

Date : 25/06/2024

Réf : DEB/R2EB 2024-105-BeR/EH

Convention 2023 : Action 46 n° 2201419542

N° de commande : 70094524

Étude d'impact des peintures réfléchissantes mises en œuvre en toiture de bâtiments tertiaires

Version 1

DEMANDEUR DE L'ETUDE :

MINISTERE TRANSITION ECOLOGIQUE – DHUP

246, boulevard Saint-Germain
75007 PARIS

Auteurs

Approbateur

Benjamin RIOU - Laurent REYNIER - Frédéric BOUGRAIN -
Abdel LAKEL - Anouk MINON

Franck LEGUILLON

La reproduction de ce rapport d'étude n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral, sauf accord particulier du CSTB.

Ce rapport d'étude comporte 112 pages dont 14 pages d'annexes.

I. RESUME COURT.....	4
II. CONTEXTE.....	6
III. INTRODUCTION GENERALE.....	8
APTITUDE A L'EMPLOI DES PEINTURES REFLECHISSANTES.....	9
1. OBJET	10
2. DOMAINE D'EMPLOI	10
3. PRESCRIPTION RELATIVE AUX SUPPORTS	10
3.1. Type de support.....	10
3.2. Compatibilité avec un revêtement d'étanchéité existant.....	11
4. MISE EN ŒUVRE	11
4.1. Organisation de la mise en œuvre.....	11
4.2. Précautions d'emploi.....	11
4.3. Préparation des supports.....	11
4.4. Matériel d'application et équipements recommandés.....	12
4.5. Conditions d'application.....	12
5. METHODE D'EVALUATION	12
5.1. Les différents types d'évaluation réalisés sur les peintures ATec, ATEEx et certification).....	12
5.2. Caractéristiques d'identification de la peinture.....	13
5.3. Performance de la peinture.....	13
5.3.1. Propriétés thermo-réfléchissantes de la peinture.....	13
5.3.2. Performances mécaniques de la peinture.....	14
5.4. Évaluation de la compatibilité avec le revêtement d'étanchéité existant.....	15
6. SOLUTIONS ALTERNATIVES	16
IMPACT ENERGETIQUE.....	17
1. OBJECTIF	18
2. METHODOLOGIE	18
3. RESULTATS A L'ECHELLE PAROI	20
3.1. Plan de simulation.....	20
3.2. Résultats : cartographie de détermination des coefficients U et S.....	20
3.2.1. Cartographie de détermination des coefficients U.....	21
3.2.2. Cartographie de détermination des facteurs solaires S.....	23
4. RESULTATS A L'ECHELLE BATIMENT	25
4.1. Méthodologie retenue à l'échelle bâtiment.....	26
4.1.1. Le parc de bâtiments tertiaires.....	27
4.1.2. Sélection des bâtiments tests dans la base OPE.....	29
4.1.3. Les bâtiments retenus.....	31
4.2. Plan de simulation global.....	34
4.2.1. Indicateurs observés.....	34
4.2.2. Outil de calcul.....	35
4.2.3. Hypothèses du plan d'expérience.....	36
4.3. Résultats de l'analyse de l'étape n° 1 : à dire d'expert.....	41
4.4. Résultats de l'approche n° 2 dite numérique.....	43
4.4.1. Un impact limité au dernier étage d'une construction.....	43
4.4.2. Les niveaux d'impact.....	44
4.4.3. Un impact positif sur les besoins de froid et le confort d'été, mais négatif sur les besoins de chauffage.....	46
4.4.4. Remise en perspective.....	48
4.4.5. Un impact proportionné au « poids » de la toiture sur le bâtiment.....	49
4.4.6. Focus sur les bâtiments de type datacenters.....	51
4.4.7. Focus sur les bâtiments de type hôpitaux.....	52
4.4.8. Extrapolation à d'autres usages tertiaires.....	54
4.4.9. Extrapolation à d'autres solutions alternatives (exploitation des cartographies à l'échelle bâtiment).....	55
5. COMPARAISON A DES SOLUTIONS ALTERNATIVES : COM Anc	58
6. IMPACT A L'ECHELLE DU QUARTIER	60
7. CONCLUSIONS	61
IMPACT ECONOMIQUE.....	62
1. OBJECTIF	63
2. REVUE DE LA LITTERATURE	63
2.1. Les peintures réfléchissantes.....	63

