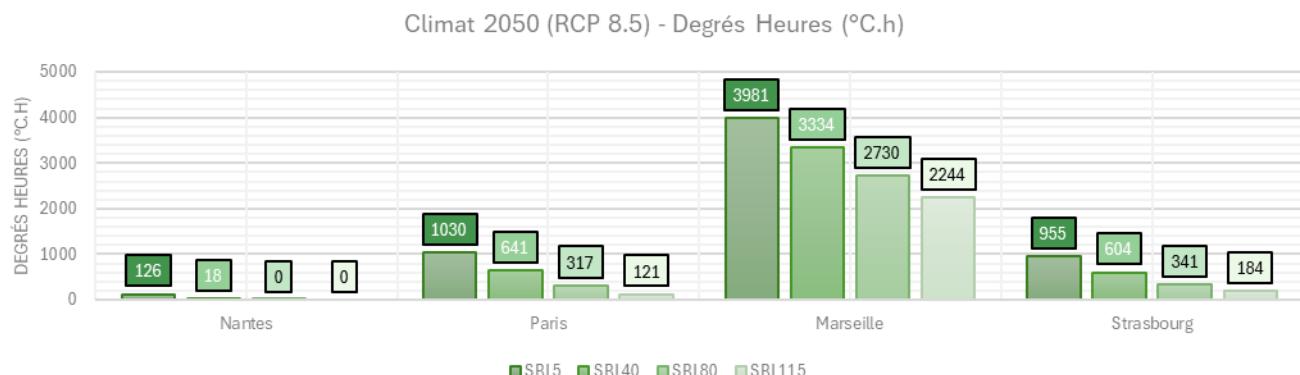
Evolution des besoins de climatisation suivant deux niveaux de SRI – Climat contemporain				
Existant	Nantes	Paris	Marseille	Strasbourg
SRI 5 → SRI 115	-2,2 kWh/m².an (-100%)	-3,8 kWh/m ² .an (-84%)	-11,3 kWh/m ² .an (-48%)	-2,8 kWh/m ² .an (-91%)
SRI 40 → SRI 115	-0,8 kWh/m².an (-100%)	-2,1 kWh/m ² .an (-75%)	-7,0 kWh/m ² .an (-36%)	-1,4 kWh/m ² .an (-82%)



Evolution des besoins de climatisation suivant deux niveaux de SRI – Climat 2050 (RCP 8.5)				
Existant	Nantes	Paris	Marseille	Strasbourg
SRI 5 → SRI 115	-6,2 kWh/m².an (-89%)	-7,8 kWh/m ² .an (-59%)	-14,2 kWh/m ² .an (-39%)	-7,4 kWh/m ² .an (-60%)
SRI 40 → SRI 115	-3,7 kWh/m².an (-82%)	-4,9 kWh/m ² .an (-47%)	-9,1 kWh/m ² .an (-29%)	-4,6 kWh/m ² .an (-49%)

➔ Les données météorologiques projetées pour la ville de Strasbourg à horizon 2050 étant dans les mêmes ordres de grandeurs que pour la ville de Paris, les écarts en valeurs absolues et relatives sont comparables entre ces deux villes.

- **Degrés-Heures et nombre d'heures supérieurs à 28°C**



Evolution des indicateurs de confort suivant deux niveaux de SRI - Climat 2050 (RCP 8.5)								
Existant	Degrés-Heures (°C.h)				Nombre d'heures > 28°C			
	Nantes	Paris	Marseille	Strasbourg	Nantes	Paris	Marseille	Strasbourg
SRI 5 → SRI 115	-126 °C.h (-100%)	-910 °C.h (-88%)	-1738 °C.h (-44%)	-771 °C.h (-81%)	-220h (-100%)	-342h (-62%)	-222h (-26%)	-310h (-62%)
SRI 40 → SRI 115	-18 °C.h (-100%)	-520 °C.h (-81%)	-1090 °C.h (-33%)	-421 °C.h (-70%)	-54h (-100%)	-269h (-56%)	-149h (-19%)	-211h (-53%)

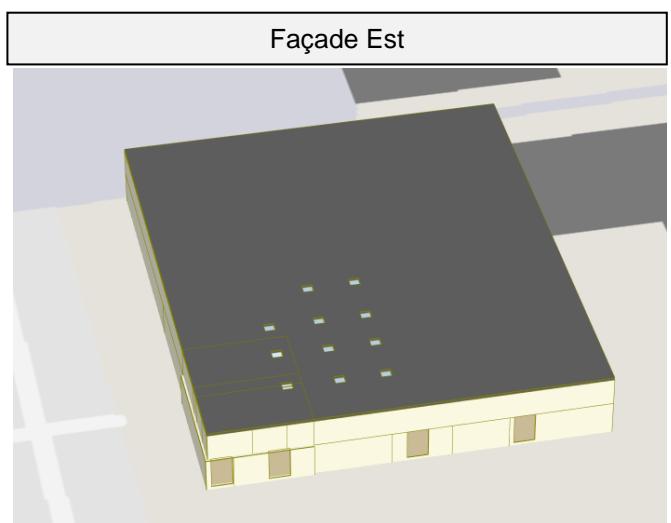
Le gain annoncé est limité par les faibles durées d'inconfort du projet de référence → couverture totale des temps d'inconfort (100%)

5. Bâtiments commerciaux

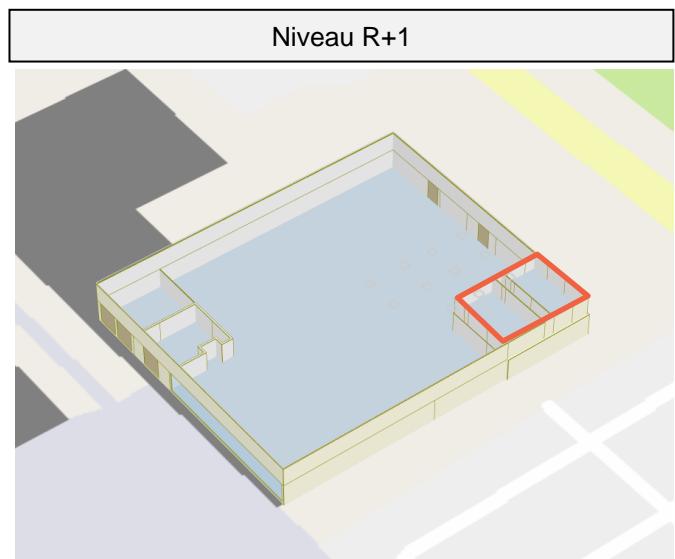
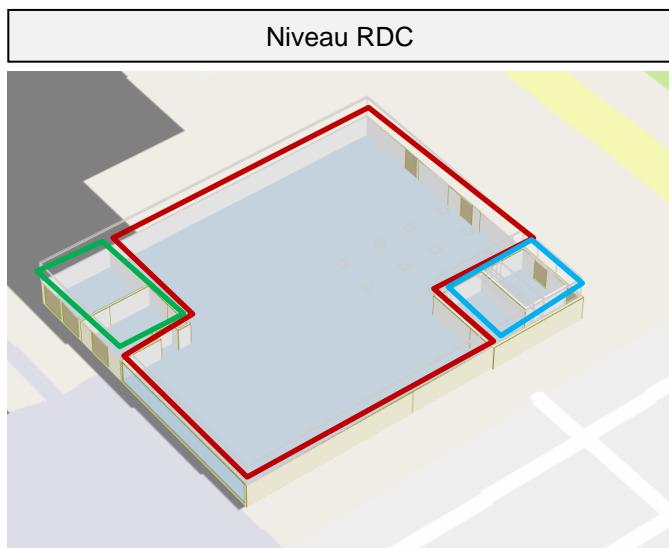
5.1. Bâtiment retenu

5.1.1. Modélisation du bâtiment

Ci-dessous la modélisation 3D du bâtiment présentée suivant différentes orientations



Le zonage est défini comme suit :



Espace de vente

Bureaux

Zone de stockage

Chambres froides

Zone	Surface
Espace de vente	1443 m ²
Bureaux	104 m ²
Zone de stockage	128 m ²
Chambres froides	112 m ²

5.1.2. Prestations thermiques

	Neuf	Existant
Murs sur extérieur	Façade double peau Isolation laine de verre (130mm Th32 – R=4 m².K/W) Bardage métallique	Façade double peau Isolation laine de verre (60mm Th36 - R=1,7 m².K/W) Bardage métallique
Plancher bas sur terre-plein	Dalle béton non isolée	
Toiture	Bac métallique + Isolation LDR (200mm Th36 – R=5,5 m².K/W) + membrane d'étanchéité	Bac métallique + Isolation LDR (60mm Th36 – R=1,7 m².K/W) + membrane d'étanchéité
Façade vitrée	Double vitrage – Uw=1,6 W/K/m²	
Lanterneau	Urc = 2,5 W/m².K	
Perméabilité à l'air	1,7 m³/h.m²	3,0 m³/h.m²

5.1.3. Consignes de températures

Les besoins de chauffage et de refroidissement sont calculés pour maintenir les consignes de température suivantes :

Consignes de températures			
Zone		Espace de vente	Bureaux
Chauffage	<i>Occupation</i>	19°C	19°C
	<i>Inoccupation (≤ 48 heures)</i>	16°C	16°C
	<i>Absence prolongée (>48 heures)</i>	7°C	7°C
Refroidissement	<i>Occupation</i>	26°C	26°C
	<i>Inoccupation (≤ 48 heures)</i>	30°C	30°C
	<i>Absence prolongée (>48 heures)</i>	-	-

5.1.4. Scénario d'occupation annuel

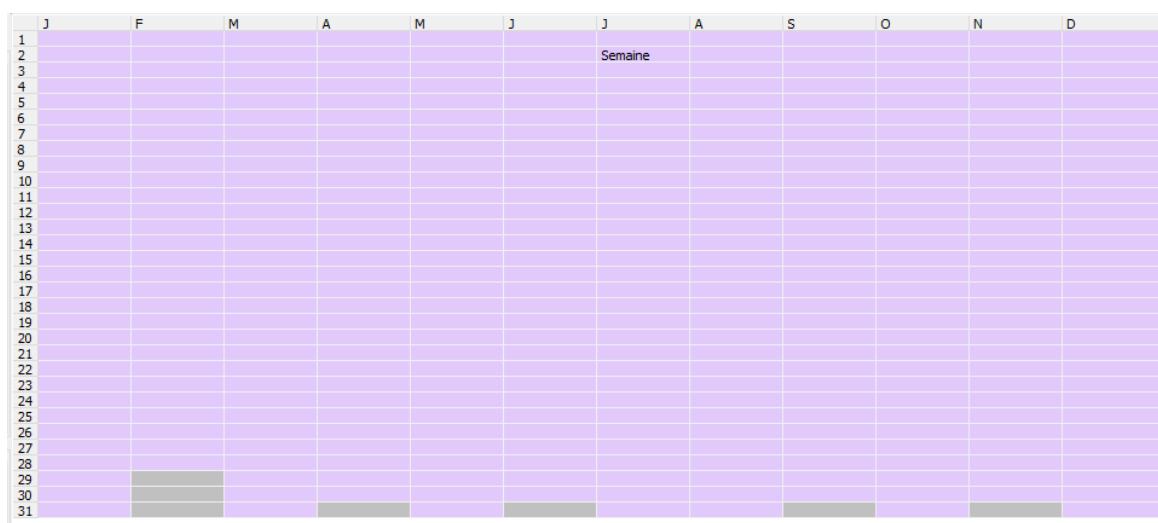
- Taux d'occupation

Taux d'occupation maximal	
Bureaux	0,10 occ. /m ² (RE2020)
Espace de vente	0,15 occ. /m ² (RE2020)

- Scénario annuel

Occupation hebdomadaire :

- **Bureaux** → lundi au samedi : 8h-18h
- **Espace de vente** → lundi au samedi : 8h-22h



 Semaine normale

5.1.5. Apports internes

- Eclairage

Eclairage		
Zone	Espace de vente	Bureaux
Puissance installée	8 W/m ²	8 W/m ²
Niveau d'éclairement mini (0,90 m)	300 lux	300 lux
Gestion	Interrupteur manuel marche/arrêt	
Gradation	Gestion manuelle avec lumière du jour	

- Divers équipements

Les apports internes liés aux équipements (bureautique, équipements industriels, ...) peuvent représenter une part importante et sur un usage industriel, ceux-ci peuvent être très variables d'un projet à un autre.

En première approche, nous nous sommes référés aux hypothèses considérées dans la RE2020 :

Apports internes (hypothèses RE2020)		
Zone	Espace de vente	Bureaux
Occupation	8 W/m ²	16 W/m ²
Inoccupation	0 W/m ²	1,6 W/m ²

5.1.6. Inertie thermique

En première approche, avons considéré l'inertie suivante pour les différentes zones :

	Inertie mobilier
Espace de vente	200 Wh/K/m ²
Bureaux	1 Wh/K/m ³

5.2. Résultats

Les tableaux suivants présentent les résultats initiaux pour les deux niveaux de prestations thermiques (neuf et existant) ainsi que pour les 6 fichiers météorologiques étudiés :

- Bâtiment neuf

Prestations thermiques : Neuf Procédé réflectif : SRI 5		Besoins de chauffage (kWh/m ² .an)	Besoins de refroidissement (kWh/m ² .an)	Degrés-Heures (°C.h)	Heures >28°C (occupation)	T°C max
Nantes	Contemporain	6,4	11,3	376	606	29,9
	2050	3,2	17,2	1409	1061	31,1
Paris	Contemporain	7,3	14,2	1029	837	31,3
	2050	3,7	23,9	3386	1259	33,2
Marseille	Contemporain	3,2	33,8	4896	1405	34,2
	2050	1,6	45,9	8332	1811	36,8

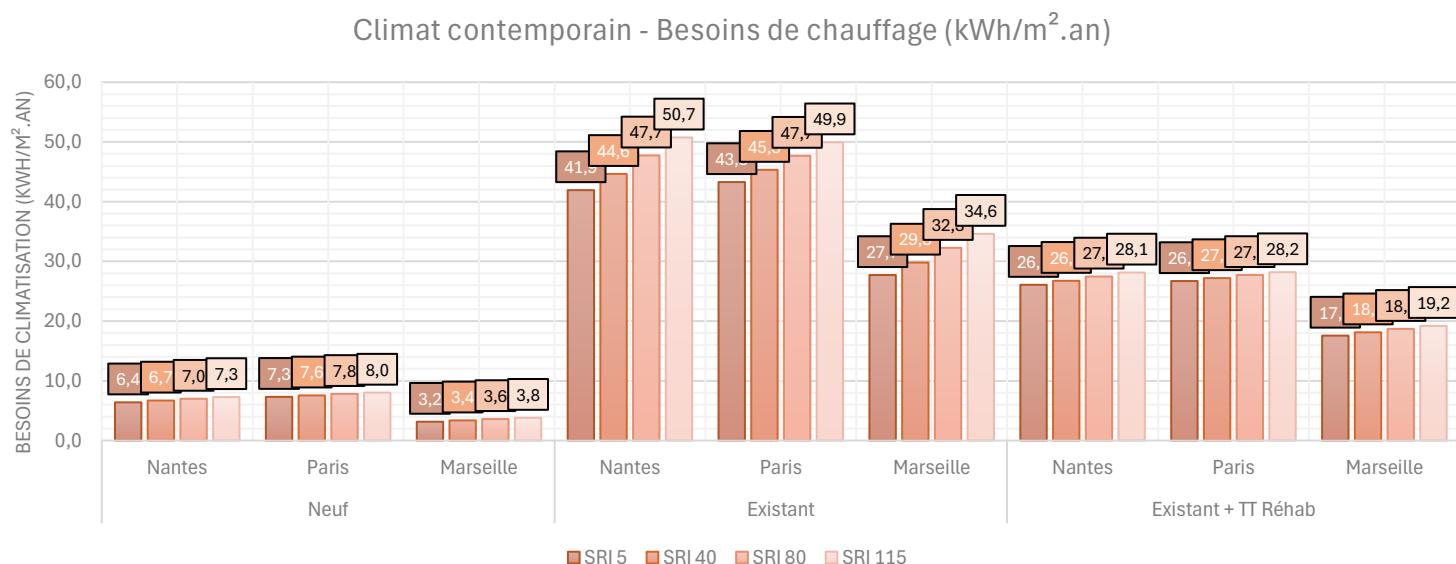
Pour l'usage « commerce », on note que pour l'ensemble des configurations avec de bonnes prestations thermiques, les besoins de climatisations sont supérieurs aux besoins de chauffage.

- Bâtiment existant

Prestations thermiques : Existant Procédé réflectif : SRI 5		Besoins de chauffage (kWh/m ² .an)	Besoins de refroidissement (kWh/m ² .an)	Degrés-Heures (°C.h)	Heures >28°C (occupation)	T°C max
Nantes	Contemporain	41,9	9,1	59	142	29,7
	2050	31,0	17,1	552	612	30,4
Paris	Contemporain	43,3	12,4	368	369	31,7
	2050	32,8	28,2	2315	983	33,5
Marseille	Contemporain	27,7	44,4	3885	1142	34,5
	2050	19,1	64,8	7023	1525	37,3

5.2.1. Besoins de chauffage

Les graphiques ci-dessous présentent les besoins de chauffage sur les trois stations météorologiques et les deux niveaux d'isolation suivant chacun des SRI étudiés :



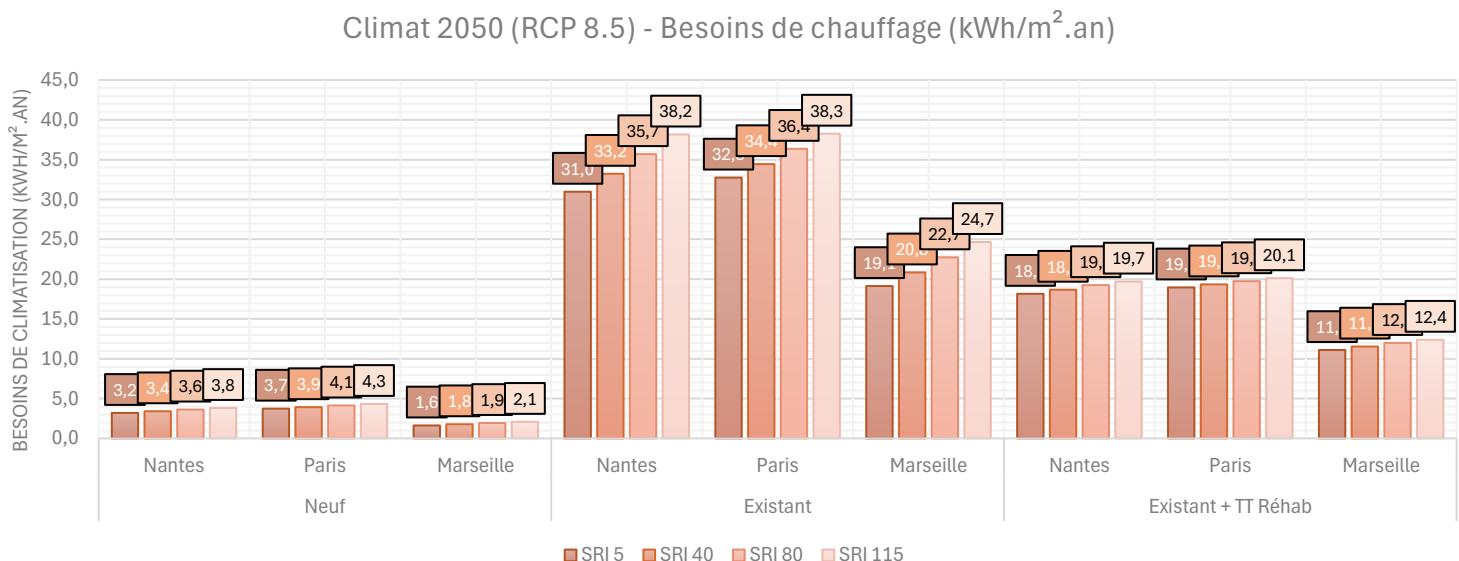
On observe une augmentation des besoins de chauffage avec l'augmentation de la réflectivité des toitures pour les trois zones climatiques étudiées :

- Bâtiment neuf : +0,2 à +0,3 kWh/m² par palier de SRI
 - Bâtiment existant : +2,7 à +3,1 kWh/m² par palier de SRI pour Nantes et +2,1 à +2,5 kWh/m² par palier de SRI pour Paris et Marseille
- L'impact du procédé réflectif sur les besoins de chauffage est beaucoup plus significatif dans le cas d'un bâtiment et d'une toiture faiblement isolés qui réagit plus facilement aux apports solaires. Les gains en valeur absolue sont sensiblement équivalents pour chacune des zones climatiques, seul l'écart relatif varie réellement.

Le tableau suivant donne les écarts sur les besoins de chauffage pour passer d'un SRI5 à un SRI115 ainsi que d'un SRI40 à un SRI115 :

Evolution des besoins de chauffage suivant deux niveaux de SRI – Climat contemporain			
SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	+0,9 kWh/m ² .an (+14%)	+0,7 kWh/m ² .an (+10%)	+0,7 kWh/m ² .an (+21%)
Existant	+8,8 kWh/m ² .an (+21%)	+6,7 kWh/m ² .an (+15%)	+6,9 kWh/m ² .an (+25%)
Existant (Toiture réhabilitée)	+2,1 kWh/m ² .an (+8%)	+1,5 kWh/m ² .an (+6%)	+1,6 kWh/m ² .an (+9%)
SRI 40 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	+0,6 kWh/m ² .an (+9%)	+0,5 kWh/m ² .an (+6%)	+0,4 kWh/m ² .an (+13%)
Existant	+6,1 kWh/m ² .an (+14%)	+4,6 kWh/m ² .an (+10%)	+4,8 kWh/m ² .an (+16%)
Existant (Toiture réhabilitée)	+1,4 kWh/m ² .an (+5%)	+1,0 kWh/m ² .an (+4%)	+1,1 kWh/m ² .an (+6%)

Pour la projection climatique 2050 :



Pour une projection climatique à horizon 2050, on note une augmentation des besoins de chauffage plus faible que celle constatée sur un climat actuel :

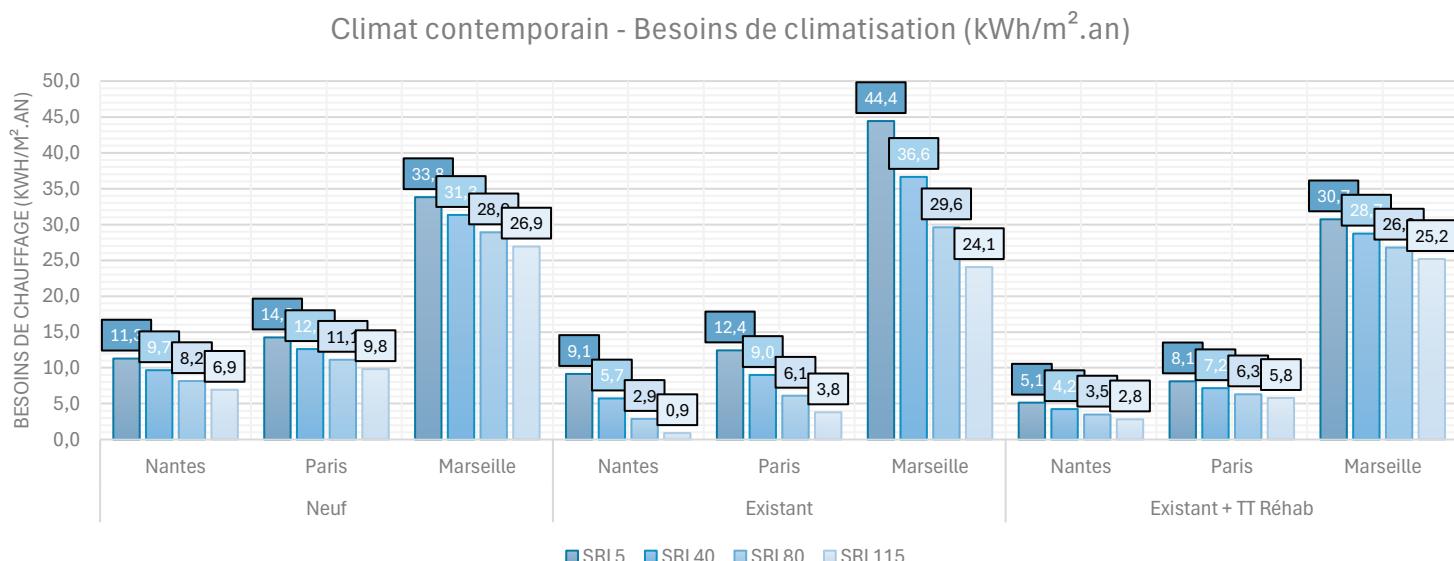
- Bâtiment neuf : +0,1 à +0,2 kWh/m² par palier de SRI
- Bâtiment existant : +2,3 à +2,5 kWh/m² par palier de SRI pour Nantes et +1,7 à +1,9 kWh/m² par palier de SRI pour Paris et Marseille

Le tableau suivant donne les écarts sur les besoins de chauffage pour passer d'un SRI5 à un SRI115 ainsi que d'un SRI40 à un SRI115 :

Evolution des besoins de chauffage suivant deux niveaux de SRI – Climat 2050 (RCP 8.5)			
SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	+0,6 kWh/m ² .an (+19%)	+0,6 kWh/m ² .an (+16%)	+0,5 kWh/m ² .an (+28%)
Existant	+7,2 kWh/m ² .an (+23%)	+5,5 kWh/m ² .an (+17%)	+5,5 kWh/m ² .an (+29%)
Existant (Toiture réhabilitée)	+1,5 kWh/m ² .an (+8%)	+1,2 kWh/m ² .an (+6%)	+1,3 kWh/m ² .an (12%)
SRI 40 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	+0,4 kWh/m ² .an (+12%)	+0,4 kWh/m ² .an (+10%)	+0,3 kWh/m ² .an (+17%)
Existant	+4,9 kWh/m ² .an (+15%)	+3,8 kWh/m ² .an (+11%)	+3,8 kWh/m ² .an (+18%)
Existant (Toiture réhabilitée)	+1,0 kWh/m ² .an (+5%)	+0,8 kWh/m ² .an (+4%)	+0,9 kWh/m ² .an (+7%)

5.2.2. Besoins de climatisation

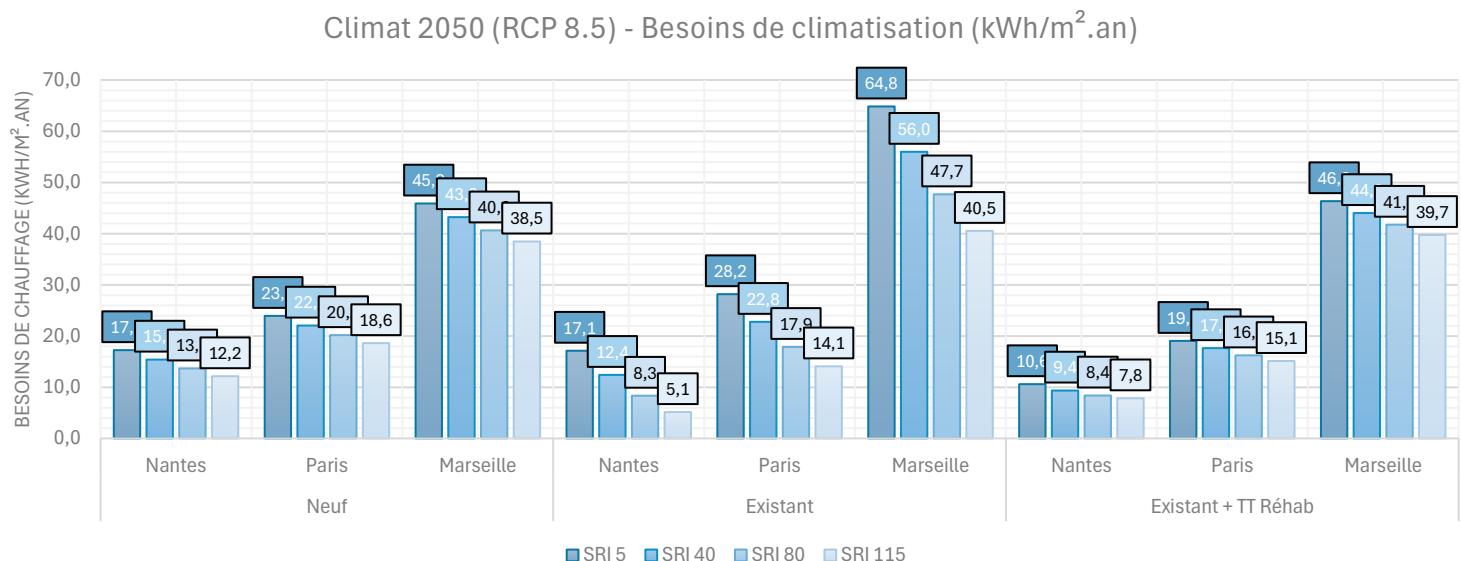
Les graphiques ci-dessous présentent les besoins de climatisation sur les trois stations météorologiques et les deux niveaux d'isolation suivant chacun des SRI étudiés :



Le tableau suivant donne les écarts sur les besoins de climatisation pour passer d'un SRI5 à un SRI115 ainsi que d'un SRI40 à un SRI115 :

Evolution des besoins de climatisation suivant deux niveaux de SRI – Climat contemporain			
SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-4,4 kWh/m ² .an (-39%)	-4,4 kWh/m ² .an (-31%)	-6,9 kWh/m ² .an (-20%)
Existant	-8,3 kWh/m ² .an (-90%)	-8,6 kWh/m ² .an (-69%)	-20,4 kWh/m ² .an (-46%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-2,3 kWh/m ² .an (-45%)	-2,3 kWh/m ² .an (-29%)	-5,5 kWh/m ² .an (-18%)
SRI 40 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-2,7 kWh/m ² .an (-28%)	-2,8 kWh/m ² .an (-22%)	-4,4 kWh/m ² .an (-14%)
Existant	-4,8 kWh/m ² .an (-84%)	-5,2 kWh/m ² .an (-58%)	-12,6 kWh/m ² .an (-34%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-1,4 kWh/m ² .an (-34%)	-1,4 kWh/m ² .an (-19%)	-3,5 kWh/m ² .an (-12%)

Pour la projection climatique 2050 :

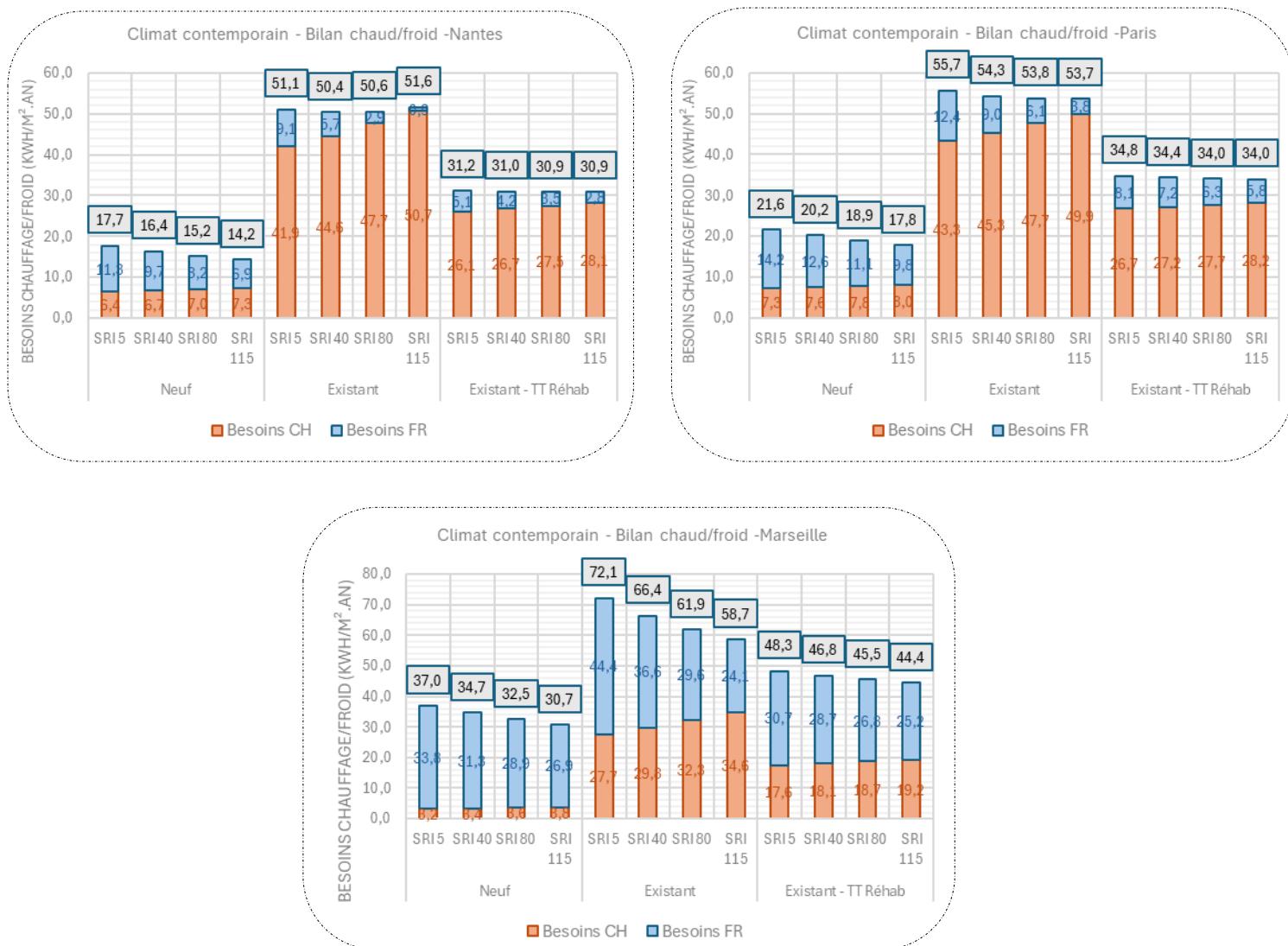


Le tableau suivant donne les écarts sur les besoins de climatisation pour passer d'un SRI5 à un SRI115 ainsi que d'un SRI40 à un SRI115 :

Evolution des besoins de climatisation suivant deux niveaux de SRI – Climat 2050 (RCP 8.5)			
SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-5,1 kWh/m ² .an (-30%)	-5,3 kWh/m ² .an (-22%)	-7,4 kWh/m ² .an (-16%)
Existant	-12,0 kWh/m ² .an (-70%)	-14,1 kWh/m ² .an (-50%)	-24,3 kWh/m ² .an (-15,4%)
Existant (TT Réhab)	-2,8 kWh/m ² .an (-26%)	-3,9 kWh/m ² .an (-21%)	-6,6 kWh/m ² .an (-14%)
SRI 40 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-3,2 kWh/m ² .an (-21%)	-3,4 kWh/m ² .an (-16%)	-4,8 kWh/m ² .an (-11%)
Existant	-7,3 kWh/m ² .an (-59%)	-8,7 kWh/m ² .an (-38%)	-15,4 kWh/m ² .an (-28%)
Existant (TT Réhab)	-1,5 kWh/m ² .an (-16%)	-2,5 kWh/m ² .an (-14%)	-4,3 kWh/m ² .an (-10%)

5.2.3. Bilan chauffage/climatisation

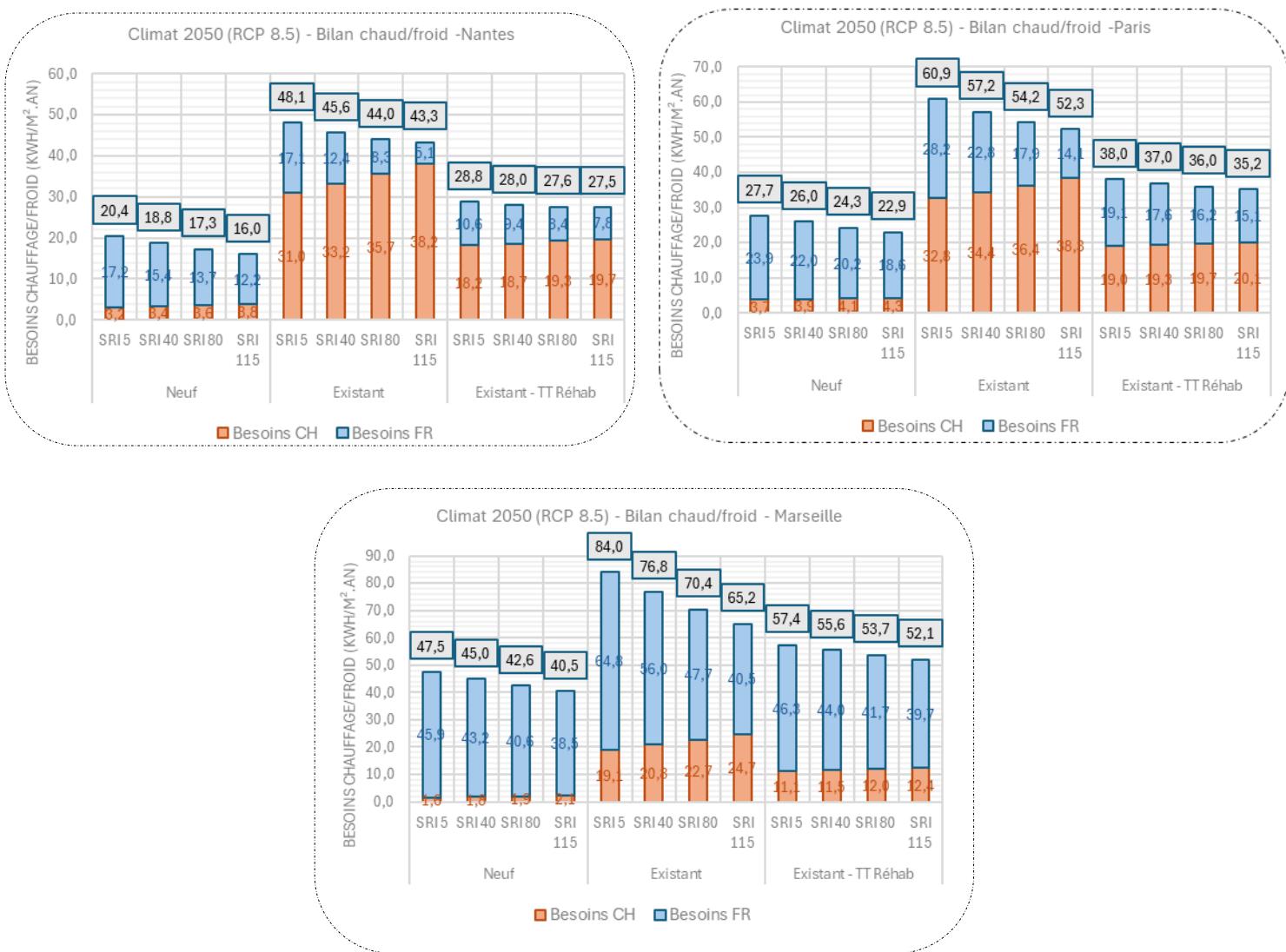
Les graphiques suivants présentent les bilans des besoins de chauffage et de refroidissement suivant la performance thermique du bâtiment (Neuf, Existant, Existant + toiture isolée) et les revêtements appliqués :



Evolution du bilan chauffage/climatisation – Bâtiment commercial – Climat contemporain			
SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-3,5 kWh/m ² .an (-20%)	-3,7 kWh/m ² .an (-17%)	-6,2 kWh/m ² .an (-17%)
Existant	+0,6 kWh/m ² .an (+1%)	-2,0 kWh/m ² .an (-12%)	-13,5 kWh/m ² .an (-19%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-0,3 kWh/m ² .an (-1%)	-0,8 kWh/m ² .an (-2%)	-3,9 kWh/m ² .an (-8%)

Pour un climat contemporain, on note que pour une majorité des configurations, le remplacement d'un revêtement sombre en toiture par un procédé réflectif est positif sur le bilan chauffage/refroidissement pour le bâtiment commercial étudié. Pour un bâtiment peu isolé à Nantes où les besoins de climatisation sont moins importants, le bilan est légèrement en défaveur du procédé réflectif.

Les graphiques ci-dessous sont ceux pour le climat 2050 (RCP 8.5) :



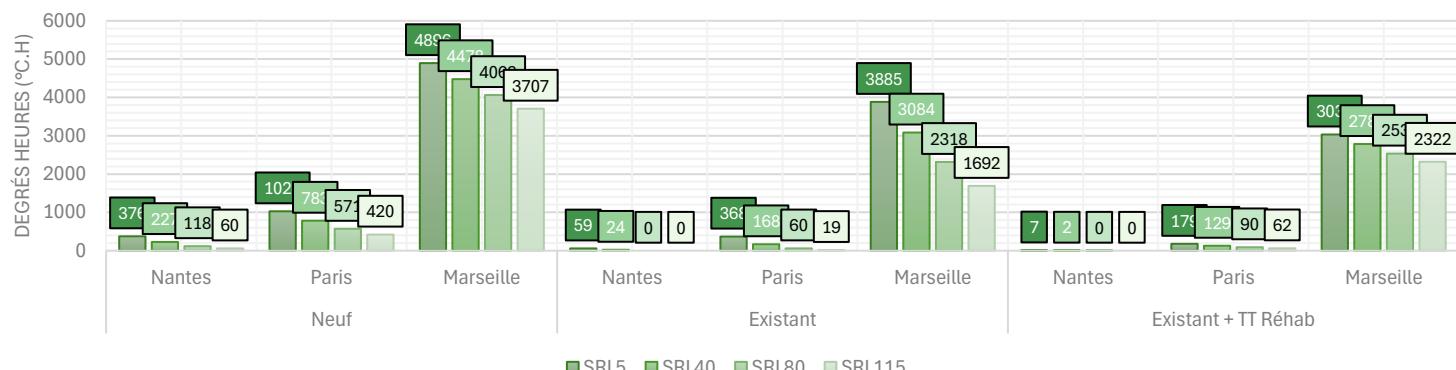
Evolution du bilan chauffage/climatisation – Bâtiment commercial – Climat 2050 (RCP 8.5)			
SRI 5 → SRI 115		Nantes	Paris
Neuf	Existant	Besoins CH	Besoins FR
-4,5 kWh/m ² .an (-22%)	-4,8 kWh/m ² .an (-10%)	-4,7 kWh/m ² .an (-17%)	-7,0 kWh/m ² .an (-15%)
-1,2 kWh/m ² .an (-4%)		-8,6 kWh/m ² .an (-14%)	-18,8 kWh/m ² .an (-22%)
		-2,8 kWh/m ² .an (-7%)	-5,3 kWh/m ² .an (-9%)

Pour une projection climatique à horizon 2050, le constat réalisé précédemment est accentué avec des gains globaux sur l'année encore plus conséquents.

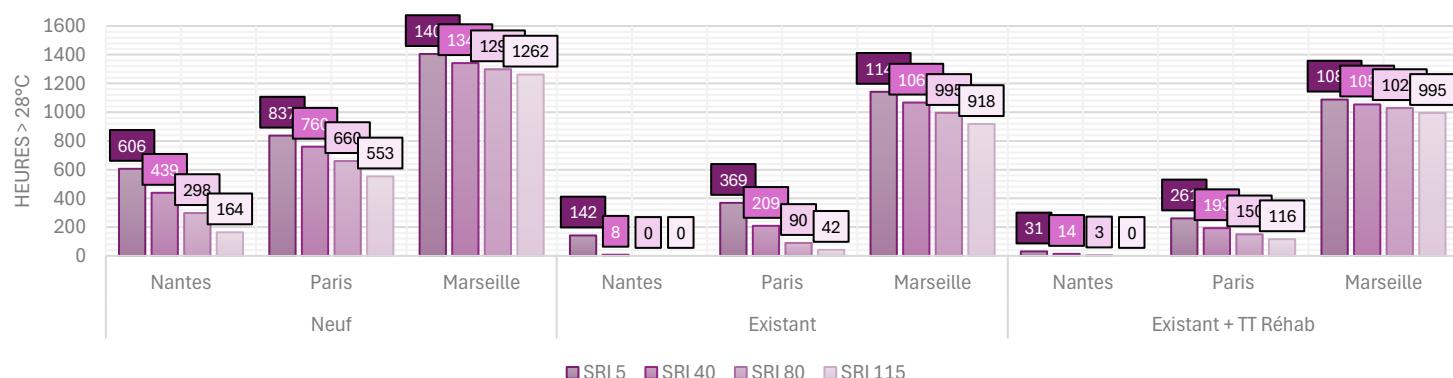
5.2.4. Confort d'été

Les graphiques ci-dessous présentent les niveaux et évolutions des indicateurs de confort d'été (Degrés-Heures et nombre d'heures supérieures à 28°C) :

Climat contemporain - Degrés Heures (°C.h)



Climat contemporain - Heures > 28°C

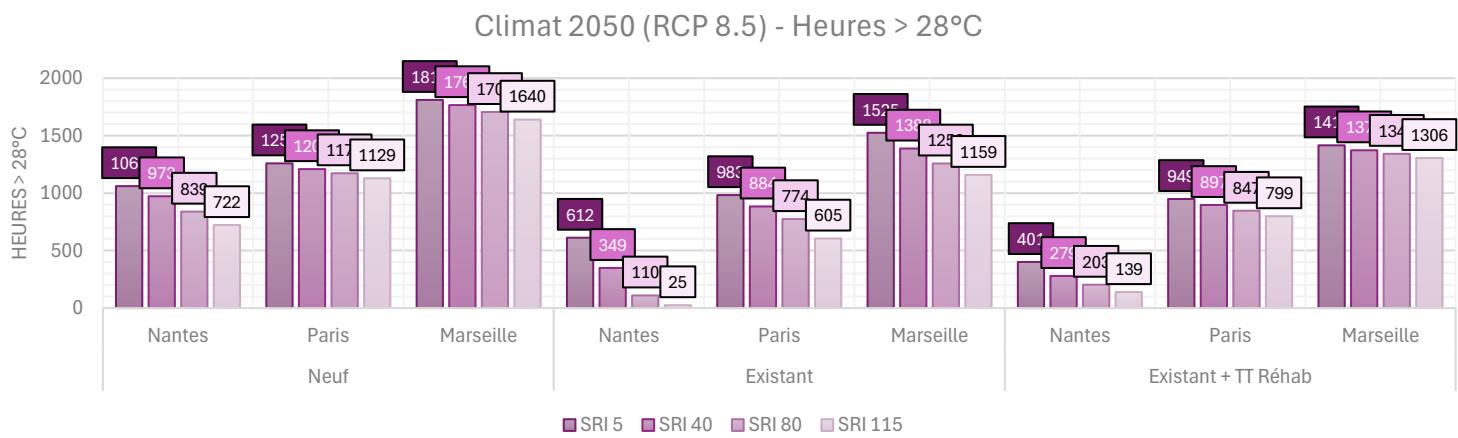
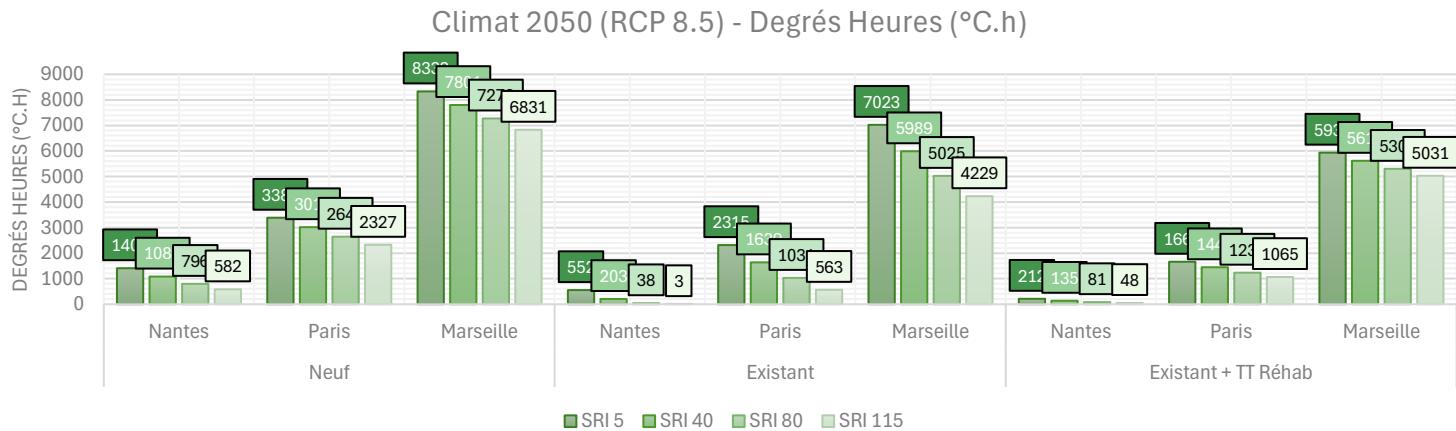
Evolution des indicateurs de confort suivant deux niveaux de SRI
– Climat contemporain

	Degrés-Heures (°C.h)			Nombre d'heures > 28°C		
	Nantes	Paris	Marseille	Nantes	Paris	Marseille
SRI 5 → SRI 115						
Neuf	-316 °C.h (-84%)	-608 °C.h (-59%)	-1189 °C.h (-24%)	-442h (-73%)	-284h (-34%)	-143h (-10%)
Existant	-59 °C.h (-100%)	-349 °C.h (-95%)	-2193 °C.h (-56%)	-142h (-100%)	-327h (-89%)	-224h (-20%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-7 °C.h (-100%)	-118 °C.h (-66%)	-711 °C.h (-23%)	-31h (-100%)	-145h (-56%)	-93h (-9%)
SRI 40 → SRI 115						
Neuf	-167 °C.h (-74%)	-363 °C.h (-46%)	-771 °C.h (-17%)	-275h (-63%)	-207h (-27%)	-80h (-6%)
Existant	-24 °C.h (-100%)	-149 °C.h (-89%)	-1392 °C.h (-45%)	-8h (-100%)	-167h (-80%)	-149h (-14%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-2 °C.h (-100%)	-68 °C.h (-52%)	-463 °C.h (-17%)	-14h (-100%)	-77h (-40%)	-59h (-6%)

Le gain annoncé est limité par les faibles durées d'inconfort du projet de référence → couverture totale des temps d'inconfort (100%)

- L'impact de la toiture réflective est plus significatif pour les bâtiments existants,
- Plus les conditions de températures extérieures sont élevées (ex : Marseille), moins le gain en relatif est important.