RAPPORT

2.2. Les toitures végétalisées.....	64
2.3. Les panneaux photovoltaïques	67
3. LES PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS DES ENTRETIENS.....	67
3.1. Les peintures réfléchissantes	67
3.2. Les panneaux photovoltaïques	68
3.3. Les toitures végétalisées.....	70
4. ANALYSE ECONOMIQUE DE L'APPLICATION DE PEINTURES REFLECHISSANTES SUR DES BATIMENTS TYPES	70
4.1. Le principe de la valeur actuelle nette	70
4.2. Les hypothèses de calcul	71
4.3. Les résultats pour les bâtiments de bureaux	72
4.3.1. <i>Les bâtiments de bureaux neufs</i>	72
4.3.2. <i>Les bâtiments de bureaux anciens</i>	73
4.4. Les résultats pour les bâtiments de commerce.....	74
4.4.1. <i>Le commerce neuf</i>	74
4.4.2. <i>Le commerce ancien</i>	75
4.4.3. <i>Le commerce ancien avec des hypothèses extrêmes et non plus moyennes</i>	76
4.4.4. <i>Le commerce ancien sans climatisation dans le cas extrême</i>	77
4.5. Les résultats pour les bâtiments d'enseignement	78
4.5.1. <i>Les bâtiments d'enseignement neufs</i>	78
4.5.2. <i>Les bâtiments d'enseignement anciens</i>	79
5. LES TOITURES VEGETALISEES	80
6. LES PANNEAUX PHOTOVOLTAIQUES	82
7. CONCLUSION	85
IMPACT SANITAIRE	86
1. INTRODUCTION	87
2. LES PRINCIPAUX IMPACTS SANITAIRES	88
2.1. Les pigments	88
2.2. Les microplastiques	90
2.3. Les biocides.....	92
3. RISQUE POUR LE MILIEU NATUREL.....	94
3.1. Mécanismes de dégradation et cheminement jusqu'au milieu naturel	94
3.1.1. <i>Mécanisme de dégradation</i>	94
3.1.2. <i>Cheminement jusqu'au milieu naturel</i>	95
3.2. Méthode d'évaluation	97
4. SYNTHESE	97
ANNEXE 1 : DONNEES EXTRAITES DE LA BASE OPE.....	98
ANNEXE 2 : RESULTAT D'ECHANTILLONNAGE.....	99
ANNEXE 3 : INDICATEURS A L'ECHELLE BATIMENT.....	104
ANNEXE 4 : DETAIL DE LA METHODE D'INTERPOLATION BI-LINEAIRE.....	110
BIBLIOGRAPHIE.....	111

I. RESUME COURT

Les peintures réfléchissantes (sans fonction d'étanchéité) consistent en un matériau ou une combinaison de matériaux, dont au moins le composant principal est sous forme liquide. Ce sont des procédés d'isolation appliqués in situ sur les toitures terrasses à l'état liquide au-dessus d'un revêtement d'étanchéité (bitumineux, thermoplastique, PVC ou EPDM). Les peintures principalement rencontrées sur le marché sont les peintures acryliques.

L'utilisation de peintures réfléchissantes appliquées comme solution d'isolation des toitures connaît un fort développement en raison de sa facilité d'application et d'une forte demande en termes de solutions passives pour limiter le recours à la climatisation et améliorer le confort dans les bâtiments en période estivale. La DHUP a confié au CSTB la réalisation d'une étude visant à évaluer l'impact de la mise en œuvre de peintures réfléchissantes en toiture de bâtiments tertiaires neufs et existants. Au-delà de l'aspect énergétique, cette étude a porté sur plusieurs volets afin d'évaluer d'une manière large les enjeux associés à l'utilisation de ce procédé d'isolation.