Pour la projection climatique 2050 :

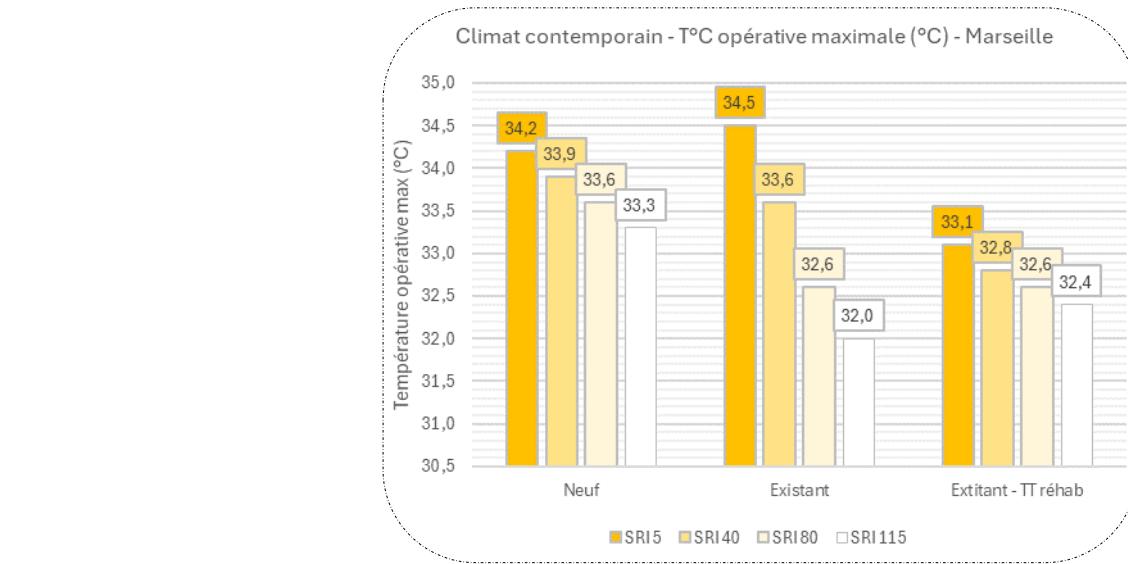
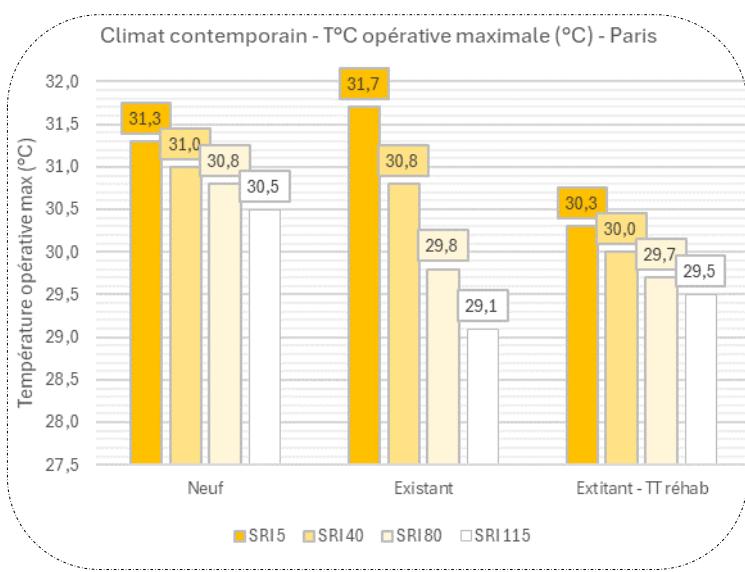
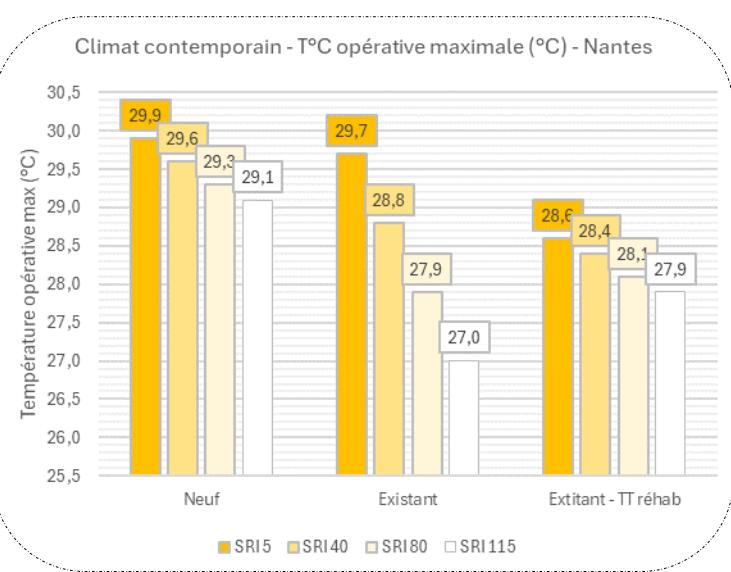


Evolution des indicateurs de confort suivant deux niveaux de SRI – Climat 2050 (RCP 8.5)						
	Degrés-Heures (°C.h)			Nombre d'heures > 28°C		
	Nantes	Paris	Marseille	Nantes	Paris	Marseille
SRI 5 → SRI 115						
Neuf	-827 °C.h (-59%)	-1059 °C.h (-31%)	-1501 °C.h (-18%)	-339h (-32%)	-130h (-10%)	-171h (-9%)
Existant	-549 °C.h (-99%)	-1752 °C.h (-76%)	-2794 °C.h (-40%)	-587h (-96%)	-378h (-38%)	-366h (-24%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-164 °C.h (-78%)	-598 °C.h (-36%)	-903 °C.h (-15%)	-262h (-65%)	-150h (-16%)	-110h (-8%)
SRI 40 → SRI 115						
Neuf	-500 °C.h (-46%)	-690 °C.h (-23%)	-970 °C.h (-12%)	-251h (-26%)	-80h (-7%)	-126h (-7%)
Existant	-200 °C.h (-98%)	-1076 °C.h (-66%)	-1760 °C.h (-29%)	-324h (-93%)	-279h (-32%)	-229h (-16%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-88°C.h (-65%)	-382 °C.h (-26%)	-585 °C.h (-10%)	-140h (-50%)	-98h (-11%)	-67h (-5%)

Le gain annoncé est limité par les faibles durées d'inconfort du projet de référence → couverture totale des temps d'inconfort (100%)

- L'impact de la toiture réflective est plus significatif pour les bâtiments existants,
- Plus les conditions de températures extérieures sont élevées (ex : Marseille), moins le gain en relatif est important. Le constat va dans le même sens entre un climat contemporain et une projection 2050, le gain en relatif est moins élevé pour ce dernier du fait d'un impact plus conséquent de l'élévation des températures extérieures.

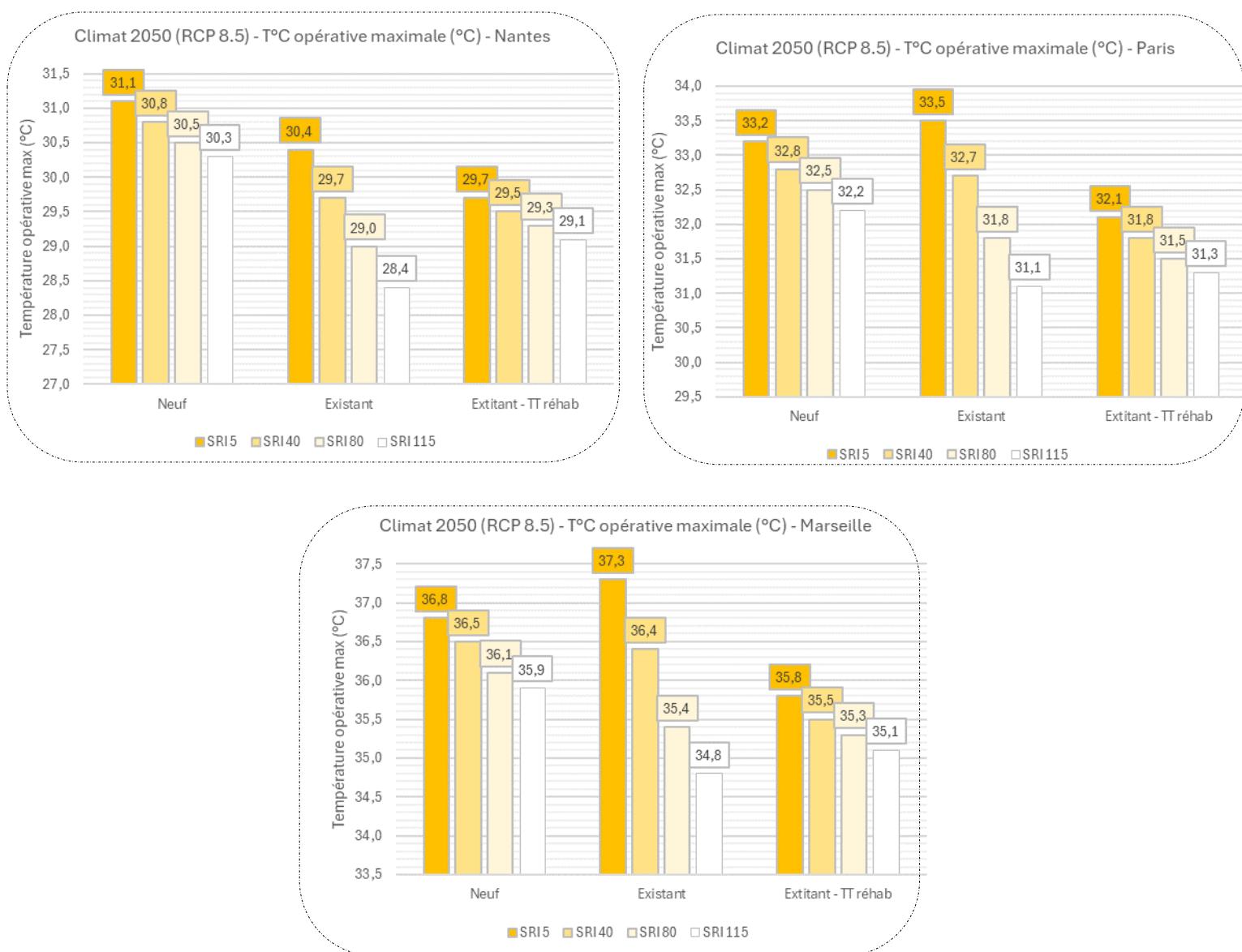
Les graphiques ci-dessous présentent les évolutions des températures opératives maximales :



Evolutions des températures opératives maximales – Climat contemporain			
SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-0,8 °C	-0,8 °C	-0,9 °C
Existant	-2,7 °C	-2,6 °C	-2,5 °C
Existant (Toiture réhabilitée)	- 0,7 °C	- 0,8 °C	- 0,7 °C

Pour le bâtiment commercial étudié, lorsque la toiture est isolée, l'application d'un procédé réflectif permet de réduire jusqu'à 1°C la température opérative maximale dans le bâtiment et jusqu'à 3°C pour le cas d'une toiture non isolée.

Pour la projection climatique 2050 :



Evolutions des températures opératives maximales – Climat 2050 (RCP 8.5)

SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-0,8 °C	-1,0 °C	-0,9 °C
Existant	-2,0 °C	-2,4 °C	-2,5 °C
Existant (Toiture réhabilitée)	- 0,6 °C	- 0,8 °C	- 0,7 °C

Le constat est sensiblement équivalent à celui effectué pour le climat contemporain :

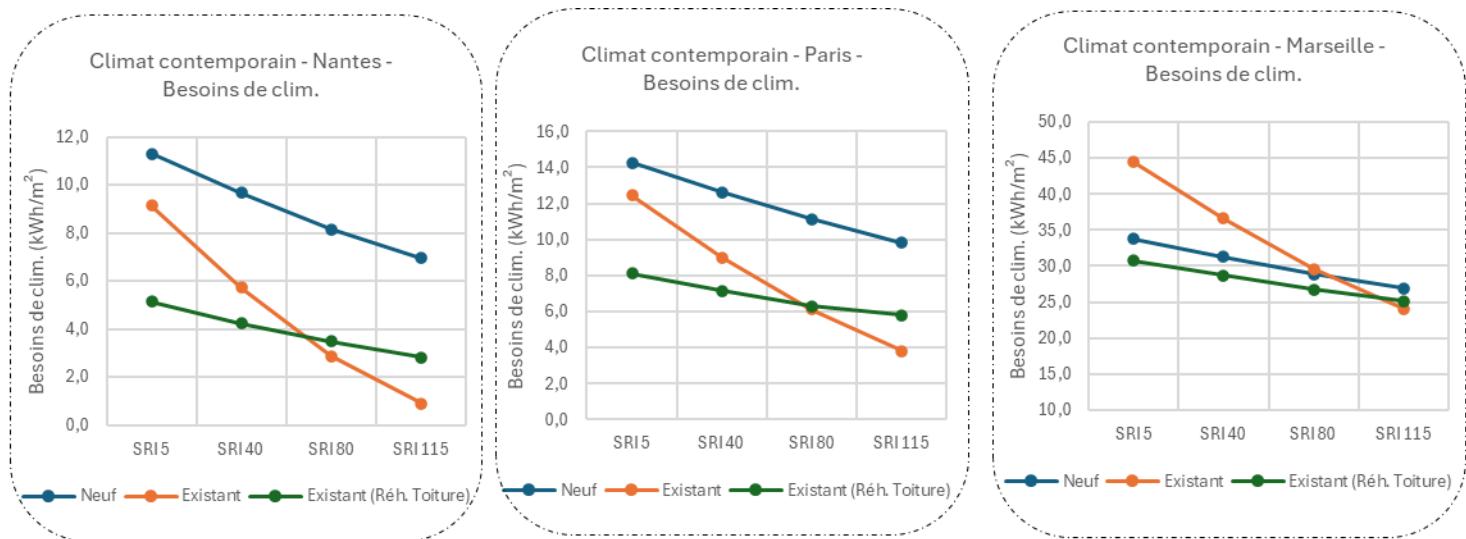
- Toiture isolée : réduction de 1°C de la température opérative maximale avec un procédé réflectif
- Toiture non isolée : réduction de 2,0 °C à 2,5°C de la température opérative maximale avec un procédé réflectif

5.3. Cas particuliers

5.3.1. Impact de l'isolation de la toiture

Les graphiques ci-dessous présentent l'évolution des besoins de climatisation suivant trois niveaux de performances thermiques du bâtiment pour un climat contemporain :

- Bâtiment neuf (prestations RE2020)
- Bâtiment existant
- Bâtiment existant avec toiture réhabilitée (20cm LdR)

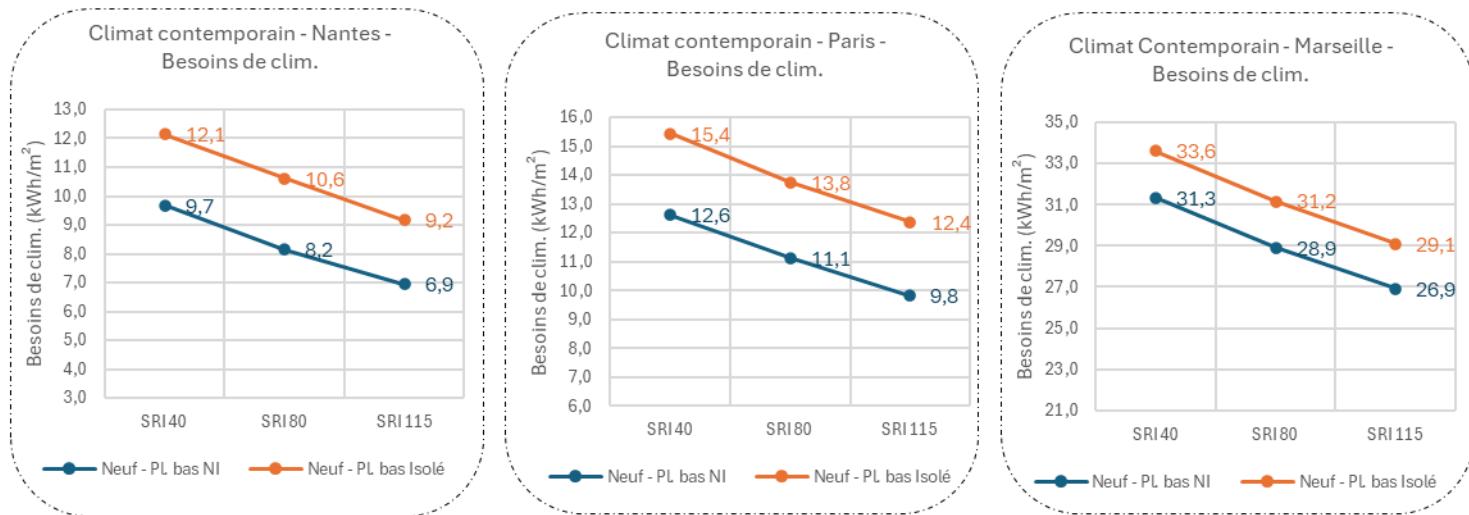


- Un **bâtiment existant dont la toiture a été isolée** présente des besoins de climatisation plus faibles pour des couvertures plus sombres. Pour ces configurations la résistance thermique en toiture atténue les variations du flux thermique. Une faible isolation du reste de l'enveloppe et une plus importante perméabilité à l'air vis-à-vis d'une **construction neuve** expliquent également des besoins plus faibles. La tendance s'inverse avec une élévation du SRI. Plus la réflectivité de la toiture est importante, moins la résistance thermique n'a d'influence sur les variations du flux thermique en toiture.
- L'impact d'une toiture « cool roof » est plus important pour le cas d'une toiture faiblement isolée (cf courbes orange)
- L'isolation thermique de la toiture est contre-productive pour le rafraîchissement lorsqu'on a recours à une toiture fortement réflective. La résistance thermique de la toiture réduit la possibilité d'évacuer la chaleur par la toiture.

5.3.2. Impact de l'isolation du plancher bas

Dans cette partie, nous avons regardé l'impact de l'isolation du plancher bas sur les indicateurs de besoins de climatisation et de confort d'été. Pour le cas de référence, le plancher bas en contact avec le terre-plein n'est pas isolé. Le bâtiment bénéficie alors de l'inertie du sol impactant significativement le rafraîchissement passif.

Pour cette configuration, nous avons intégré une isolation thermique de 8cm de polyuréthane ($R_{isolant} = 3,6 \text{ W/m}^2.\text{K}$) sous la dalle béton du plancher bas. Les simulations ont uniquement été modélisées sur une projection climatique 2050.



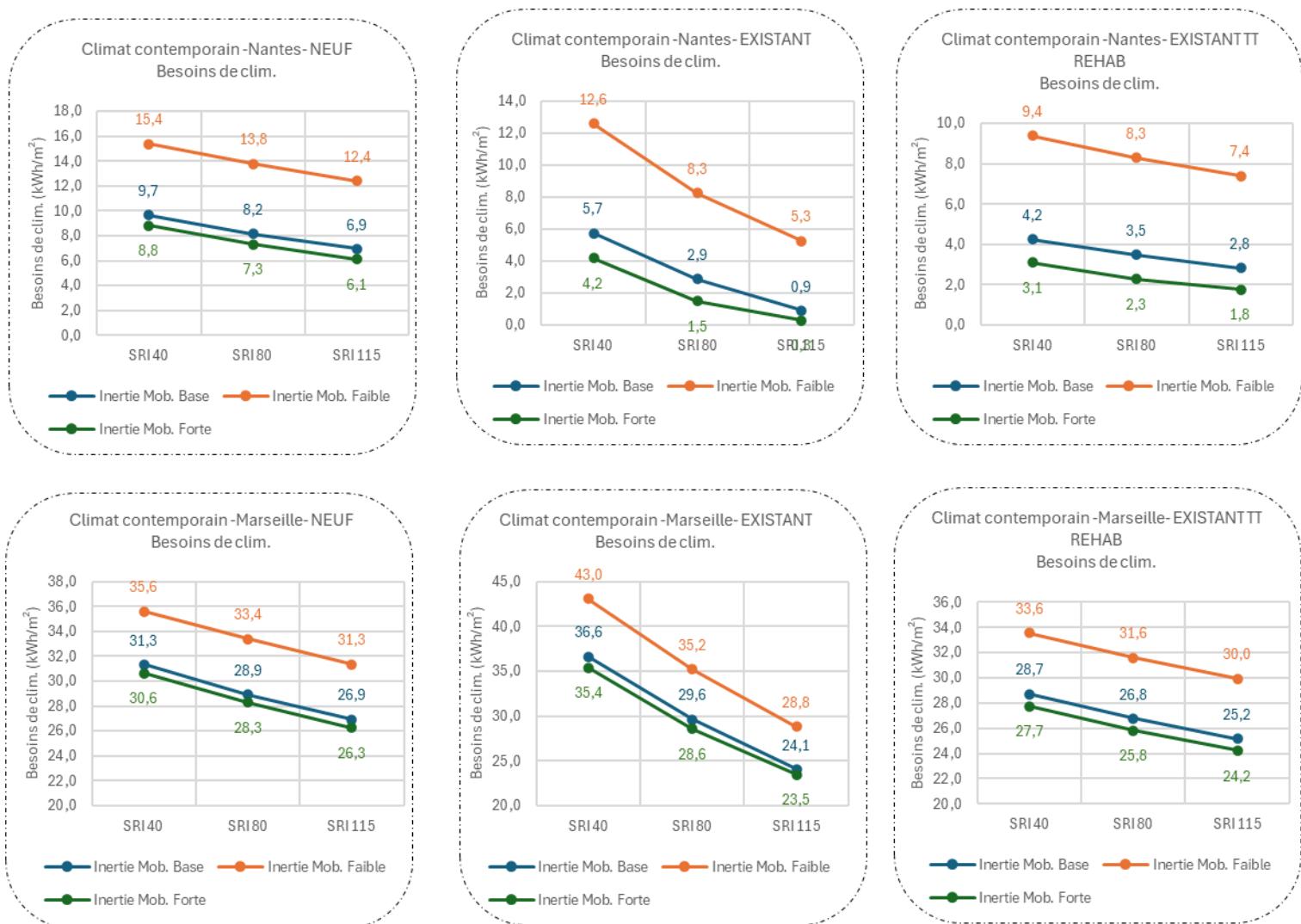
- **Isoler thermiquement le plancher bas** va couper le bénéfice de l'inertie du sol et donc augmenter les besoins de climatisation du bâtiment. On note une augmentation moyenne de l'ordre de 2,5 kWh/m² pour l'ensemble des stations météos.
- En moyenne l'impact de réflectivité de la toiture en valeur absolue est sensiblement équivalent entre le cas d'un plancher bas **non isolé** et **isolé**.