Le premier enjeu à prendre en considération est l'aptitude à l'emploi du procédé. A ce jour, le procédé de peinture réfléchissante est classé en technique non courante. Quelques démarches d'évaluation technique ont bien été initiées mais à ce jour aucun avis technique ou ATEX n'a encore été délivré. Ces démarches permettent d'évaluer les caractéristiques techniques, performancielles et sanitaires du procédé ainsi que sa durabilité au regard des domaines d'application visés (compatibilité avec les supports visés, conditions de fabrication, condition de mise en œuvre, maintien des performances initiales...) et de rassurer les différents acteurs quant à l'utilisation de ce procédé. Cela signifie que le **manque de recul sur ce procédé ne permet pas de le positionner comme un procédé traditionnel bénéficiant d'une couverture assurantielle standard.**

La quantification des impacts énergétiques associés avec ce type de procédé constitue l'un des axes principaux de cette étude avec l'enjeu lié à l'analyse coût-bénéfice. L'analyse de l'impact énergétique menée sur la base d'une approche numérique a montré qu'à l'échelle de la paroi, la réflectivité de la peinture a surtout un impact prépondérant sur le facteur solaire en périodes chaudes et froides (indicateur permettant de quantifier la part de l'énergie solaire incidente transmise vers l'intérieur du bâtiment). En revanche, les peintures réfléchissantes n'ont quasiment aucun impact sur le coefficient de transmission thermique U_p ($W/m^2.K$) de la toiture et ne permettent donc pas de ce fait d'éviter les déperditions thermiques en période de chauffage.

À l'échelle du bâtiment, beaucoup d'enseignements peuvent être tirés de l'analyse réalisée :

- Dans le cas d'un bâtiment disposant de plusieurs étages, plus le nombre d'étage augmente, plus l'impact des peintures réfléchissantes appliquées en toitures sera faible.
- **Les impacts observés sont beaucoup plus importants dans le cas des bâtiments existants peu ou pas isolés que pour des bâtiments neufs généralement mieux isolés.**
- La mise en œuvre de la peinture réfléchissante induit une réduction des besoins de refroidissement de l'ordre de 16 à 23 % dans le cas des bâtiments existants étudiés et sur la base des hypothèses utilisées (zone climatique intermédiaire, revêtements existants de teinte moyenne et faible niveau d'isolation). Les gains les plus importants sont observés pour les bâtiments de commerce existants en raison de leur faible surface vitrée et leur faible isolation. Les réductions observées peuvent aller au-delà de 23 % dans le cas de revêtements existants très sombres (coefficient d'absorption $\alpha > 0,8$) et d'une zone climatique plus chaude type H3. Les gains en termes de besoins de refroidissement sont néanmoins à relativiser au regard de l'augmentation des besoins de chauffage induits par la réduction des apports solaires en période de chauffage, en particulier dans les zones climatiques où les périodes de chauffage sont les plus longues.
- La mise en œuvre des revêtements réfléchissants induit **une augmentation des besoins de chauffage** (moins d'énergie solaire à travers la toiture) **qui dans certains cas peuvent contrebalancer la réduction du besoin en refroidissement.** A titre d'exemple, l'étude a même montré un bilan négatif en termes de besoin énergétique net dans le cas du bâtiment de commerce existant en zone climatique H2b.

- La mise en œuvre des revêtements réfléchissants en toiture a montré **un gain systématique sur le confort d'été dans le bâtiment** avec un nombre de Degré Heures (DH en °C.h) diminuant de 14 % à 20 % dans le cas des bâtiments existants selon les situations étudiées. Les gains sur l'indicateur DH sont plus limités pour les bâtiments neufs puisqu'ils diminuent de 3 % à 16 %.
- L'impact du revêtement réfléchissant dépend beaucoup du poids relatif des apports solaires entrant dans le bâtiment à travers les parois vitrées (ou translucides). Par exemple, une diminution des gains sur l'indicateur DH de -12 % à -8 % a été observée sur le bâtiment d'enseignement récent lors du passage d'une surface vitrée faible à une surface vitrée élevée. Le même constat a été fait lorsque le taux de vitrage en toiture du bâtiment passe d'un niveau faible à un niveau élevé avec une baisse du gain relatif sur l'indicateur DH de -16 % à -7 % pour le bâtiment de commerce récent. Ces observations sont extrapolables aux autres bâtiments.
- L'impact du revêtement réfléchissant dépend du niveau d'apport interne dans le bâtiment. Dans le cas d'apports internes conventionnels, le gain relatif sur l'indicateur DH est de 12 % à 16 % selon les types de bâtiments tertiaires. Le gain relatif est de 12 % à 13 % sur les besoins de froid. Dans le cas d'apports internes majorés (par exemple pour les data centers), le gain relatif sur l'indicateur DH constaté est de 5 % à 6 % et le gain relatif sur le besoin de froid est de 2 % à 3 %. Les bâtiments disposant d'apports internes importants restent toutefois de bons candidats à l'application de revêtement réfléchissant dans la mesure où ils ont des besoins de chauffage limités.

L'intérêt en termes de gains énergétiques doit cependant être évalué au regard de la **réalisation d'un entretien régulier de la toiture afin d'assurer le maintien de la performance initiale de la peinture**. Sans ces opérations d'entretien, les gains énergétiques et de confort ne pourront pas être maintenus au-delà de quelques années même dans les situations les plus propices à l'utilisation de la peinture.

Aussi, pour les bâtiments existants dont le niveau d'isolation des toitures est faible voire inexistant, il ressort de cette étude que **la mise en œuvre d'une isolation thermique sera beaucoup plus efficace du point de vue énergétique que l'application d'une peinture réfléchissante**. Le constat est le même pour les solutions alternatives comme la végétalisation et l'ajout de panneaux photovoltaïques. En effet, l'isolation thermique apporte les mêmes bénéfices en période estivale mais permet en plus de limiter les déperditions thermiques en période de chauffage. Dans le cas où des contraintes techniques limitent les épaisseurs des isolants, l'association des peintures réfléchissantes en complément de l'isolation pourraient être un moyen intéressant de combiner les effets bénéfiques des deux solutions.

Sur le plan économique l'ajout d'une peinture réfléchissante en toiture ne s'avère pertinent que dans certaines situations très particulières présentant un ensemble de conditions favorables. En effet, l'analyse économique réalisée a montré que **sur des bâtiments présentant des caractéristiques moyennes, les coûts dépassent largement les gains potentiels** sur la base d'une VAN¹ calculée sur 30 ans. Ceci s'explique en grande partie par la surconsommation résultant de l'application de la peinture en période de chauffage qui n'est généralement pas prise en compte dans les bilans économiques. Cependant, en s'éloignant de l'hypothèse d'un bâtiment moyen et en ciblant des bâtiments très spécifiques qui combinent un ensemble de conditions favorables (zone H3, toiture très sombre, niveau d'isolation minimal en toiture, surface vitrée minimale...) le bilan économique devient plus intéressant mais ne compense pas totalement les coûts d'installation et d'entretien.

Le seul cas de figure parmi l'ensemble des cas étudiés conduisant à un bilan économique positif est celui consistant à combiner à la fois les caractéristiques favorables du bâtiment et la suppression des coûts liés à l'entretien et l'installation d'une climatisation. Le caractère réaliste de ce scénario reste toutefois discutable dans la mesure où malgré l'application de la peinture, le nombre de degrés-heures reste très important en zone chaude et ne permettra probablement pas de s'affranchir d'une climatisation (cf. [Tableau 27](#))

¹ Valeur Nette Actualisée (cf. chapitre Impact économique - § 4.1)

Le même constat est fait dans le cas de la solution de végétalisation de la toiture pour laquelle le bilan économique semble encore moins intéressant. Pour cette dernière, et à la différence des peintures, un ensemble de gain économique lié aux externalités (essentiellement la valorisation foncière) doivent néanmoins être pris en compte. La solution PV semble être celle des 3 solutions étudiées présentant le bilan économique le plus intéressant.