5.3.3. Impact de l'inertie du mobilier (rayonnage)

Nous avons regardé l'impact de l'inertie du mobilier en testant deux variantes avec une inertie de mobilier plutôt faible (10 Wh/K/m²) et une inertie deux fois supérieures à celles considérées initialement (400Wh/K/m²) :

	Inertie mobilier
Base	200 Wh/K/m ²
Variante 1 (Inertie faible)	10 Wh/Km²
Variante 2 (Inertie forte)	400 Wh/Km²

Les graphiques ci-dessous présentent les évolutions des besoins de froid pour Nantes et Marseille (climat contemporain) suivant les 3 classes d'inerties de mobilier, les 3 niveaux d'isolation et les 3 procédés réflectifs



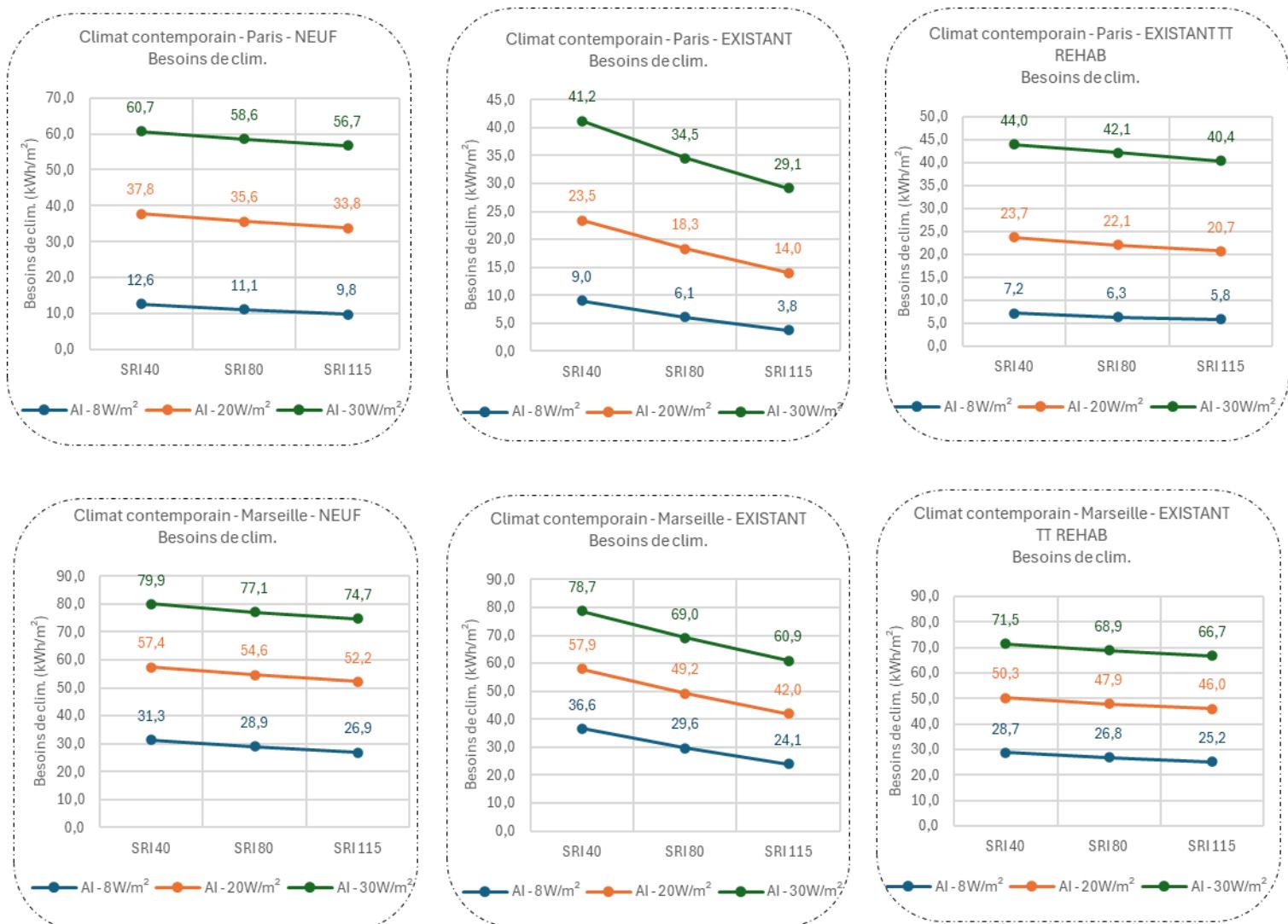
Dans l'ensemble, on note que l'inertie du mobilier va avoir un rôle sur la valeur initiale des besoins de climatisation (plus l'inertie du mobilier est élevée, moins il y a de besoins de climatisation) mais l'impact du procédé réflectif va être sensiblement équivalent.

5.3.4. Impact des apports internes

Nous avons regardé l'impact des apports internes liés aux équipements en testant deux variantes par rapport à la saisie initiale :

	Apports internes
Base	8 W/m ²
Variante 1	20 W/m²
Variante 2	30 W/m²

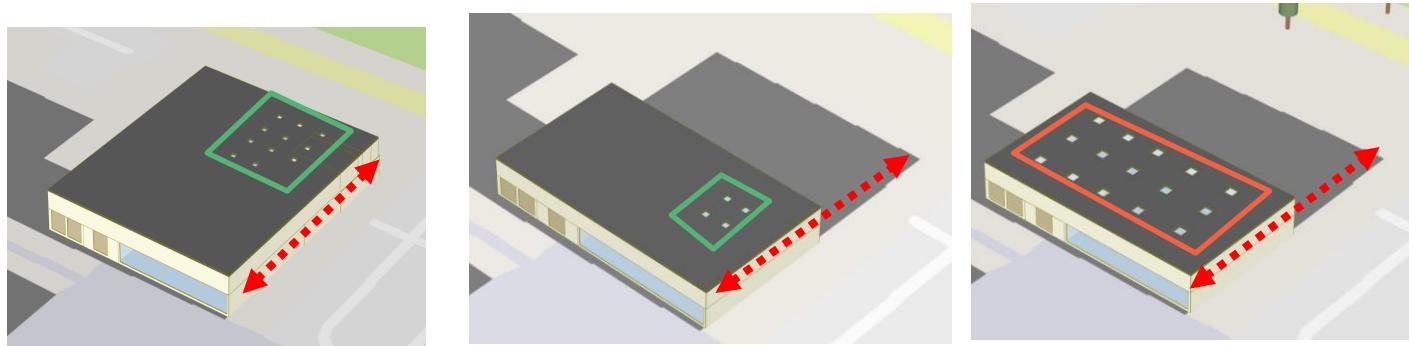
Les graphiques ci-dessous présentent les évolutions des besoins de froid pour Paris et Marseille (climat contemporain) suivant les 3 niveaux d'apports internes, les 3 niveaux d'isolation et les 3 procédés réflectifs :



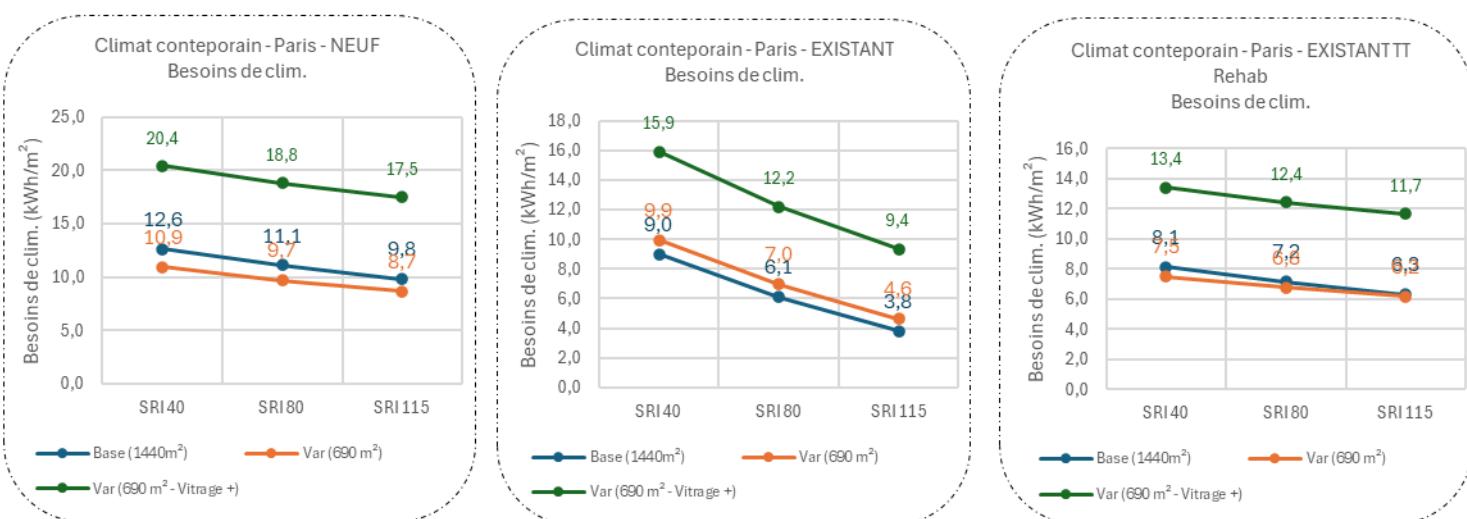
Dans l'ensemble, les apports internes influent sur le niveau de référence mais l'impact des procédés réflectifs est sensiblement similaire dans chacune des situations.

5.3.5. Impact de la surface du bâtiment

Nous avons également agrandi le bâtiment de référence d'une surface 4 fois supérieure pour vérifier si les ordres de grandeurs évalués précédemment étaient équivalents.



	Référence	Variante 1	Variante 2
Surface au sol de l'espace de vente	1440 m ²	690 m ²	690 m ²
Surface totale toiture	9 m ² (0,6% de la surface de l'espace de vente)	4 m ² (0,6% de la surface de l'espace de vente)	34 m ² (5% de la surface de l'espace de vente)
Part de la toiture sur les surfaces déperditives	39%	35%	35%

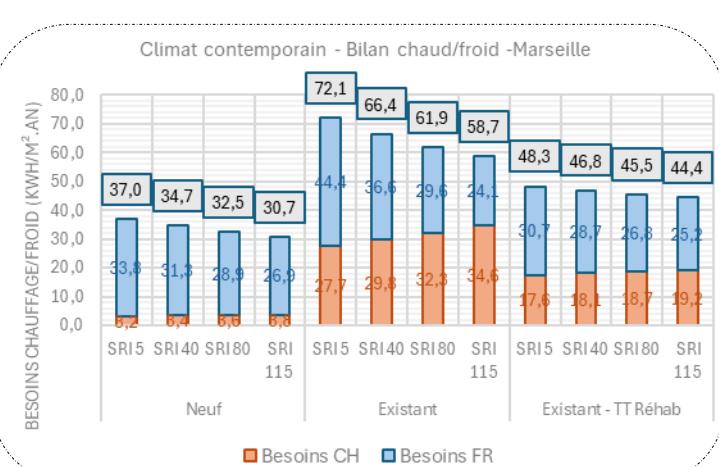
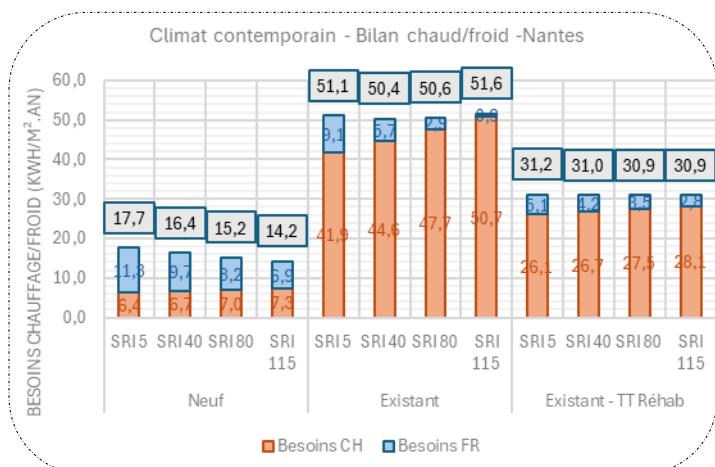


Les évolutions sont similaires pour les deux surfaces, seul le point de référence varie. Il n'apparaît pas pertinent de reprendre l'ensemble des simulations pour un second bâtiment.

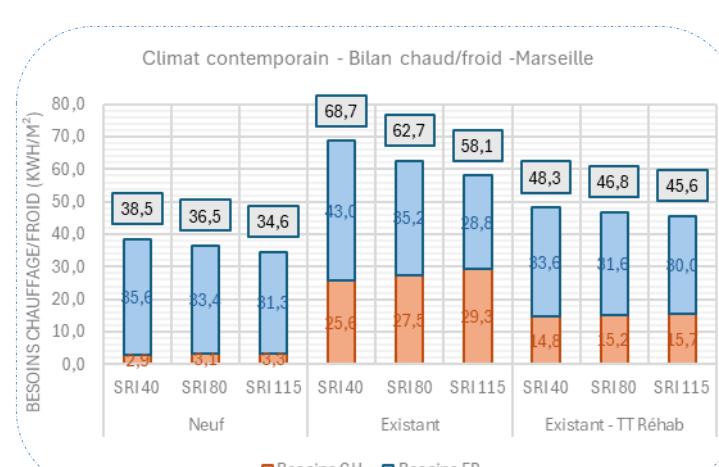
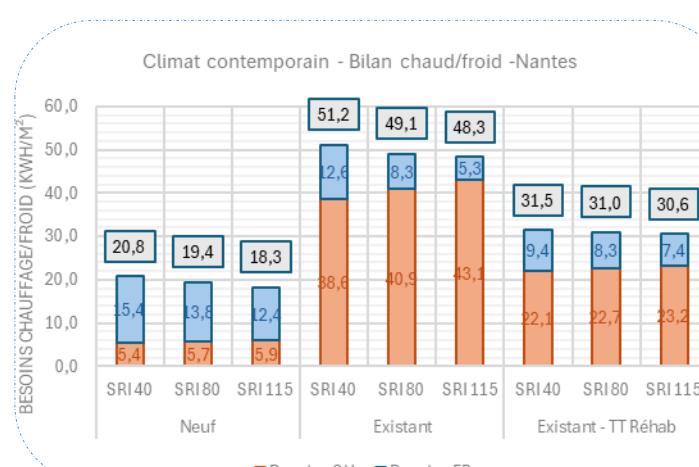
Les graphiques ci-dessous ont pour objectif de visualiser différentes évolutions du bilan thermique chaud/froid suivant diverses modifications des hypothèses initiales (inertie du mobilier, apports internes, surface, ...).

On note pour ces cas particuliers que plus la part des besoins de refroidissement est importante vis-à-vis des besoins de chauffage, plus le choix d'un revêtement réflectif va être significatif (exemple avec une faible inertie du mobilier ou des apports internes plus élevés).

Cas de référence



Inertie mobilier faible



Apports internes (20W/m²)

Climat contemporain - Bilan chaud/froid -Nantes



Climat contemporain - Bilan chaud/froid -Marseille



Surface commerce : 690 m²

Faible proportion de lanterneaux

Climat contemporain - Bilan chaud/froid -Nantes



Forte proportion de lanterneaux

Climat contemporain - Bilan chaud/froid -Marseille



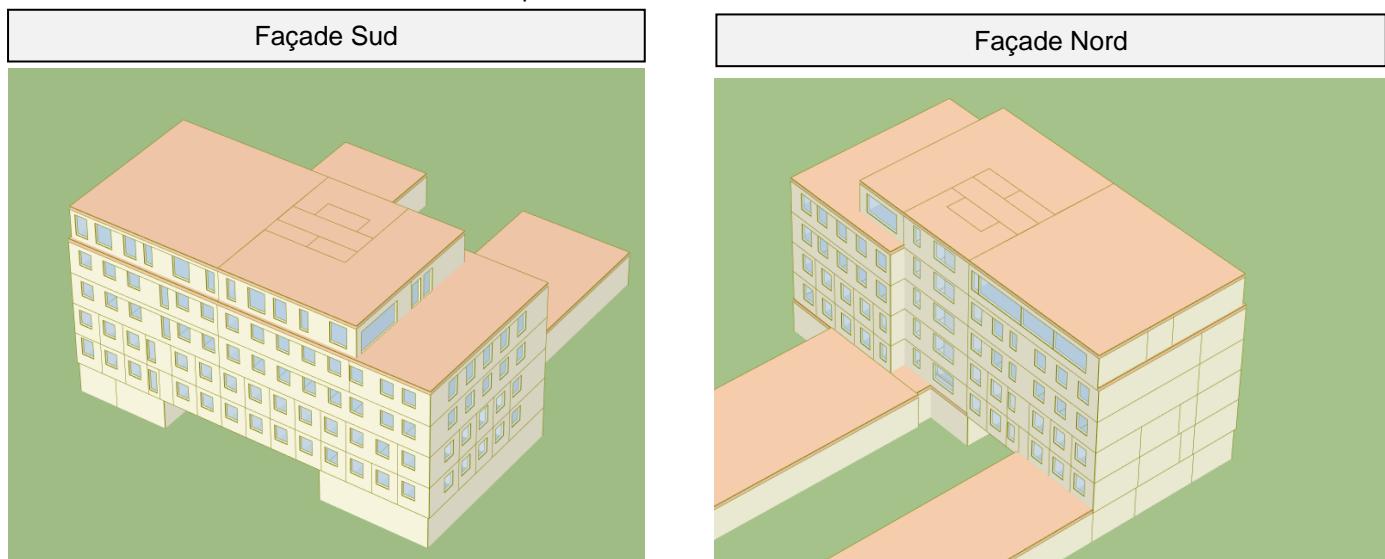
6. Bâtiment de bureaux

6.1. Bâtiment retenu

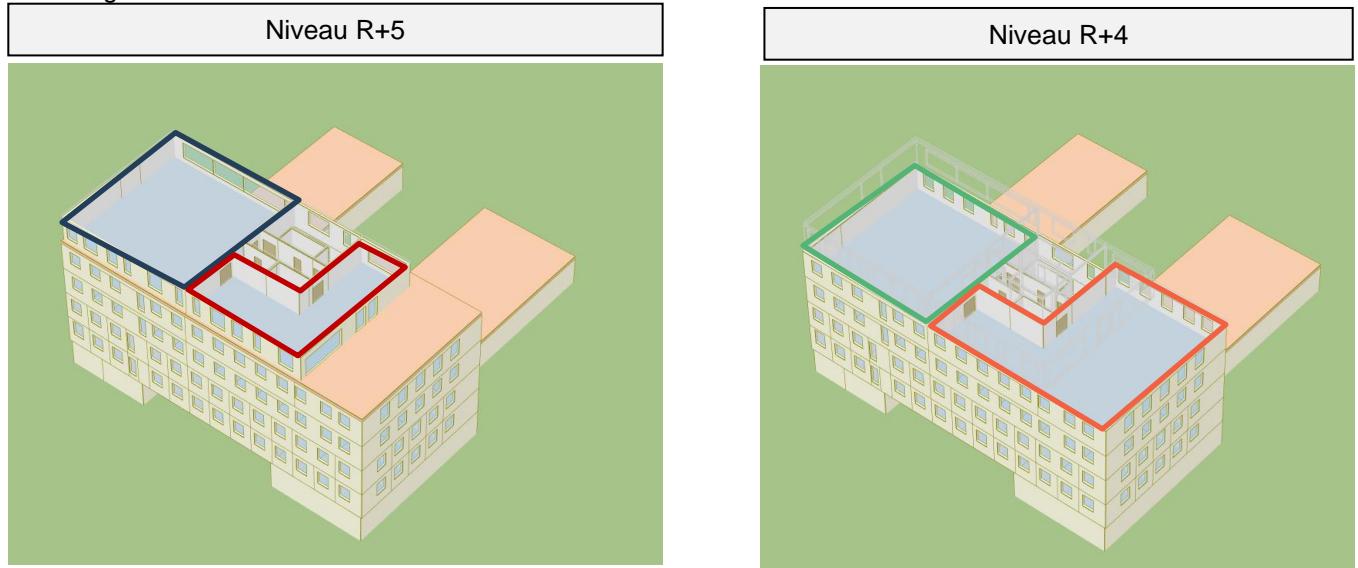
Immeuble de bureaux	
Surface utile	2940 m ²
Nombre de niveau	R+5
Surface vitrée	400 m ²

6.1.1. Modélisation du bâtiment

Ci-dessous la modélisation 3D du bâtiment présentée suivant différentes orientations



Le zonage est défini comme suit :



Open Space – R+5- Ouest
 Open Space – R+5- Est

Open Space – R+4- Ouest
 Open Space – R+4- Est

6.1.2. Prestations thermiques

	Neuf	Existant
Murs sur extérieur	Béton + isolation par l'intérieur (14cm – $\lambda=0,03$ – $R=5\text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$)	Béton + isolation par l'intérieur (6cm – $\lambda=0,03$ – $R=2\text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$)
Plancher sur locaux non chauffés	12 cm de flocage sous dalle ($R\geq3,0\text{ m}^2/\text{K}/\text{W}$)	
Toitures terrasses inaccessibles	Dalle béton + 18 cm TH22 ($R=8,2\text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$)	Dalle béton + 6 cm TH22 ($R=2,7\text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$)
Toitures terrasses accessibles	Dalle béton + 10 cm TH22 ($R=4,5\text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$)	Dalle béton + 6 cm TH22 ($R=2,7\text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$)
Menuiseries	Double vitrage – $U_w=1,4\text{ W/K/m}^2$ Stores intérieurs	Double vitrage – $U_w=2,6\text{ W/K/m}^2$ Stores intérieurs
Ponts thermiques plancher intermédiaire	Traitement des ponts thermiques à 55% ($\psi=0,25$)	Pas de traitement des ponts thermiques
Perméabilité à l'air	1,0 $\text{m}^3/\text{h}.\text{m}^2$	1,7 $\text{m}^3/\text{h}.\text{m}^2$

6.1.3. Consignes de températures

Les besoins de chauffage et de refroidissement sont calculés pour maintenir les consignes de température suivantes :

Consignes de températures		
	Zone	Industrie
Chauffage	<i>Occupation</i>	19°C
	<i>Inoccupation (≤ 48 heures)</i>	16°C
	<i>Absence prolongée (>48 heures)</i>	7°C
Refroidissement	<i>Occupation</i>	26°C
	<i>Inoccupation (≤ 48 heures)</i>	30°C
	<i>Absence prolongée (>48 heures)</i>	-

6.1.4. Scénario d'occupation annuel

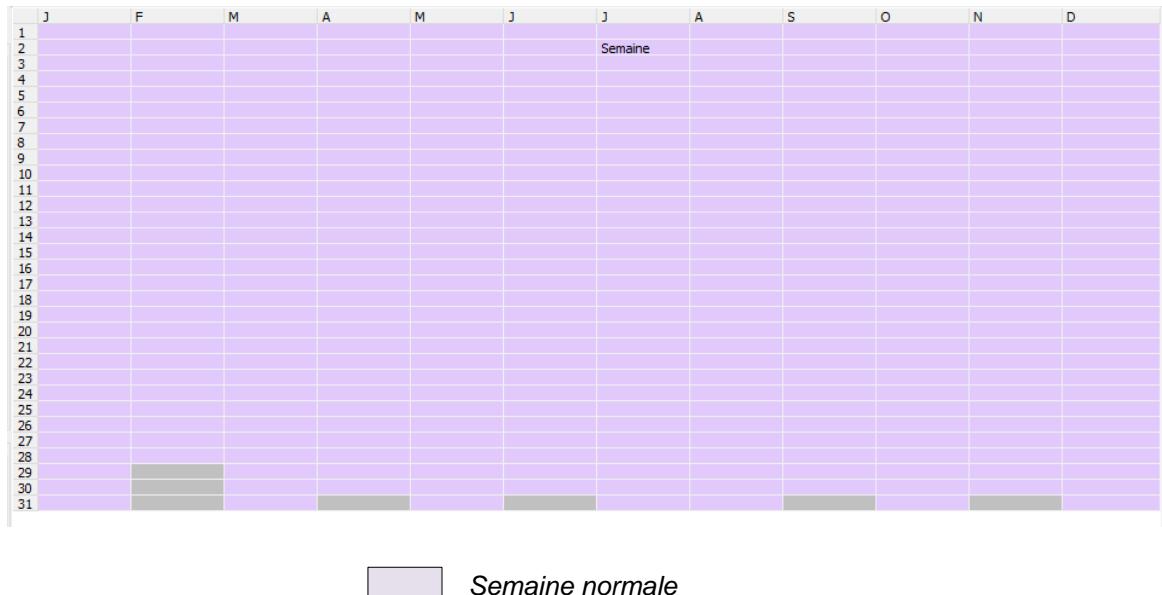
- Taux d'occupation

Taux d'occupation maximal	
Bureaux	0,10 occ. /m ² (RE2020)

- Scénario annuel

Occupation hebdomadaire :

- *Bureaux → lundi au vendredi : 8h-18h*



 Semaine normale

6.1.5. Apports internes

- Eclairage

Eclairage	
Zone	Bureaux
Puissance installée	8 W/m ²
Niveau d'éclairement mini (0,90 m)	300 lux
Gestion	Interrupteur manuel marche/arrêt
Gradation	Gestion manuelle avec lumière du jour

- Divers équipements

Les apports internes liés aux équipements (bureautique, équipements industriels, ...) peuvent représenter une part importante et sur un usage industriel, ceux-ci peuvent être très variables d'un projet à un autre.