Enfin, sur le plan sanitaire, **les peintures réfléchissantes, au même titre que les revêtements courants, contiennent en quantité plus ou moins importante des éléments chimiques (microplastique, pigments) susceptibles d'avoir un impact sur l'environnement et la santé.** Leur utilisation en revêtement extérieur de paroi les place dans une situation d'exposition à la dégradation par les agents climatiques comme le rayonnement solaire, la pluie, l'abrasion naturelle ou artificielle. Au même titre que d'autres produits du bâtiment, il est indispensable d'accompagner leur mise sur le marché par un dispositif de déclaration des compositions permettant la réalisation de contrôles par les autorités sanitaires. Par ailleurs, leur utilisation en toiture doit être conditionnée à une vérification des installations de collecte et de traitements des eaux pluviales afin d'éviter un rejet en trop forte concentration dans l'environnement. L'élaboration de protocole normalisé permettant l'évaluation des constantes de relargage des composés chimiques sous l'effet des sollicitations climatiques est nécessaire afin de favoriser l'utilisation de produits peu impactant.

Au vu de ces éléments, la généralisation de l'application de ces peintures en toiture sur les bâtiments tertiaires ne semble pas une solution efficace pour adapter les bâtiments dans un contexte de réchauffement climatique. Les peintures réfléchissantes peuvent présenter un intérêt dans des cas spécifiques, notamment en zone chaude (pourtour méditerranéen, outre-mer), et pour des bâtiments faiblement isolés à faible surface vitrée (commerces, entrepôts, data center). Par ailleurs, le relargage d'éléments chimiques dans les eaux de pluie représente un enjeu sanitaire qui doit être pris en compte pour accompagner la mise sur le marché de tels produits.

II. CONTEXTE

Le réchauffement climatique constitue l'un des défis majeurs de notre époque, avec des températures mondiales en hausse constante. Cette tendance entraîne des conséquences néfastes telles que des vagues de chaleur plus fréquentes et intenses, mettant en péril le confort des habitants et augmentant la demande énergétique pour le refroidissement des bâtiments.

Face à ce défi, les entreprises spécialisées dans les peintures réfléchissantes revendiquent que l'utilisation de leurs produits comme revêtement extérieur sur les bâtiments peut représenter une solution innovante et écologique. En appliquant ces revêtements spéciaux sur les toits et les murs des bâtiments, elles affirment qu'il est possible de réduire l'absorption de la chaleur solaire, maintenant ainsi des températures intérieures plus fraîches. En outre, par rapport à d'autres solutions concurrentielles (panneaux photovoltaïques et toitures végétalisées), leur mise en place serait rapide et peu coûteuse.

Selon leurs affirmations, cette approche pourrait contribuer non seulement à améliorer le confort des occupants, mais aussi à réduire la dépendance aux systèmes de refroidissement énergivores, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre.

Cela éviterait notamment de recourir à la climatisation qui est responsable de 5 % des émissions de CO₂ du secteur du bâtiment et dont le marché enregistre une croissance constante tant dans le résidentiel que dans le tertiaire (ADEME, 2021). Le taux d'équipement des ménages est ainsi passé de 14 % en 2016 à 25 % en 2020. Ce taux est plus élevé dans les zones du sud de la France (cf. [Figure 1](#)). Dans le tertiaire, la progression est similaire mais contrastée selon les secteurs. Ce sont les commerces et les bureaux qui enregistrent les taux d'équipement les plus élevés (cf. [Figure 2](#)).

Figure 1 : Taux d'équipement des ménages en climatisation selon leur zone climatique de résidence (Source : ADEME, CODA Stratégies, 2021)

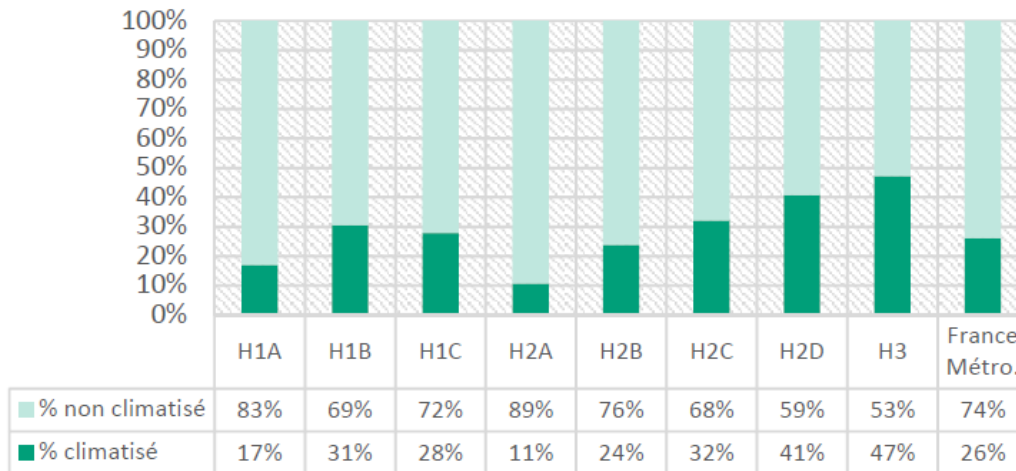
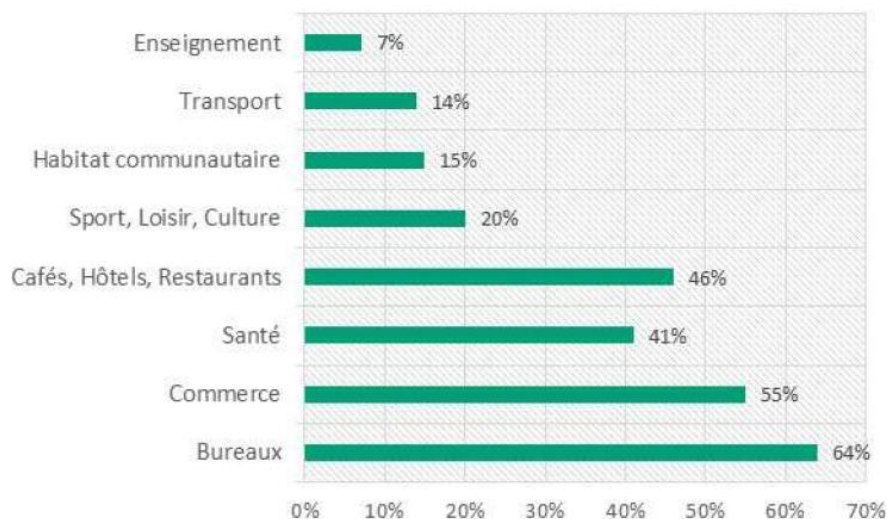


Figure 2 : Pourcentage des surfaces climatisées dans les différents secteurs tertiaires (Source : ADEME, CODA Stratégies, 2021)



Pour ces deux secteurs, il est essentiel de mettre en place des solutions alternatives, parmi lesquelles peuvent figurer les peintures thermo-réfléchissantes. Ce concept de « Cool Roof » (« toiture fraîche ») qui s'est initialement développé aux Etats-Unis représente une option prometteuse, mais il est crucial de mener des études scientifiques indépendantes et neutres pour évaluer leur efficacité réelle dans les différents domaines (énergie, environnement, santé, économie).

Par ailleurs, la loi n° 2023-175 du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables, énonce dans son article 45 l'obligation pour le Gouvernement de remettre au Parlement un rapport relatif à l'opportunité de couvrir les toitures des bâtiments non résidentiels d'un revêtement réfléchissant.

C'est dans ce contexte que la DHUP a demandé au CSTB d'évaluer l'intérêt de couvrir les toitures de l'ensemble des bâtiments non résidentiels (neufs et existants) d'un revêtement réfléchissant sur la base d'une analyse technico-économique.

III. INTRODUCTION GENERALE

L'étude conduite par le CSTB porte sur plusieurs aspects tels que l'aptitude à l'emploi, la performance énergétique, l'impact économique et l'impact sanitaire afin d'apporter un éclairage indépendant sur les enjeux associés à ces différents sujets. Chacun de ces sujets est détaillé dans un chapitre spécifique du présent rapport.