En première approche, nous nous sommes référés aux hypothèses considérées dans la RE2020 :

Apports internes (hypothèses RE2020)	
Zone	Bureaux
Occupation	16 W/m ²
Inoccupation	1,6 W/m ²

6.1.6. Inertie thermique

En première approche, avons considéré l'inertie suivante :

	Inertie mobilier
Bureaux	1 Wh/K/m ³

6.2. Résultats

Les tableaux suivants présentent les résultats initiaux pour les deux niveaux de prestations thermiques (neuf et existant) ainsi que pour les 6 fichiers météorologiques étudiés :

- **Bâtiment neuf – SRI 5 – Climat contemporain**

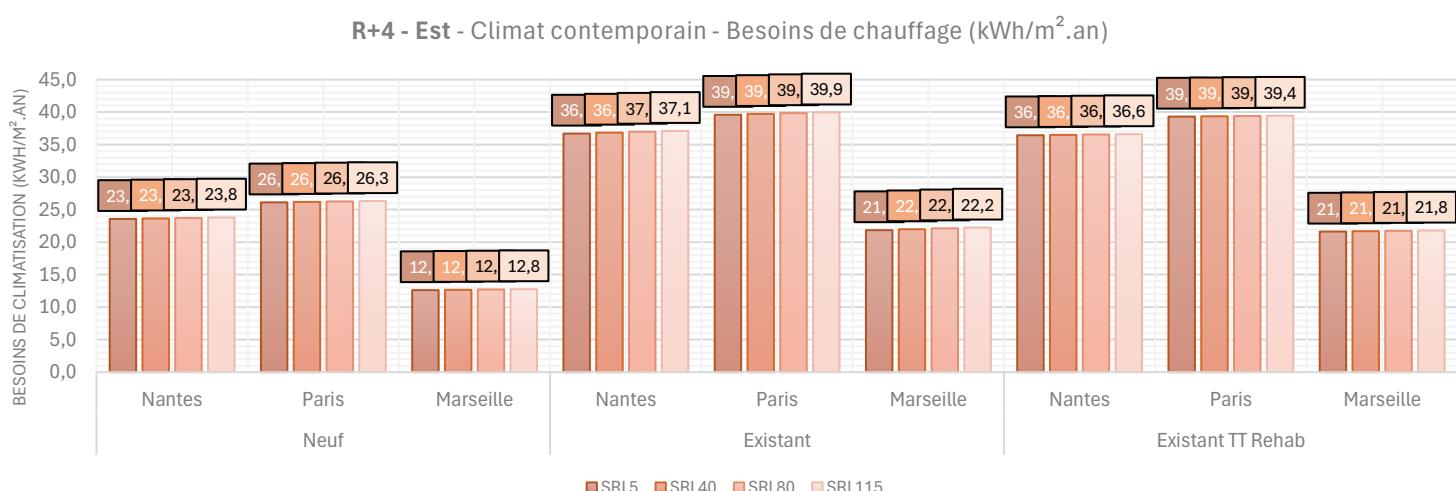
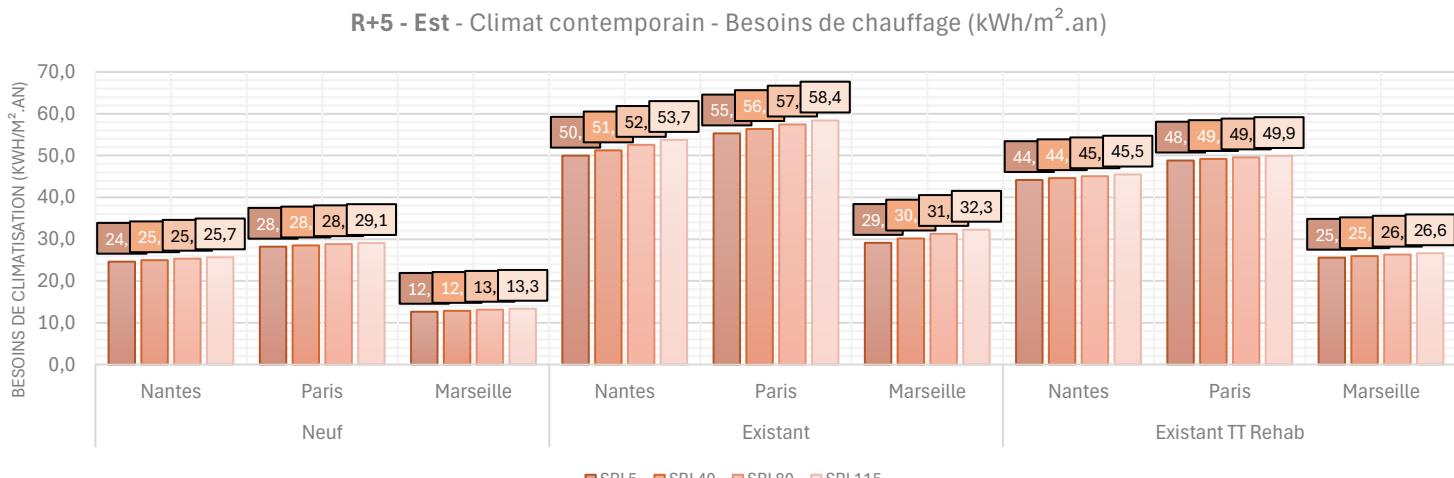
Prestations thermiques : Neuf Climat : contemporain Procédé réflectif : SRI 5		Besoins de chauffage (kWh/m ² .an)	Besoins de refroidissement (kWh/m ² .an)	Degrés-Heures (°C.h)	Heures >28°C (occupation)	T°C max
Nantes	R+5 – Ouest	18,9	1,2	9	10	29,4
	R+5 - Est	24,6	2,8	15	19	32,7
	R+4 - Ouest	13,1	0,7	2	4	28,9
	R+4 - Est	23,6	0,7	4	8	29,0
Paris	R+5 – Ouest	21,0	2,7	20	23	31,1
	R+5 - Est	28,2	4,9	58	34	32,9
	R+4 - Ouest	14,4	2,0	14	15	30,6
	R+4 - Est	26,1	2,0	18	21	31,0
Marseille	R+5 – Ouest	10,4	12,6	538	276	33,1
	R+5 - Est	12,6	20,4	587	276	33,5
	R+4 - Ouest	7,1	9,3	497	290	33,0
	R+4 - Est	12,6	10,8	523	282	33,0

- **Bâtiment existant – SRI 5 – Climat contemporain**

Prestations thermiques : Existant Climat : contemporain Procédé réflectif : SRI 5		Besoins de chauffage (kWh/m ² .an)	Besoins de refroidissement (kWh/m ² .an)	Degrés-Heures (°C.h)	Heures >28°C (occupation)	T°C max
Nantes	R+5 – Ouest	38,6	0,8	7	8	29,2
	R+5 - Est	50,0	2,0	32	20	29,3
	R+4 - Ouest	24,2	0,2	2	3	28,8
	R+4 - Est	36,7	0,4	3	5	29,0
Paris	R+5 – Ouest	41,6	2,7	23	26	31,2
	R+5 - Est	55,3	4,6	61	35	33,0
	R+4 - Ouest	25,7	1,4	13	14	30,6
	R+4 - Est	39,6	1,8	18	22	31,0
Marseille	R+5 – Ouest	23,4	15,5	555	276	33,1
	R+5 - Est	29,1	23,5	597	279	33,6
	R+4 - Ouest	14,8	9,5	497	285	33,0
	R+4 - Est	21,8	11,9	547	283	33,1

6.2.1. Besoins de chauffage

Les graphiques ci-dessous présentent les besoins de chauffage sur les trois stations météorologiques et les deux niveaux d'isolation suivant chacun des SRI étudiés :



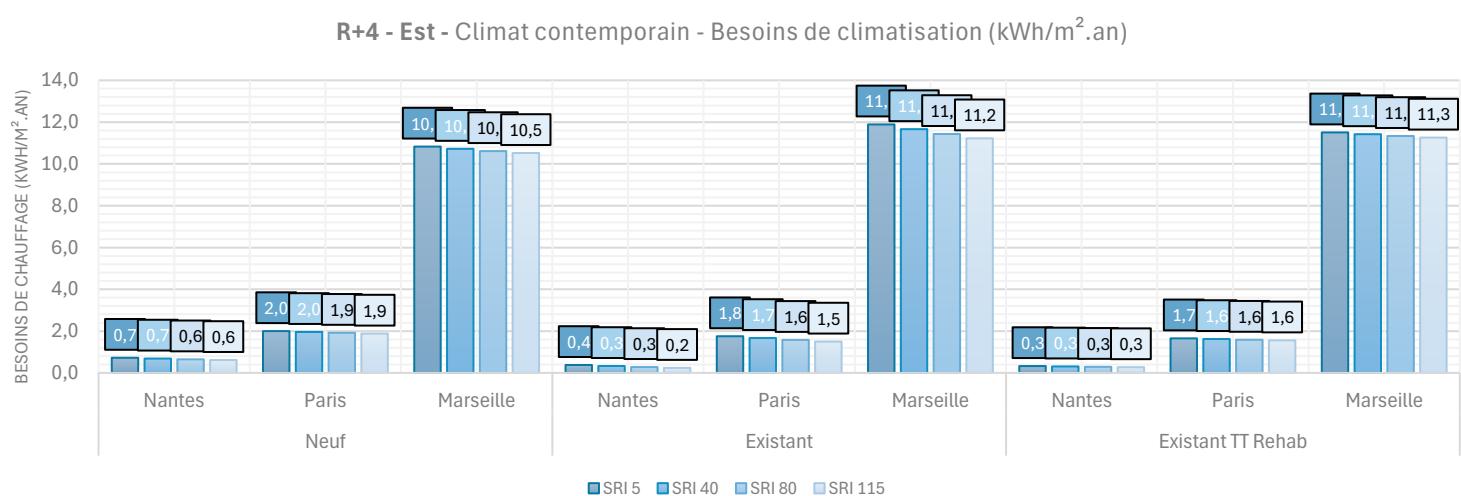
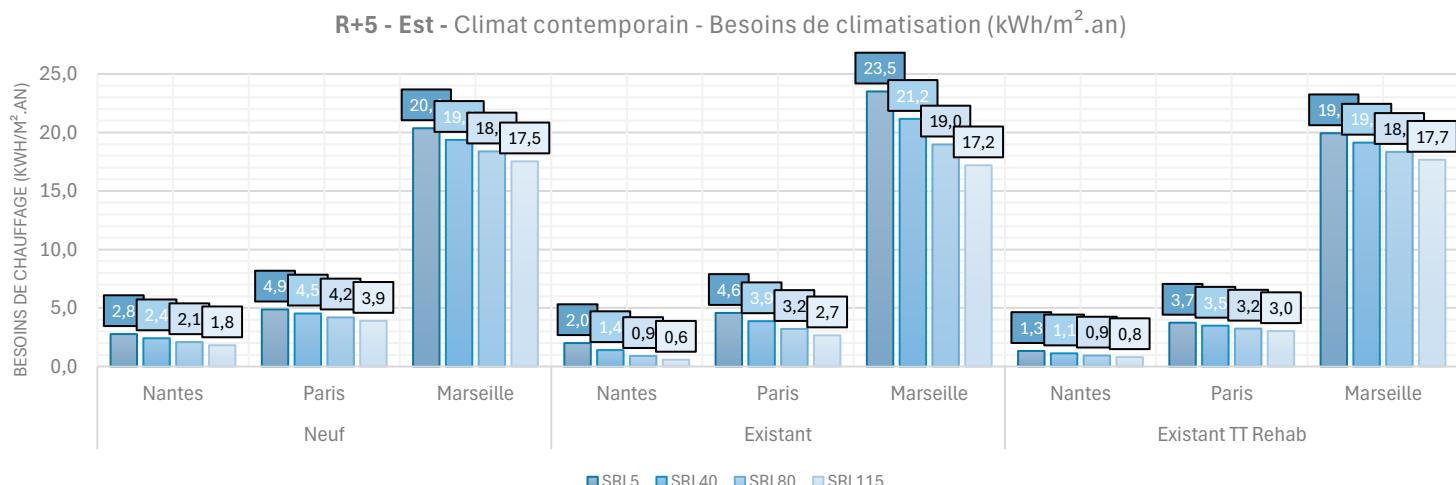
Le tableau suivant donne les écarts sur les besoins de chauffage pour passer d'un SRI40 à un SRI115 :

Evolution des besoins de chauffage suivant deux niveaux de SRI – Climat contemporain						
R+5	SRI 5 → SRI 115	Nantes		Paris		Marseille
Neuf		+1,0 kWh/m ² .an (+4%)		+0,9 kWh/m ² .an (+3%)		+0,7 kWh/m ² .an (+6%)
Existant		+3,8 kWh/m ² .an (+8%)		+3,1 kWh/m ² .an (+6%)		+3,2 kWh/m ² .an (+11%)
Existant (Toiture réhabilitée)		+1,3 kWh/m ² .an (+3%)		+1,1 kWh/m ² .an (+2%)		+1,1 kWh/m ² .an (+4%)
R+4	SRI 5 → SRI 115	Nantes		Paris		Marseille
Neuf		+0,2 kWh/m ² .an (+1%)		+0,2 kWh/m ² .an (+1%)		+0,1 kWh/m ² .an (+1%)
Existant		+0,4 kWh/m ² .an (+1%)		+0,4 kWh/m ² .an (+1%)		+0,4 kWh/m ² .an (+2%)
Existant (Toiture réhabilitée)		+0,2 kWh/m ² .an (+0%)		+0,1 kWh/m ² .an (+0%)		+0,2 kWh/m ² .an (+1%)

L'impact du procédé réflectif est uniquement significatif pour le niveau sous la toiture (R+4), l'impact est marginal pour les niveaux inférieurs.

6.2.2. Besoins de climatisation

Les graphiques ci-dessous présentent les besoins de climatisation sur les trois stations météorologiques et les deux niveaux d'isolation suivant chacun des SRI étudiés :



Le tableau suivant donne les écarts sur les besoins de climatisation pour passer d'un SRI40 à un SRI115 :

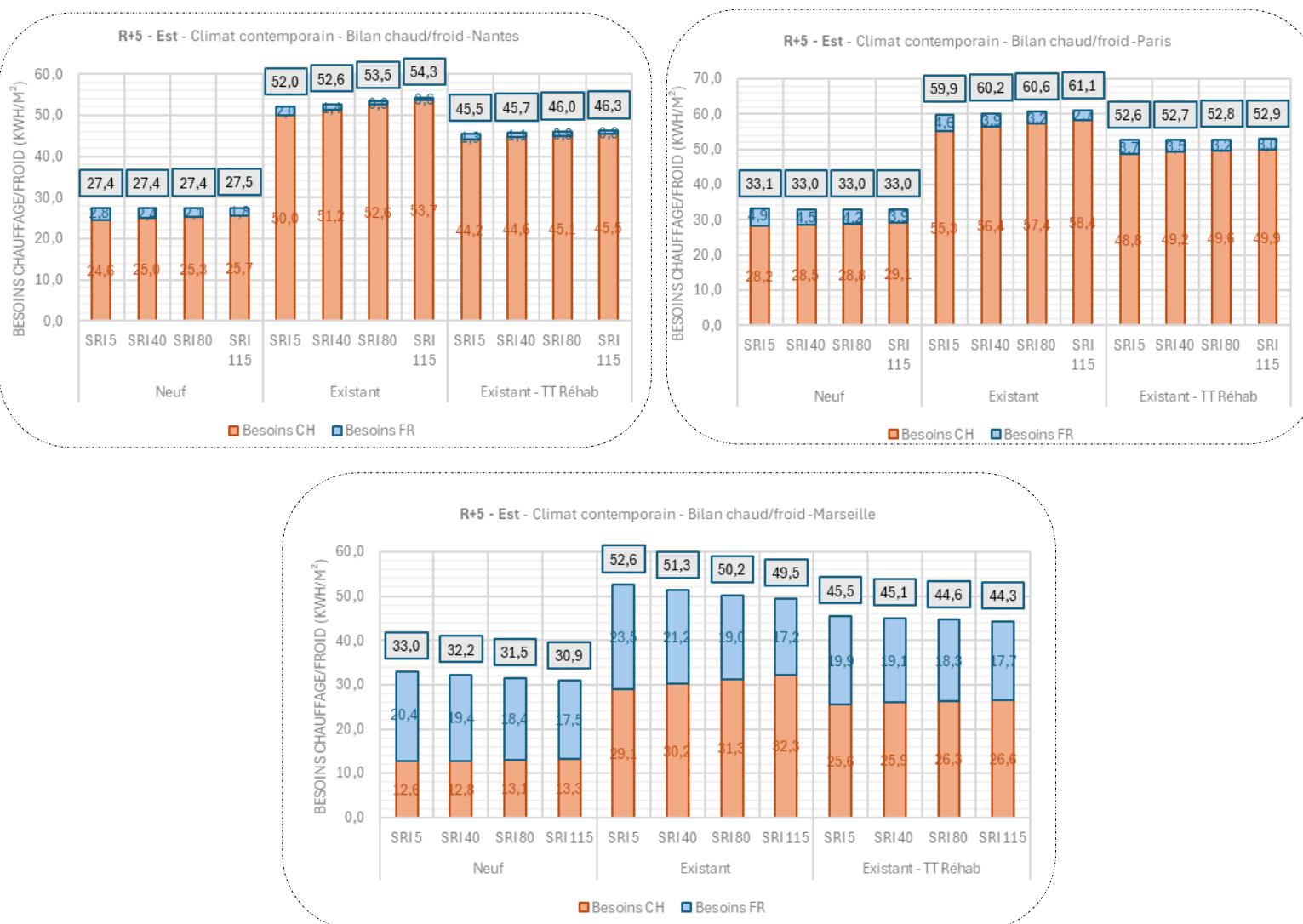
Evolution des besoins de climatisation suivant deux niveaux de SRI – Climat contemporain						
R+5	SRI 5 → SRI 115	Nantes		Paris		Marseille
Neuf		-1,0 kWh/m ² .an (-35%)		-1,0 kWh/m ² .an (-20%)		-2,8 kWh/m ² .an (-14%)
Existant		-1,4 kWh/m ² .an (-71%)		-1,9 kWh/m ² .an (-42%)		-6,3 kWh/m ² .an (-27%)
Existant (Toiture réhabilitée)		-0,5 kWh/m ² .an (-40%)		-0,5 kWh/m ² .an (-19%)		-2,3 kWh/m ² .an (-11%)
R+4	SRI 5 → SRI 115	Nantes		Paris		Marseille
Neuf		-0,1 kWh/m ² .an (-15%)		-0,1 kWh/m ² .an (-6%)		-0,3 kWh/m ² .an (-3%)
Existant		-0,1 kWh/m ² .an (-37%)		-0,3 kWh/m ² .an (-15%)		-0,7 kWh/m ² .an (-6%)
Existant (Toiture réhabilitée)		-0,1 kWh/m ² .an (-16%)		-0,1 kWh/m ² .an (-6%)		-0,2 kWh/m ² .an (-2%)

L'impact du procédé réflectif est uniquement significatif pour le niveau sous la toiture (R+4), l'impact est marginal pour les niveaux inférieurs.

6.2.3. Bilan chauffage/climatisation

Les graphiques suivants présentent les bilans des besoins de chauffage et de refroidissement suivant la performance thermique du bâtiment (Neuf, Existant, Existant + toiture isolée) et les revêtements appliqués :

Niveau R+5



Evolution du bilan chauffage/climatisation – R+5 - Est – Climat contemporain

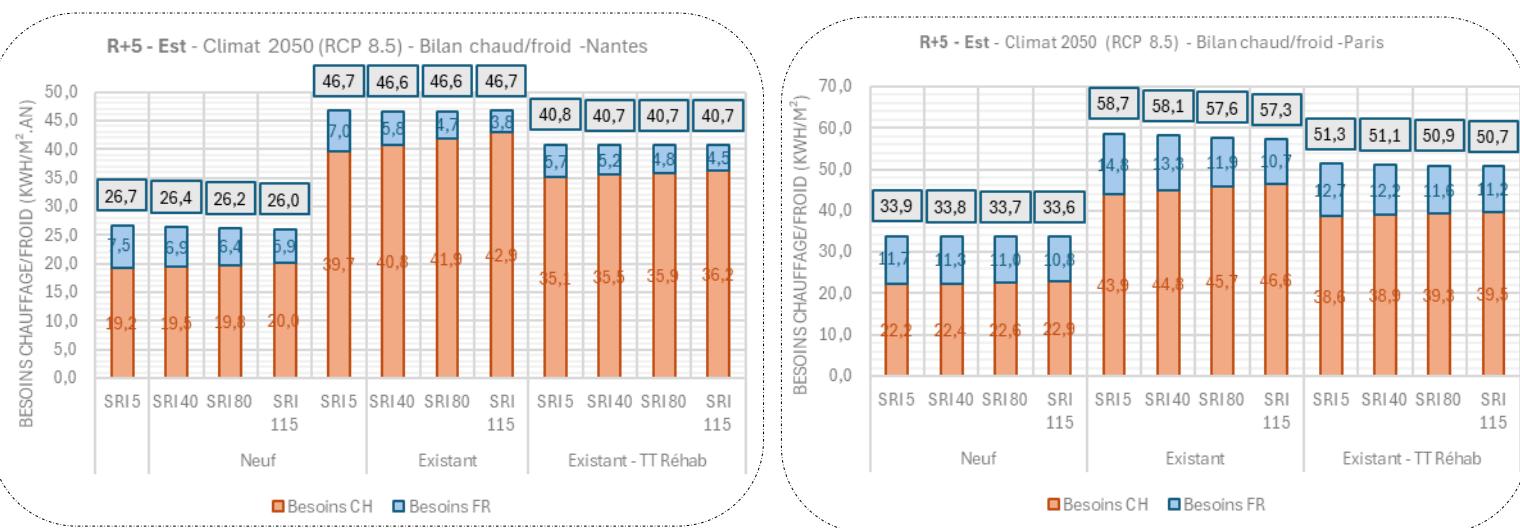
SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	+0,1 kWh/m ² .an (0%)	-0,1 kWh/m ² .an (0%)	-2,1 kWh/m ² .an (-6%)
Existant	+2,3 kWh/m ² .an (+5%)	+1,2 kWh/m ² .an (+2%)	-3,2 kWh/m ² .an (-6%)
Existant (Toiture réhabilitée)	+0,8 kWh/m ² .an (+2%)	+0,4 kWh/m ² .an (+1%)	-1,2 kWh/m ² .an (-3%)

Pour l'usage de bureau pour lequel la part des besoins de froid est relativement faible vis-à-vis des besoins de chauffage pour un climat contemporain à Nantes et Paris, on note un impact sensiblement négatif pour ces deux villes. Pour Marseille où la part des besoins de climatisation est plus conséquente, l'impact est en faveur du procédé réflectif sur l'ensemble des configurations.

Les graphiques ci-dessous montrent l'évolution du bilan chaud/froid pour l'avant dernier niveau (R+4). Le revêtement en toiture n'a plus d'impact sur ces niveaux.



Pour la projection climatique 2050 :

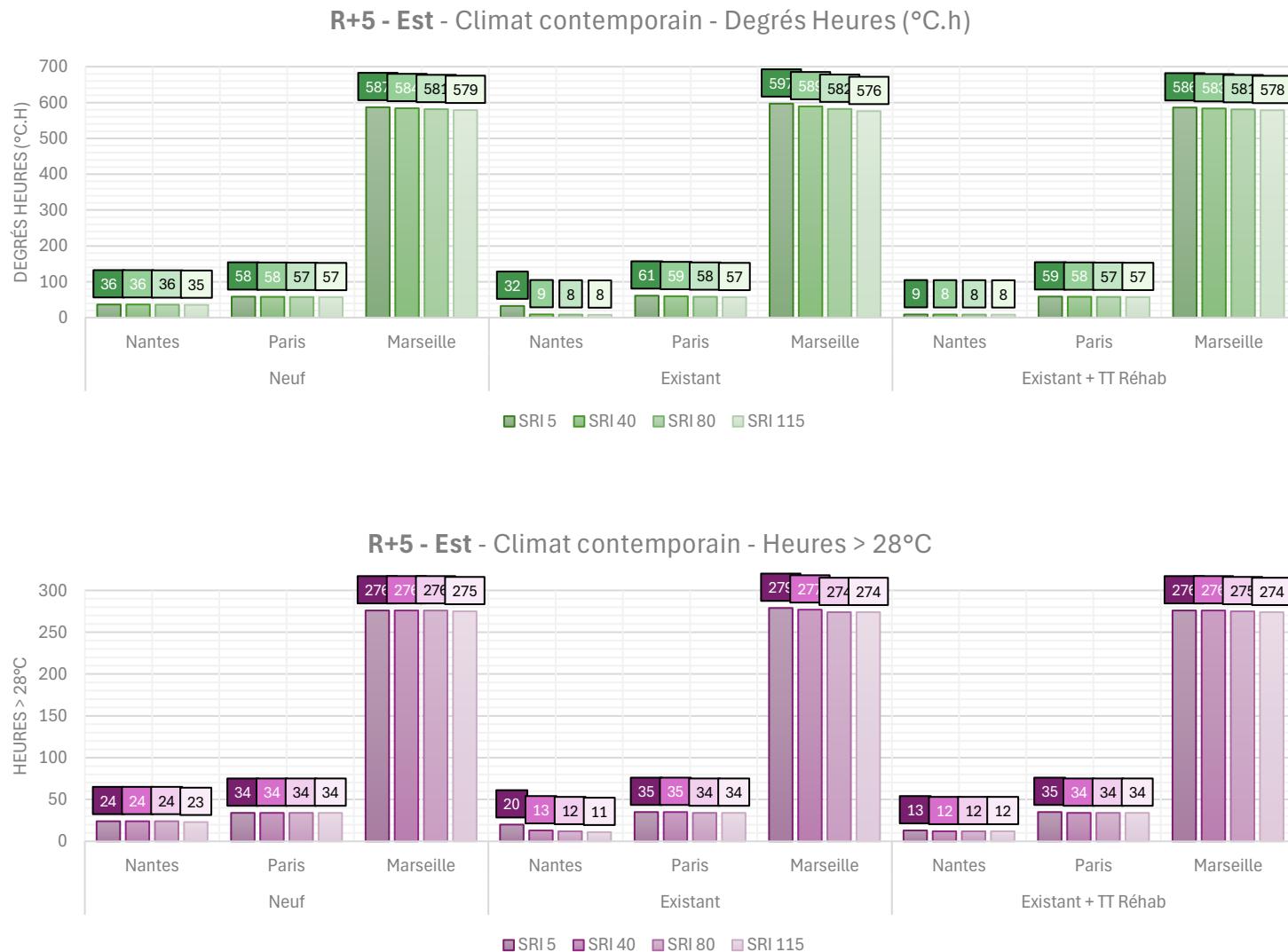


Evolution du bilan chauffage/climatisation – R+5 - Est – Climat 2050 (RCP 8.5)			
SRI 5 → SRI 115		Nantes	Paris
Neuf		-0,7 kWh/m².an (-3%)	-0,2 kWh/m².an (-1%)
Existant		0,0 kWh/m².an (0%)	-1,4 kWh/m².an (-2%)
Existant (Toiture réhabilitée)		-0,1 kWh/m².an (0%)	-0,6 kWh/m².an (-1%)
			-3,0 kWh/m².an (-8%)
			-5,6 kWh/m².an (-10%)
			-2,1 kWh/m².an (-4%)

Avec une projection climatique 2050 et un climat plus chaud, le bilan chaud/froid sera sensiblement en faveur du procédé réflectif pour les villes de Nantes et Paris (contrairement au climat contemporain) et les gains seront encore plus significatifs pour Marseille.

6.2.4. Confort d'été

Les graphiques ci-dessous présentent les niveaux et évolutions des indicateurs de confort d'été (Degrés-Heures et nombre d'heures supérieures à 28°C) :

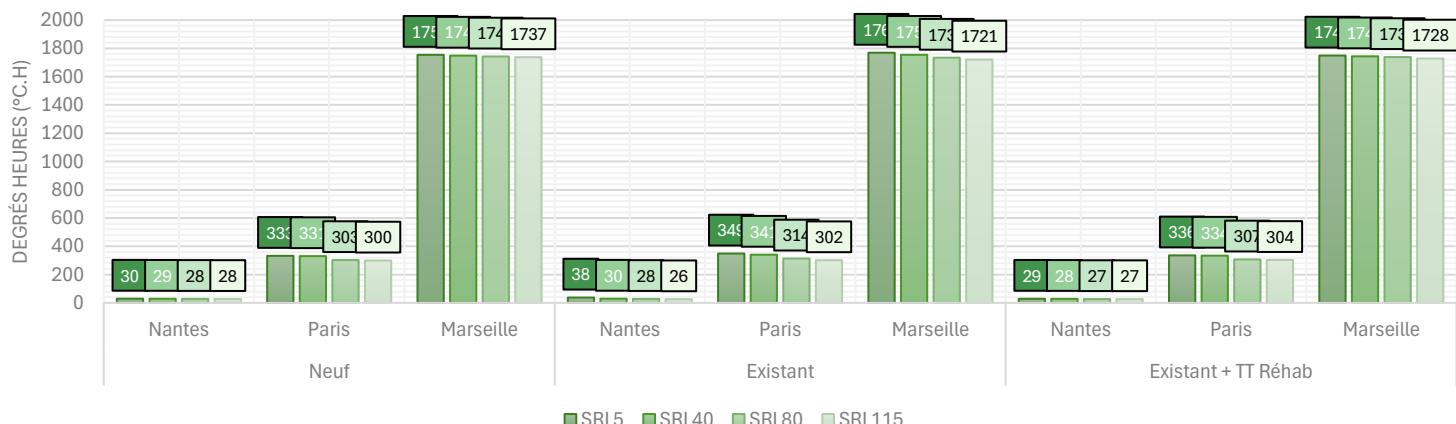


Evolution des indicateurs de confort suivant deux niveaux de SRI - Climat contemporain						
	Degrés-Heures (°C.h)			Nombre d'heures > 28°C		
	Nantes	Paris	Marseille	Nantes	Paris	Marseille
SRI 5 → SRI 115						
Neuf	-1 °C.h (-3%)	-2°C.h (-3%)	-8 °C.h (-1%)	-1h (-4%)	-	-1h (0%)
Existant	-25 °C.h (-76%)	-4°C.h (-7%)	-21 °C.h (-4%)	-9h (-45%)	-1h (0%)	-5h (-2%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-1 °C.h (-6%)	-2°C.h (-3%)	-8 °C.h (-1%)	-1h (-8%)	-1h (-3%)	-2h (-1%)

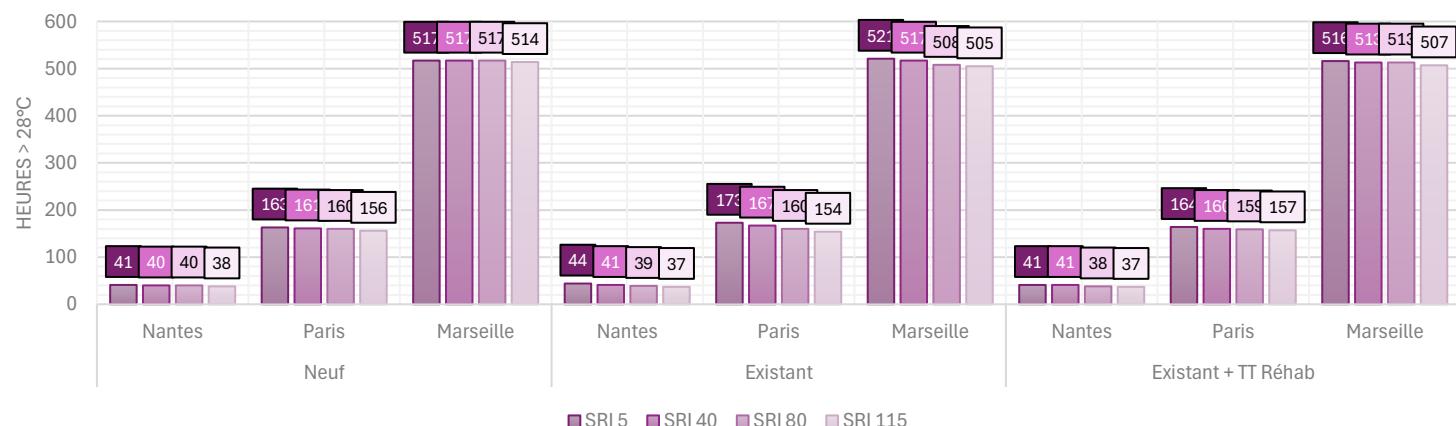
→ L'impact de la toiture réflective n'est pas significatif sur ce bâtiment à usage de bureau en structure béton avec prise en compte de la ventilation naturelle.

Pour la projection climatique 2050 :

R+5 - Est - Climat2050 (RCP 8.5) - Degrés Heures (°C.h)



R+5 - Est - Climat 2050 (RCP 8.5) - Heures > 28°C

Evolution des indicateurs de confort suivant deux niveaux de SRI
– Climat 2050 (RCP 8.5)

	Degrés-Heures (°C.h)			Nombre d'heures > 28°C		
	Nantes	Paris	Marseille	Nantes	Paris	Marseille
SRI 5 → SRI 115						
Neuf	-2 °C.h (-7%)	-33 °C.h (-10%)	-17 °C.h (-1%)	-3h (-7%)	-7h (-4%)	-3h (-1%)
Existant	-12 °C.h (-31%)	-47 °C.h (-14%)	-48 °C.h (-3%)	-7h (-16%)	-19h (-11%)	-16h (-3%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-2 °C.h (-8%)	-32 °C.h (-10%)	-21 °C.h (-1%)	-4h (-10%)	-7h (-4%)	-9h (-2%)

→ L'impact de la toiture réflective n'est pas significatif sur ce bâtiment à usage de bureau en structure béton avec prise en compte de la ventilation naturelle.

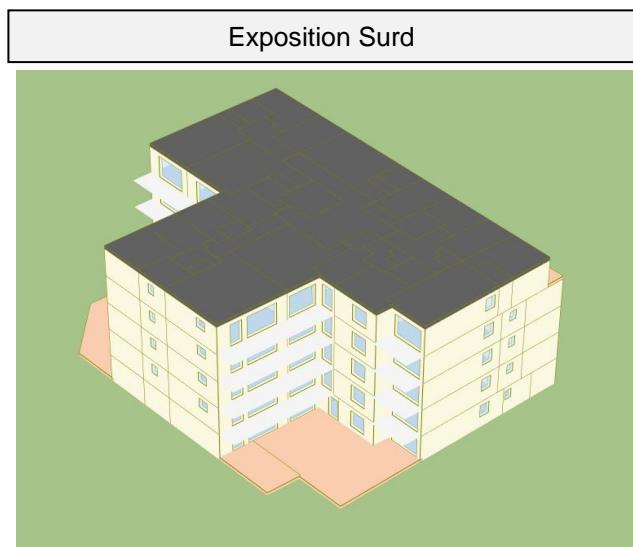
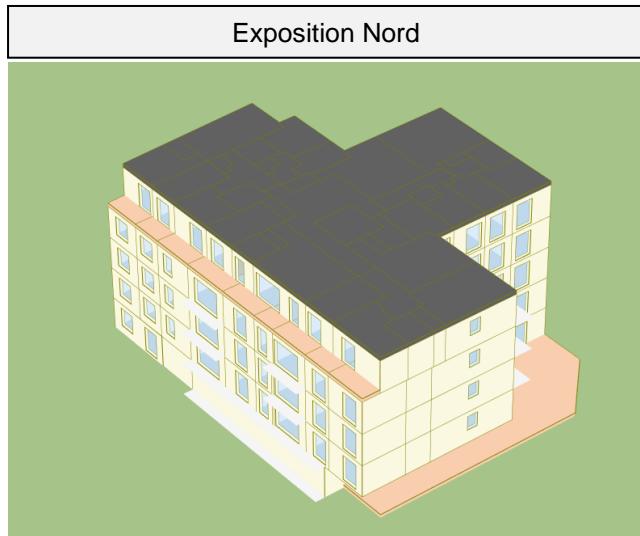
7. Bâtiment de logements collectifs

7.1. Bâtiment retenu

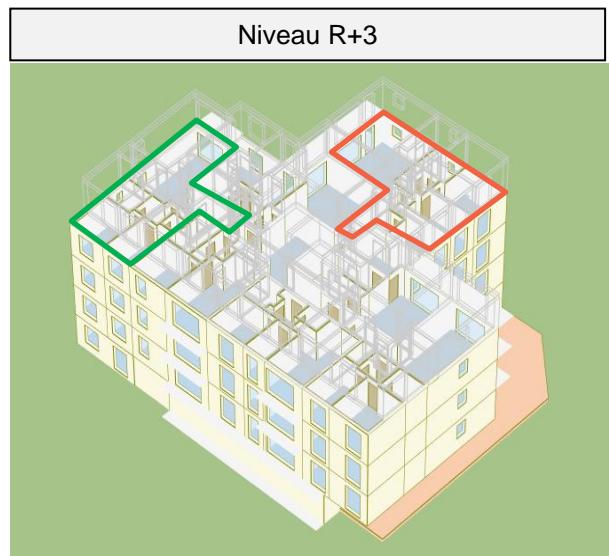
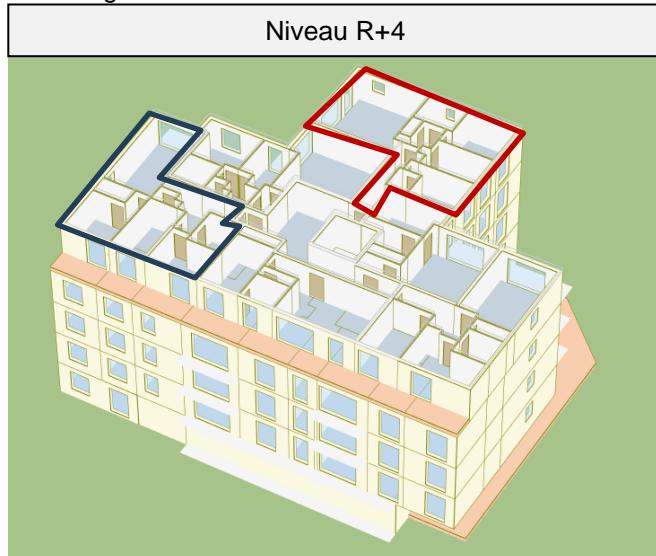
Logements collectifs	
Surface habitable	1920 m ²
Nombre de logements	32
Nombre de niveaux	R+4

7.1.1. Modélisation du bâtiment

Ci-dessous la modélisation 3D du bâtiment présentée suivant différentes orientations



Le zonage est défini comme suit :



Logement T4 – R+4- Est



Logement T3 – R+3 - Est



Logement T4 – R+4 - Ouest

Logement T4 – R+3 - Ouest

7.1.2. Prestations thermiques

	Neuf	Existant
Murs sur extérieur	Béton + isolation par l'intérieur (12cm – $\lambda=0,03$ – $R=4\text{ m}^2.\text{K/W}$)	Béton + isolation par l'intérieur (6cm – $\lambda=0,04$ – $R=1,5\text{ m}^2.\text{K/W}$)
Toitures terrasses inaccessibles	Dalle béton + 16 cm TH22 ($R=7,2\text{ m}^2.\text{K/W}$)	Dalle béton + 6 cm TH22 ($R=2,7\text{ m}^2.\text{K/W}$)
Menuiseries	Double vitrage – $Uw=1,4\text{ W/K/m}^2$ Volets roulants	Double vitrage – $Uw=2,6\text{ W/K/m}^2$ Volets roulants
Ponts thermiques plancher intermédiaire	Traitement des ponts thermiques (ψ_9 moyen=0,60)	Pas de traitement des ponts thermiques
Perméabilité à l'air	1,0 $\text{m}3/\text{h.m}^2$	1,7 $\text{m}3/\text{h.m}^2$

7.1.3. Consignes de températures

Les besoins de chauffage et de refroidissement sont calculés pour maintenir les consignes de température suivantes :

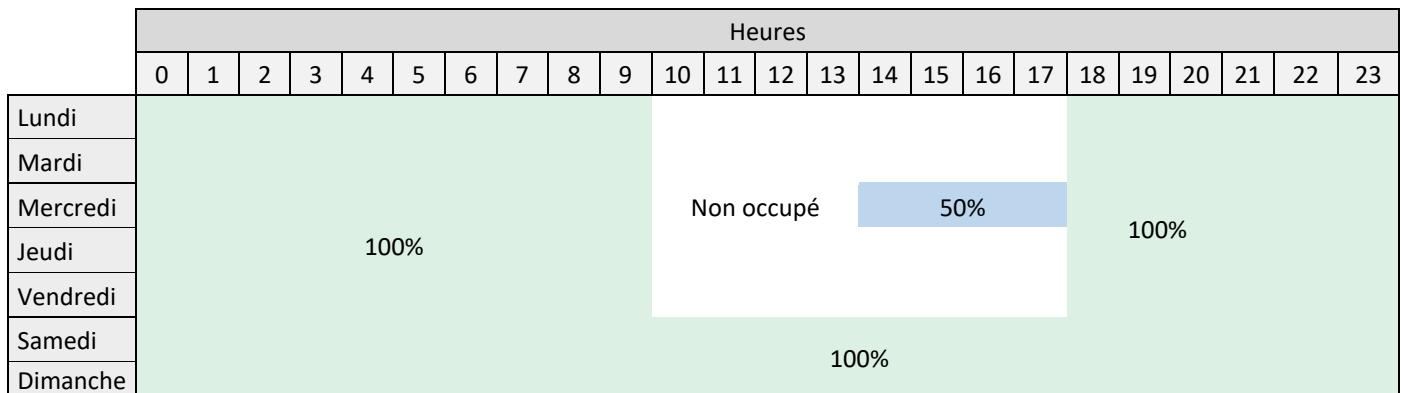
Consignes de températures		
	Zone	Industrie
Chauffage	<i>Occupation</i>	19°C
	<i>Inoccupation (≤ 48 heures)</i>	16°C
	<i>Absence prolongée (>48 heures)</i>	7°C
Refroidissement	<i>Occupation</i>	26°C
	<i>Inoccupation (≤ 48 heures)</i>	30°C
	<i>Absence prolongée (>48 heures)</i>	-

7.1.4. Scénario d'occupation annuel

- Taux d'occupation

Nombre d'occupants par typologie	
T3	3 personnes
T4	4 personnes

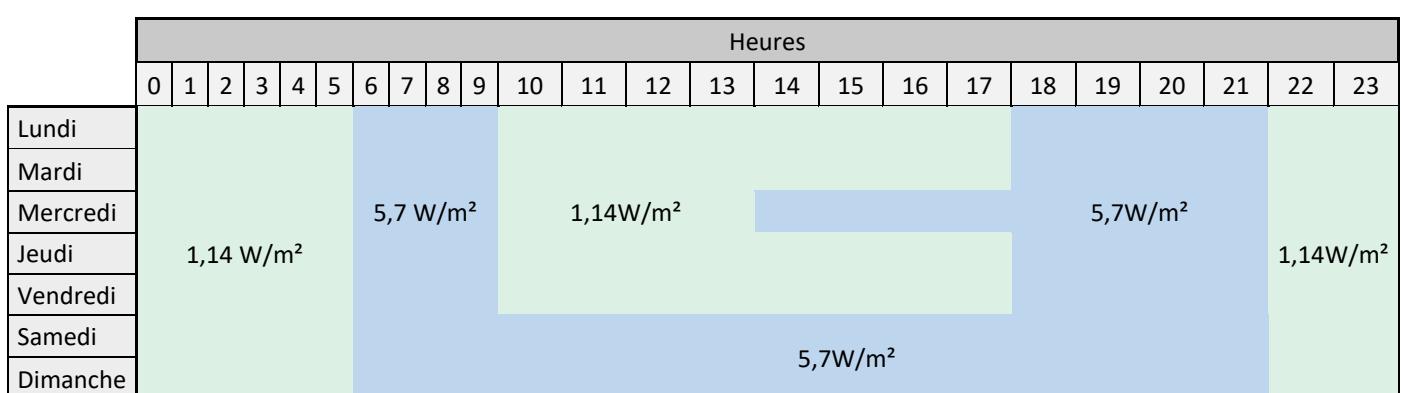
Avec pour scénario quotidien :



Nous n'avons pas considéré de période de vacances, ce scénario est reproductible sur l'ensemble de l'année.

7.1.5. Apports internes

Les apports internes regroupent les puissances dissipées par les équipements (informatique, ...). Les scénarios sont définis suivant les valeurs conventionnelles de la méthode RE2020 :



Nous n'avons pas considéré de période de vacances, ce scénario est reproductible sur l'ensemble de l'année.

7.2. Résultats

Les tableaux suivants présentent les résultats initiaux pour les deux niveaux de prestations thermiques (neuf et existant) ainsi que pour les 6 fichiers météorologiques étudiés :

- Bâtiment neuf – SRI 5

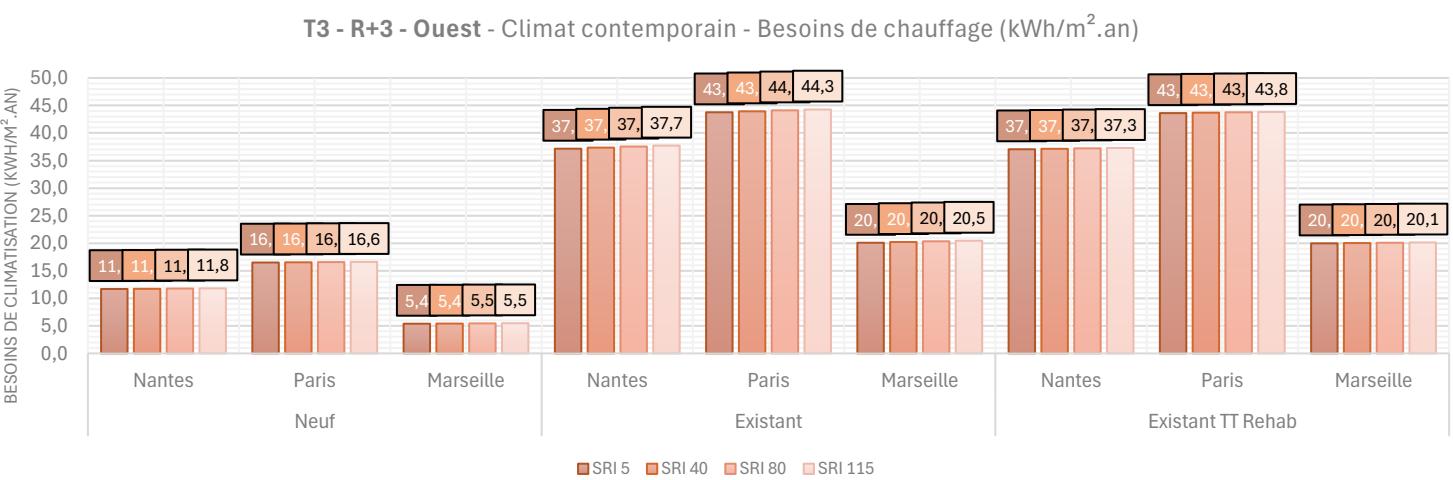
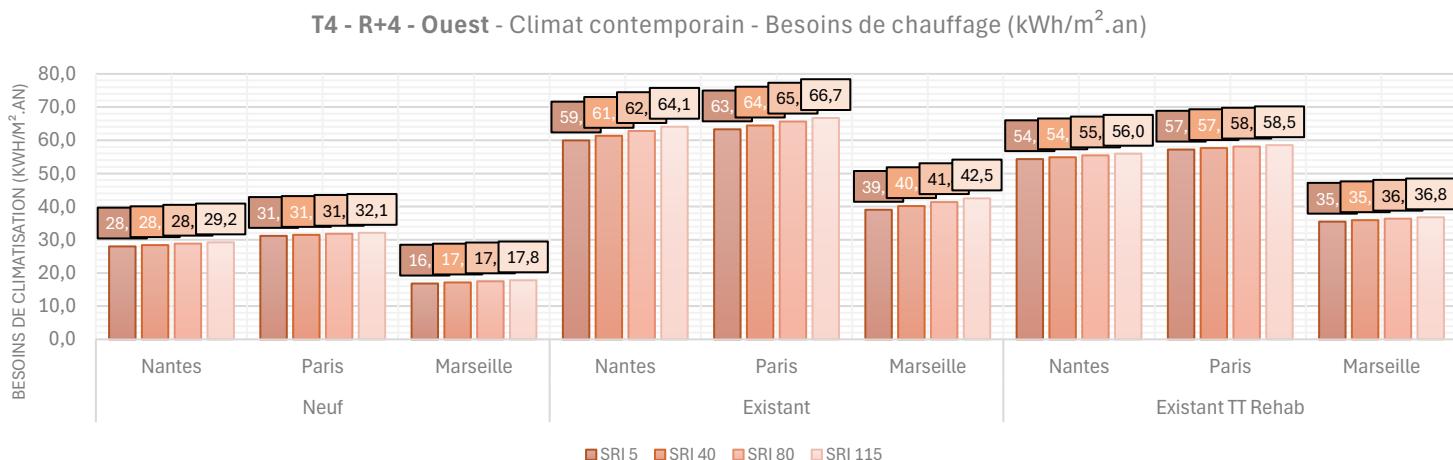
Prestations thermiques : Neuf Climat : contemporain Procédé réflectif : SRI 5		Besoins de chauffage (kWh/m ² .an)	Besoins de refroidissement (kWh/m ² .an)	Degrés-Heures (°C.h)	Heures >28°C (occupation)	T°C max
Nantes	R+4 – T4 -Est	30,4	0,5	5	6	29,2
	R+4 – T4 -Ouest	28,0	0,4	0	0	27,6
	R+3 – T3 -Est	16,5	0,4	5	6	29,3
	R+3 – T3 -Ouest	11,7	0,4	0	0	27,6
Paris	R+4 – T4 -Est	34,3	1,4	1	5	28,3
	R+4 – T4 -Ouest	31,2	1,3	1	6	28,4
	R+3 – T3 -Est	21,8	1,4	1	6	28,4
	R+3 – T3 -Ouest	16,5	1,3	2	7	28,9
Marseille	R+4 – T4 -Est	17,6	10,1	337	296	32,0
	R+4 – T4 -Ouest	16,8	9,5	290	277	31,3
	R+3 – T3 -Est	8,2	9,6	472	385	32,3
	R+3 – T3 -Ouest	5,4	8,5	428	364	32,0

- Bâtiment existant – SRI 5

Prestations thermiques : Existant Climat : contemporain Procédé réflectif : SRI 5		Besoins de chauffage (kWh/m ² .an)	Besoins de refroidissement (kWh/m ² .an)	Degrés-Heures (°C.h)	Heures >28°C (occupation)	T°C max
Nantes	R+4 – T4 -Est	60,8	0,6	5	6	29,3
	R+4 – T4 -Ouest	59,9	0,6	0	1	28,3
	R+3 – T3 -Est	44,7	0,4	5	6	29,3
	R+3 – T3 -Ouest	37,2	0,4	0	0	27,6
Paris	R+4 – T4 -Est	65,6	2,0	6	19	29,0
	R+4 – T4 -Ouest	63,3	1,9	7	17	29,1
	R+3 – T3 -Est	51,6	1,6	5	16	28,9
	R+3 – T3 -Ouest	43,8	1,5	6	16	29,0
Marseille	R+4 – T4 -Est	37,9	14,6	433	341	32,3
	R+4 – T4 -Ouest	39,1	14,1	404	337	31,9
	R+3 – T3 -Est	24,9	11,9	494	386	32,4
	R+3 – T3 -Ouest	20,1	10,6	465	375	32,2

7.2.1. Besoins de chauffage

Les graphiques ci-dessous présentent les besoins de chauffage sur les trois stations météorologiques et les deux niveaux d'isolation suivant chacun des SRI étudiés :

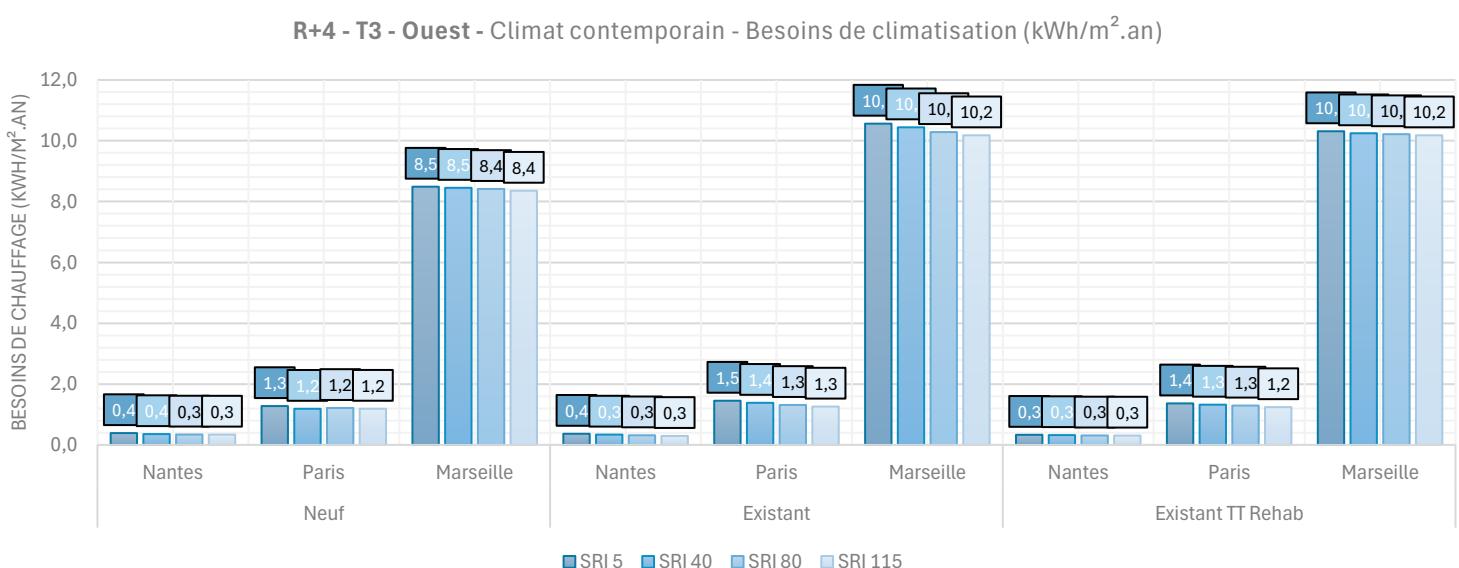
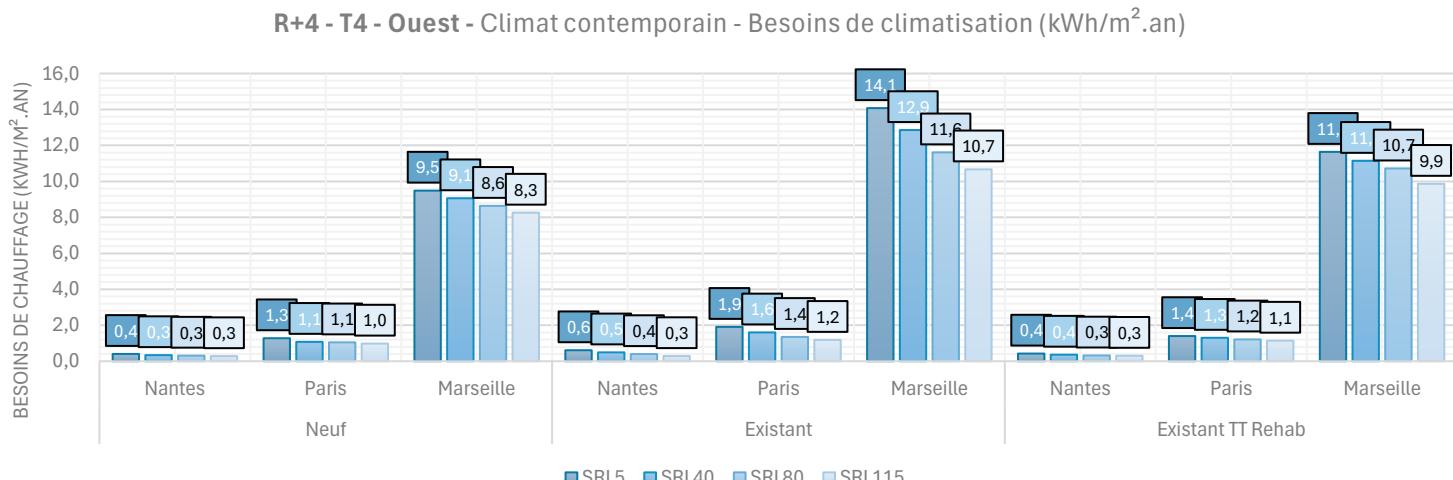


Le tableau suivant donne les écarts sur les besoins de chauffage pour passer d'un SRI40 à un SRI115 :

Evolution des besoins de chauffage suivant deux niveaux de SRI – Climat contemporain						
R+4	SRI 5 → SRI 115	Nantes		Paris		Marseille
Neuf		+1,2 kWh/m ² .an (+4%)		+0,9 kWh/m ² .an (+3%)		+1,0 kWh/m ² .an (+6%)
	Existant	+4,1 kWh/m ² .an (+7%)		+3,4 kWh/m ² .an (+5%)		+3,4 kWh/m ² .an (+9%)
	Existant (Toiture réhabilitée)	+1,6 kWh/m ² .an (+3%)		+1,3 kWh/m ² .an (+2%)		+1,3 kWh/m ² .an (+4%)
R+3	SRI 5 → SRI 115	Nantes		Paris		Marseille
Neuf		+0,1 kWh/m ² .an (+1%)		+0,1 kWh/m ² .an (+1%)		+0,1 kWh/m ² .an (+1%)
	Existant	+0,6 kWh/m ² .an (+1%)		+0,5 kWh/m ² .an (+1%)		+0,4 kWh/m ² .an (+2%)
	Existant (Toiture réhabilitée)	+0,2 kWh/m ² .an (+1%)		+0,2 kWh/m ² .an (+0%)		+0,2 kWh/m ² .an (+1%)

L'impact du procédé réflectif est uniquement significatif pour le niveau sous la toiture (R+4), l'impact est marginal pour les niveaux inférieurs.

Les graphiques ci-dessous présentent les besoins de climatisation sur les trois stations météorologiques et les deux niveaux d'isolation suivant chacun des SRI étudiés :

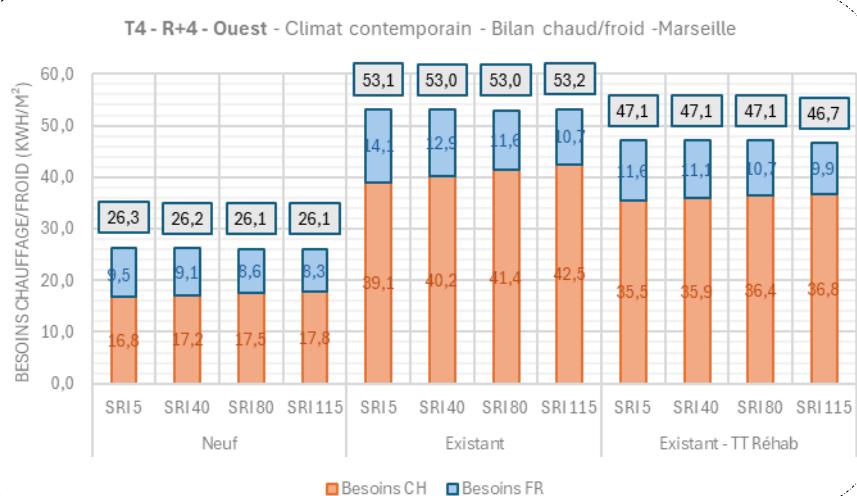
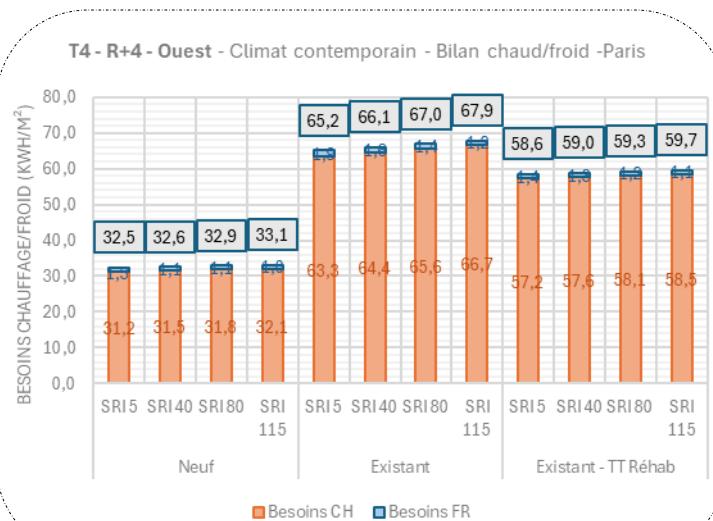
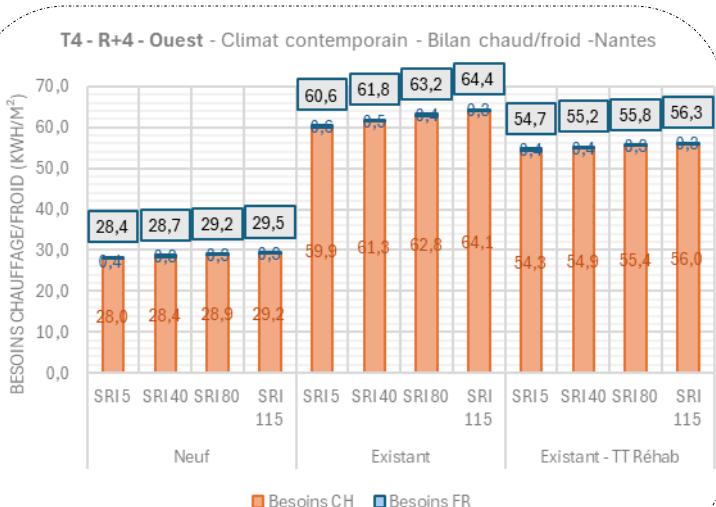


Evolution des besoins de climatisation suivant deux niveaux de SRI – Climat contemporain					
R+4	SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille	
	Neuf	-0,1 kWh/m ² .an (-30%)	-0,3 kWh/m ² .an (-23%)	-1,2 kWh/m ² .an (-13%)	
	Existant	-0,3 kWh/m ² .an (-53%)	-0,7 kWh/m ² .an (-38%)	-3,4 kWh/m ² .an (-24%)	
	Existant (Toiture réhabilitée)	-0,1 kWh/m ² .an (-29%)	-0,3 kWh/m ² .an (-18%)	-1,8 kWh/m ² .an (-15%)	
R+3	SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille	
	Neuf	-0,1 kWh/m ² .an (-13%)	-0,1 kWh/m ² .an (-7%)	-0,1 kWh/m ² .an (-2%)	
	Existant	-0,1 kWh/m ² .an (-19%)	-0,2 kWh/m ² .an (-13%)	-0,4 kWh/m ² .an (-4%)	
	Existant (Toiture réhabilitée)	-0,0 kWh/m ² .an (-7%)	-0,1 kWh/m ² .an (-9%)	-0,1 kWh/m ² .an (-1%)	

L'impact du procédé réflectif est uniquement significatif pour le niveau sous la toiture (R+4), l'impact est marginal pour les niveaux inférieurs.

7.2.2. Bilan chauffage/climatisation

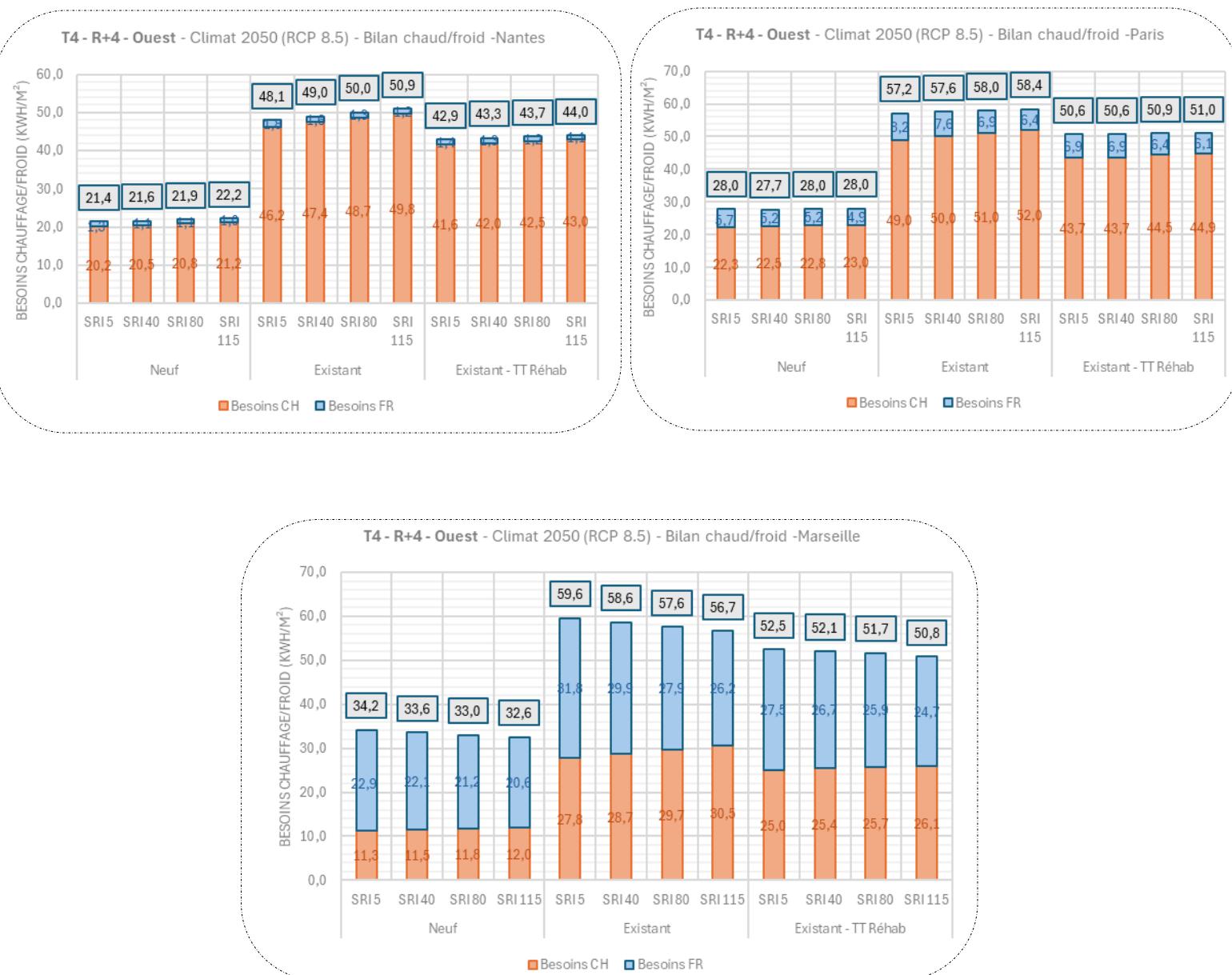
Les graphiques suivants présentent les bilans des besoins de chauffage et de refroidissement suivant la performance thermique du bâtiment (Neuf, Existant, Existant + toiture isolée) et les revêtements appliqués :



Evolution du bilan chauffage/climatisation – R+4 – T4 – Ouest – Climat contemporain				
R+4	SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
	Neuf	+1,1 kWh/m².an (+4%)	+0,6 kWh/m².an (+2%)	-0,2 kWh/m².an (-1%)
	Existant	+3,8 kWh/m².an (+6%)	+2,7 kWh/m².an (+4%)	0,0 kWh/m².an (0%)
	Existant (Toiture réhabilitée)	+1,5 kWh/m².an (+3%)	+1,1 kWh/m².an (+2%)	-0,5 kWh/m².an (-1%)

Pour l'usage résidentiel collectif, on note que sur un climat contemporain pour lequel les besoins de froid sont faibles vis-à-vis des besoins de chauffage, l'application d'un procédé réflectif ne sera pas favorable avec un bilan négatif sur l'ensemble des configurations pour Nantes et Paris. Pour Marseille, le bilan est légèrement positif.

Pour la projection climatique 2050 :



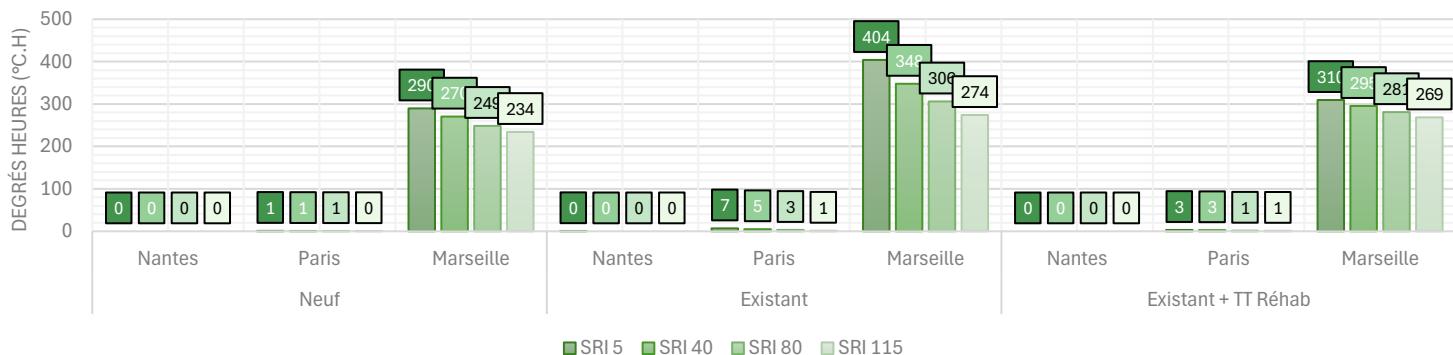
Evolution du bilan chauffage/climatisation – R+4 – T4 – Ouest – Climat 2050 (RCP 8.5)				
R+4	SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
Neuf		+0,7 kWh/m ² .an (+3%)	0,0 kWh/m ² .an (0%)	-1,6 kWh/m ² .an (-5%)
Existant		+2,9 kWh/m ² .an (+6%)	+1,2 kWh/m ² .an (+4%)	-2,9 kWh/m ² .an (-5%)
Existant (Toiture réhabilitée)		+1,1 kWh/m ² .an (+2%)	+0,4 kWh/m ² .an (+1%)	-1,7 kWh/m ² .an (-3%)

Avec une projection 2050, on note que le bilan s'améliore en faveur du procédé réflectif par rapport au climat contemporain mais reste négatif pour Nantes et Paris.

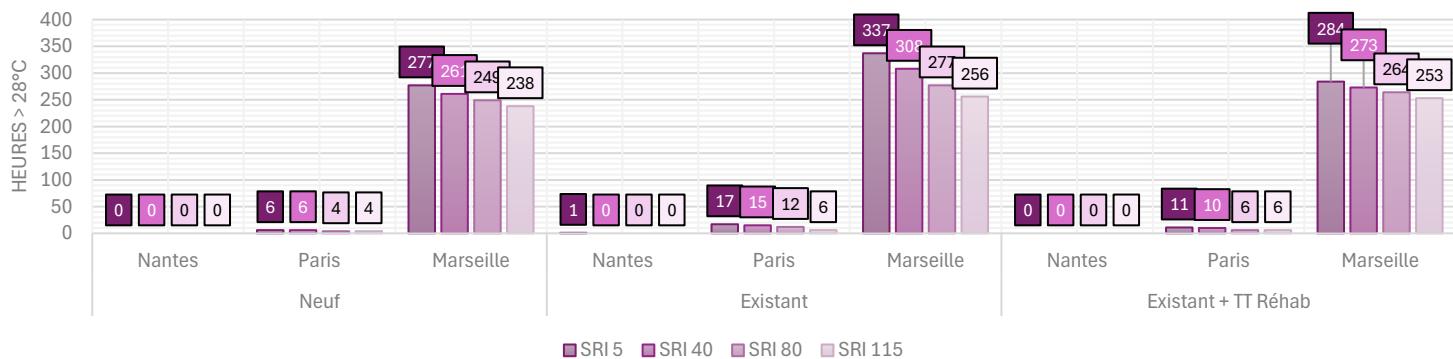
7.2.3. Confort d'été

Les graphiques ci-dessous présentent les niveaux et évolutions des indicateurs de confort d'été (Degrés-Heures et nombre d'heures supérieures à 28°C) :

T4 - R+4 - Ouest - Climat contemporain - Degrés Heures (°C.h)



T4 - R+4 - Ouest - Climat contemporain - Heures > 28°C



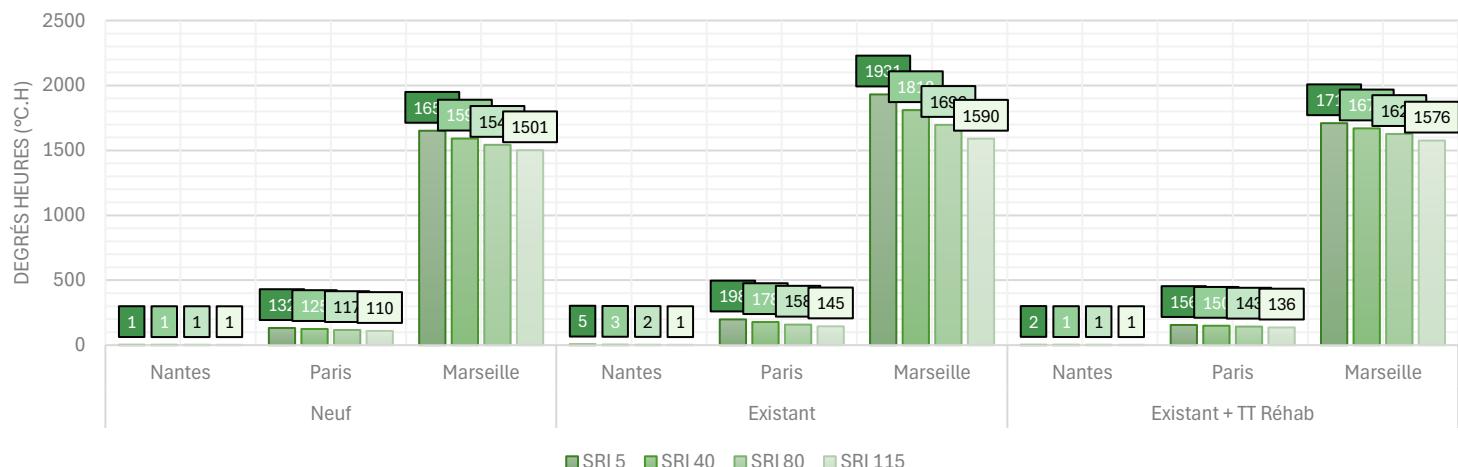
Evolution des indicateurs de confort suivant deux niveaux de SRI - Climat contemporain						
	Degrés-Heures (°C.h)			Nombre d'heures > 28°C		
	Nantes	Paris	Marseille	Nantes	Paris	Marseille
SRI 5 → SRI 115						
Neuf	-	-0,6 °C.h (-60%)	-55 °C.h (-20%)	-	-2h (-33%)	-39h (-14%)
Existant	-0,3 °C.h (-100%)	-5,5 °C.h (-80%)	-130 °C.h (-32%)	-1h (-100%)	-11h (-65%)	-81h (-24%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-	-1,9 °C.h (-62%)	-41,0 °C.h (-15%)	-	-5h (-45%)	-31h (-10%)

→ L'impact de la toiture réflective n'est pas significatif pour les villes de Nantes et Paris qui présentent de faibles temps d'inconfort.

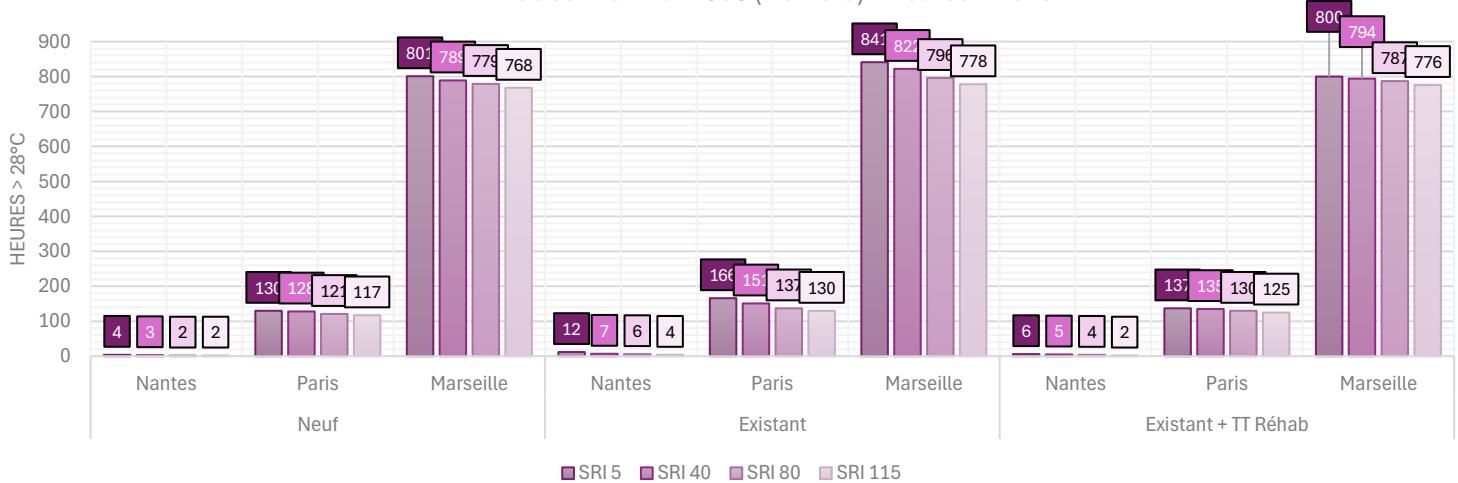
On note un impact légèrement plus conséquent pour Marseille avec des gains supérieurs à 30 heures au-dessus de 28°C et jusqu'à 80 heures pour une toiture faiblement isolée.

Pour la projection climatique 2050 :

T4 - R+4 - Ouest - Climat 2050 (RCP 8.5) - Degrés Heures (°C.h)



T4 - R+4 - Ouest - Climat 2050 (RCP 8.5) - Heures > 28°C



Evolution des indicateurs de confort suivant deux niveaux de SRI
– Climat 2050 (RCP 8.5)

SRI 5 → SRI 115	Degrés-Heures (°C.h)			Nombre d'heures > 28°C		
	Nantes	Paris	Marseille	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-0,6 °C.h (-49%)	-22,5 °C.h (-17%)	-149,9 °C.h (-9%)	-2h (-50%)	-13h (-10%)	-33h (-4%)
Existant	-3,9 °C.h (-83%)	-53,2 °C.h (-27%)	-340,8 °C.h (-18%)	-8h (-67%)	-36h (-22%)	-63h (-7%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-1,5 °C.h (-68)	-19,4 °C.h (-12%)	-133,7 °C.h (-8%)	-4h (-67%)	-12h (-9%)	-24h (-3%)

7.3. Variante : toiture en couverture zinc

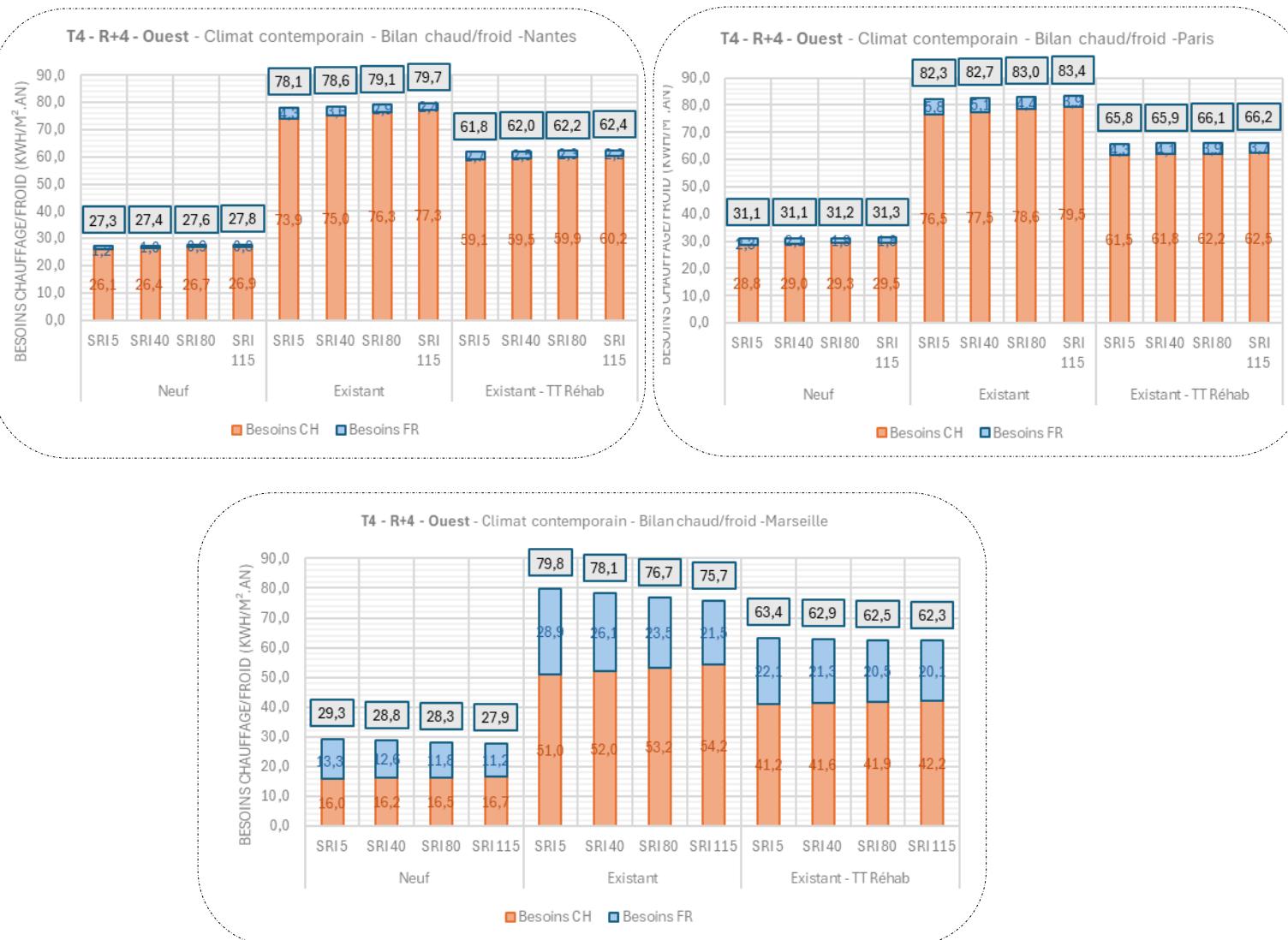
La toiture terrasse du cas précédent est remplacée par une toiture légère avec couverture zinc (rampants et combles perdus) :



	Neuf	Existant
Murs sur extérieur	Béton + isolation par l'intérieur (12cm – $\lambda=0,03$ – $R=4\text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$)	Béton + isolation par l'intérieur (6cm – $\lambda=0,04$ – $R=1,5\text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$)
Rampants	Plaque de BA 13 + isolation laine de verre (20 cm - $R \geq 5,50\text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$)	Plaque de BA 13 + isolation laine de verre (6 cm – $R=1,70\text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$)
Combles perdus	Plaque de BA 13 + isolation laine de verre (30 cm - $R \geq 8,00\text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$)	Plaque de BA 13 + isolation laine de verre (6 cm – $R=1,70\text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$)
Menuiseries	Double vitrage – $U_w=1,4\text{ W/K/m}^2$ Volets roulants	Double vitrage – $U_w=2,6\text{ W/K/m}^2$ Volets roulants
Ponts thermiques plancher intermédiaire	Traitement des ponts thermiques (ψ_9 moyen=0,60)	Pas de traitement des ponts thermiques
Perméabilité à l'air	1,0 $\text{m}^3/\text{h.m}^2$	1,7 $\text{m}^3/\text{h.m}^2$

7.3.1. Bilan chauffage/climatisation

Les graphiques suivants présentent les bilans des besoins de chauffage et de refroidissement suivant la performance thermique du bâtiment (Neuf, Existant, Existant + toiture isolée) et les revêtements appliqués :

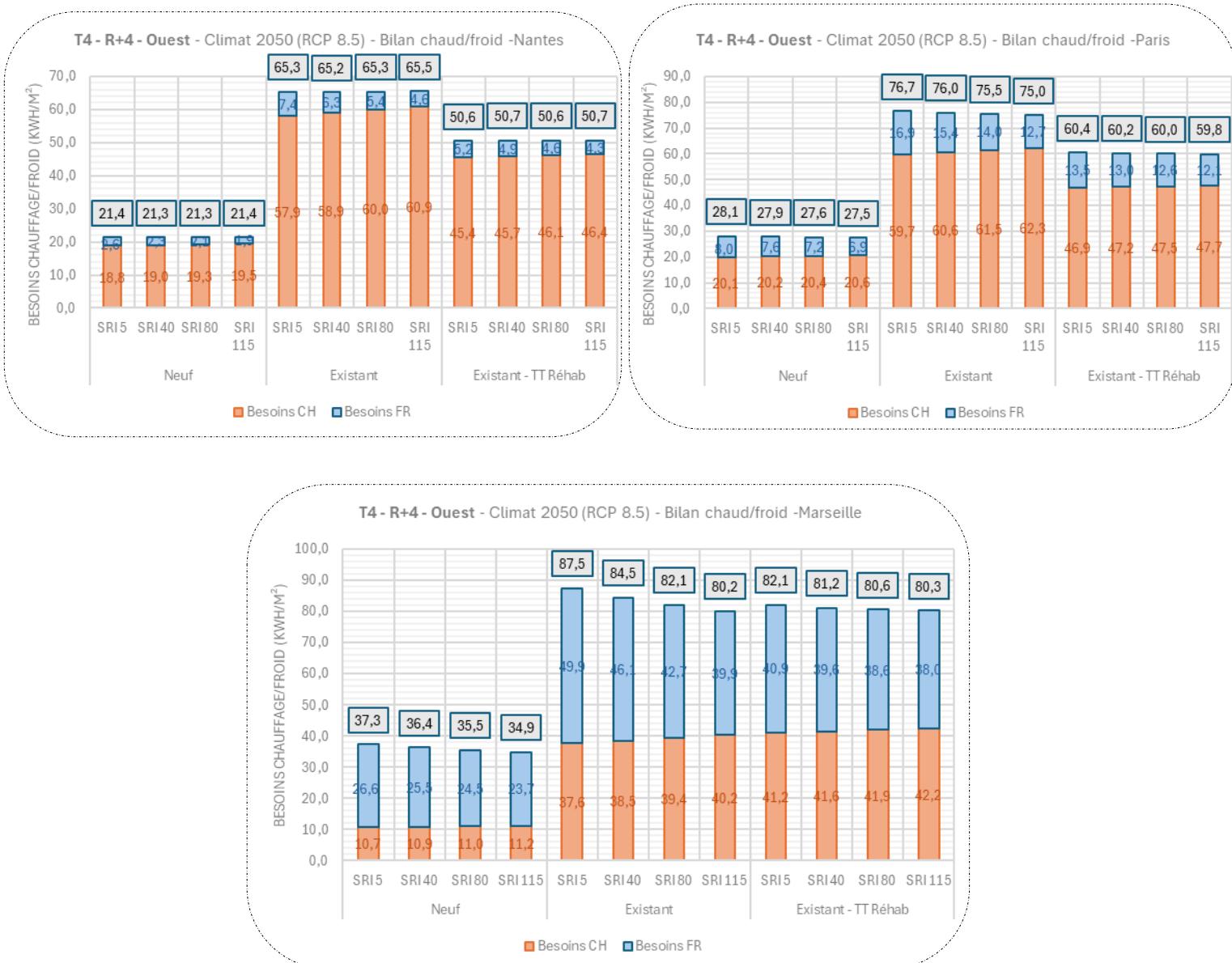


Evolution du bilan chauffage/climatisation – R+4 – T4 – Ouest – Climat contemporain

R+4	SRI 5 → SRI 115	Nantes	Paris	Marseille
	Neuf	+0,5 kWh/m ² .an (+2%)	+0,2 kWh/m ² .an (+1%)	-1,4 kWh/m ² .an (-5%)
	Existant	+1,5 kWh/m ² .an (+2%)	+1,1 kWh/m ² .an (+1%)	-4,2 kWh/m ² .an (-5%)
	Existant (Toiture réhabilitée)	+0,6 kWh/m ² .an (+1%)	+0,4 kWh/m ² .an (+1%)	-1,0 kWh/m ² .an (-2%)

En comparant les résultats pour une toiture dalle béton et une toiture légère avec couverture zinc, on observe un bilan plus favorable aux procédés réflectifs dans le second cas. En effet pour ce dernier, les besoins de refroidissement sont plus importants cependant le bilan reste toujours négatif pour les villes de Nantes et Paris. A Marseille où le bilan était équilibré avec une dalle béton, il est dans ce cas bien plus favorable au procédé réflectif.

Pour la projection climatique 2050 :

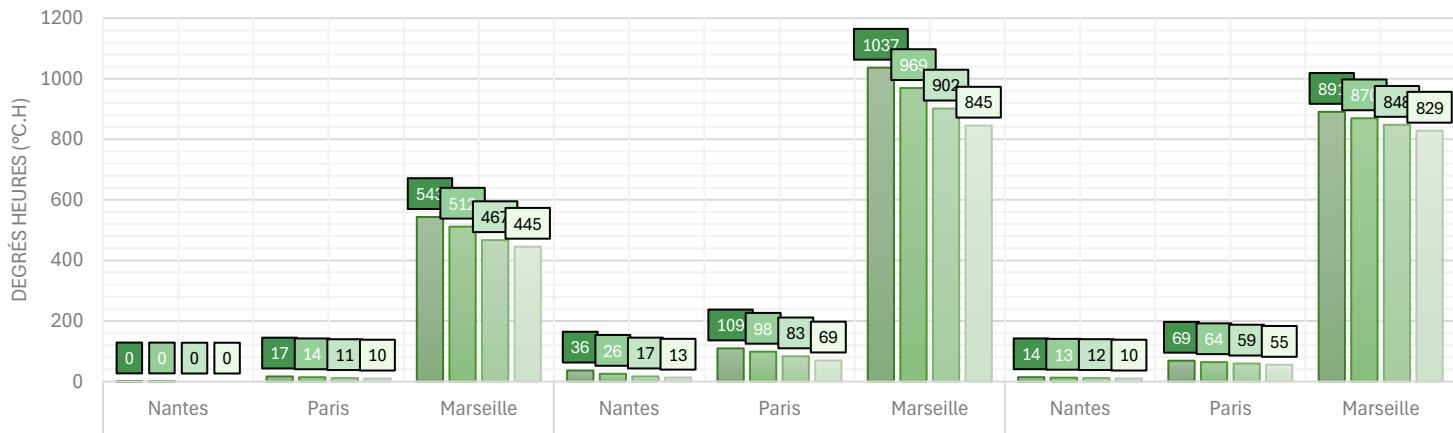


Evolution du bilan chauffage/climatisation – R+4 – T4 – Ouest – Climat 2050 (RCP 8.5)					
R+4	SRI 5 → SRI 115		Nantes		Paris
	Neuf	Existant	Existant (Toiture réhabilitée)		Marseille
Neuf				+0,0 kWh/m².an (+0%)	-0,6 kWh/m².an (-2%)
Existant				+0,2 kWh/m².an (+0%)	-1,6 kWh/m².an (-2%)
Existant (Toiture réhabilitée)				+0,1 kWh/m².an (+0%)	-0,5 kWh/m².an (-1%)
					-2,4 kWh/m².an (-7%)
					-7,4 kWh/m².an (-8%)
					-1,8 kWh/m².an (-2%)

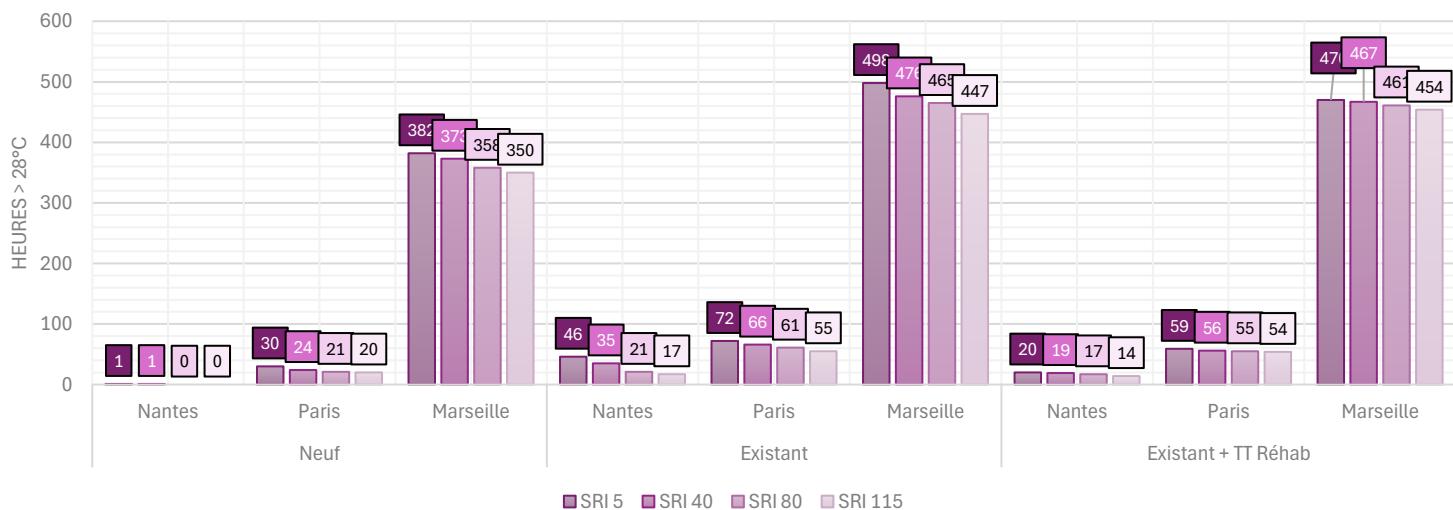
7.3.2. Confort d'été

Les graphiques ci-dessous présentent les niveaux et évolutions des indicateurs de confort d'été (Degrés-Heures et nombre d'heures supérieures à 28°C) :

T4 - R+4 - Ouest - Climat contemporain - Degrés Heures (°C.h)



T4 - R+4 - Ouest - Climat contemporain - Heures > 28°C

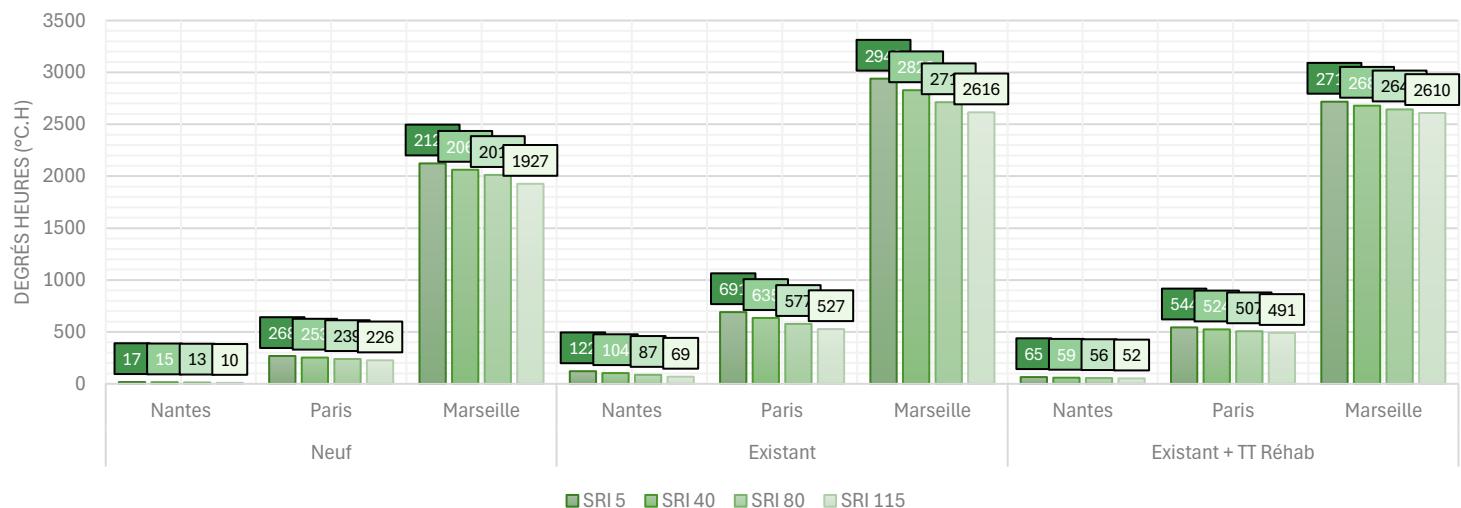


Evolution des indicateurs de confort suivant deux niveaux de SRI
- Climat contemporain

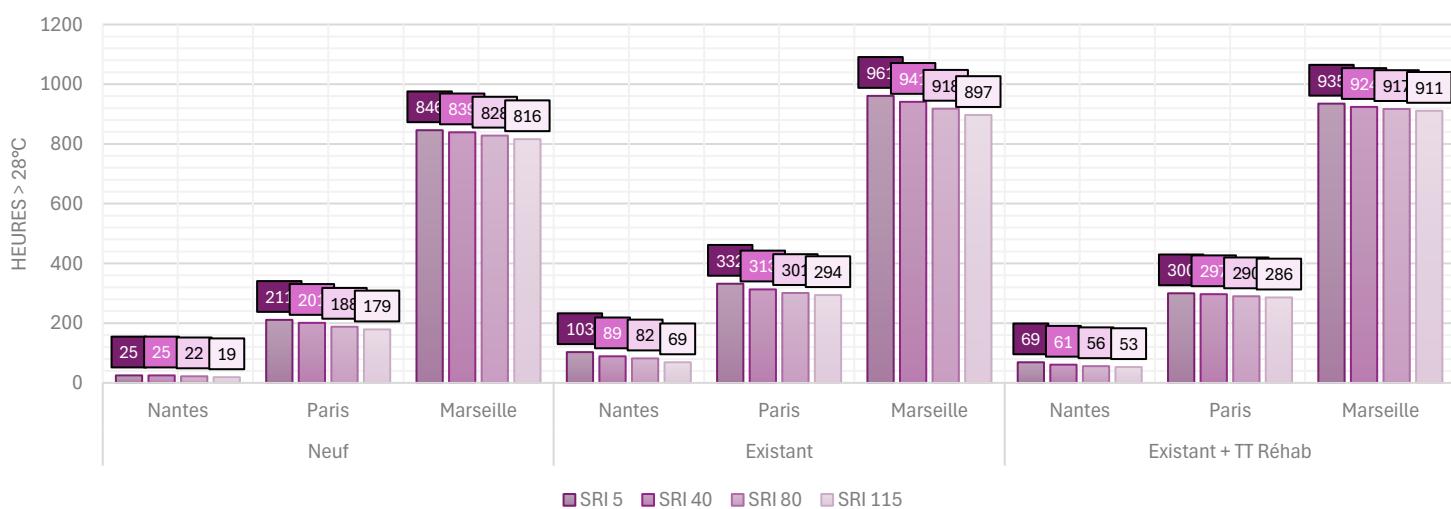
SRI 5 → SRI 115	Degrés-Heures (°C.h)			Nombre d'heures > 28°C		
	Nantes	Paris	Marseille	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-0,5 °C.h (-100%)	-6,7 °C.h (-41%)	-98,2 °C.h (-18%)	-1h (-100%)	-10h (-33%)	-32h (-8%)
Existant	-23,4 °C.h (-65%)	-39,9 °C.h (-36%)	-191,4 °C.h (-18%)	-29h (-63%)	-17h (-24%)	-51h (-10%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-4,3 °C.h (-31%)	-13,6 °C.h (-20%)	-62,2 °C.h (-7%)	-6h (-30%)	-5h (-8%)	-16h (-3%)

Pour la projection climatique 2050 :

T4 - R+4 - Ouest - Climat 2050 (RCP 8.5) - Degrés Heures (°C.h)



T4 - R+4 - Ouest - Climat 2050 (RCP 8.5) - Heures > 28°C



Evolution des indicateurs de confort suivant deux niveaux de SRI
– Climat 2050 (RCP 8.5)

SRI 5 → SRI 115	Degrés-Heures (°C.h)			Nombre d'heures > 28°C		
	Nantes	Paris	Marseille	Nantes	Paris	Marseille
Neuf	-7,6 °C.h (-44%)	-41,8 °C.h (-16%)	-196,4 °C.h (-9%)	-6h (-24%)	-32h (-15%)	-30h (-4%)
Existant	-52,8 °C.h (-43%)	-163,5 °C.h (-24%)	-324,3 °C.h (-11%)	-34h (-33%)	-38h (-11%)	-64h (-7%)
Existant (Toiture réhabilitée)	-12,8 °C.h (-20%)	-53,2 °C.h (-10%)	-108,7 °C.h (-4%)	-16h (-23%)	-14h (-5%)	-24h (-3%)

La CSFE, l'UPMF et l'UMGCCP ont commandé une étude spécifique au bureau d'études thermiques Pouget Consultants.

Cette étude porte sur l'impact des procédés réflectifs sur les besoins thermiques et le confort des occupants des bâtiments à usage résidentiel, tertiaire, commercial et industriel. Elle n'évalue pas l'impact sur le phénomène d'îlot de chaleur urbain à l'échelle d'un quartier. Elle apporte des données objectives sur un large périmètre d'analyse en France métropolitaine.

Réalisé par POUGET CONSULTANTS