L'aptitude à l'emploi regarde les justifications nécessaires à fournir sur les enjeux performanciers et techniques associés à la mise en œuvre des procédés de peintures réfléchissantes. Il s'agit d'étudier les conditions nécessaires au déploiement de ce type de procédé en s'appuyant notamment sur les procédures d'évaluation existantes ou en cours de développement.

L'étude d'impact énergétique consiste à fournir une évaluation quantifiée de l'impact des peintures réfléchissantes sur les besoins énergétiques des bâtiments et d'identifier les paramètres susceptibles d'influencer cet impact. Les résultats d'impact énergétique servent de base à la réalisation des calculs économiques.

Le volet impact économique consiste à fournir une analyse coût/bénéfices induit par la mise en œuvre des peintures réfléchissantes en apportant également quelques éléments de comparaison avec d'autres solutions alternatives.

Le volet impact sanitaire donne un éclairage sur les composants mis en œuvre dans les procédés de peintures réfléchissantes et leur potentiel impact sur l'environnement et la santé.

Les analyses ont été réalisées sur la base de modélisations pour quantifier les impacts énergétiques, suivies d'analyses bibliographiques et d'entretiens avec les acteurs pour évaluer l'impact économique. Des analyses à dire d'experts du CSTB, notamment sur les enjeux liés à l'évaluation technique (aptitude à l'emploi et impact sanitaire), ont également été conduites.

L'analyse n'a cependant pas examiné l'ensemble des aspects. En particulier, le volet carbone n'a pas été traité de manière quantifiée. Par ailleurs, l'analyse se limite aux connaissances disponibles à la date de rédaction du présent rapport. En effet, l'analyse économique ne prend pas en compte certains effets bénéfiques induits par l'amélioration du confort perçu par les occupants pouvant aller au-delà des simples gains énergétiques, ni certains gains économiques indirects difficilement quantifiables. Les calculs numériques réalisés permettent d'obtenir de bons ordres de grandeurs d'impact relatif (avec/sans peinture) sur les gains énergétiques pour des bâtiments moyens et représentatifs. Des approches numériques plus ciblées sur des bâtiments présentant un ensemble de caractéristiques favorables permettraient de quantifier plus précisément les situations les plus favorables. Aussi, pour compléter cette analyse, la réalisation de mesures expérimentales sur des démonstrateurs instrumentés serait un moyen d'obtenir des résultats dans des conditions d'usage réelles et de compléter l'analyse numérique menée dans cette étude.

Enfin, le gain en termes de durabilité des revêtements d'étanchéité qui pourrait résulter de l'application des peintures réfléchissantes n'a pas été évalué dans le cadre de cette étude. Les écarts de température, qui sont une source importante de sollicitation mécanique sur les membranes d'étanchéités et susceptibles de limiter leur durée de vie pourraient être fortement réduits par l'application de revêtements réfléchissants (peintures ou membranes), limitant ainsi ces écarts de température.

APTITUDE A L'EMPLOI DES PEINTURES REFLECHISSANTES

1. OBJET

La fonction principale des peintures réfléchissantes est la limitation des apports solaires à travers les toitures en conditions estivales grâce à leurs propriétés thermo-réfléchissantes. Néanmoins, pour que cette fonction soit assurée dans le temps, la performance intrinsèque initiale de la peinture doit être complétée d'une évaluation de sa résistance aux sollicitations climatiques et/ou mécaniques qui peuvent induire une dégradation de l'état de surface (fissuration, décollement, abrasion...) à plus ou moins long terme. L'effet des sollicitations doit être évalué en tenant compte du support visé afin de s'assurer de la compatibilité de la peinture avec ce dernier.

L'analyse réalisée a consisté à explorer d'une manière large et la plus exhaustive possible, les performances attendues et les conditions nécessaires pour justifier l'aptitude à l'emploi des peintures réfléchissantes appliquées sur des revêtements d'étanchéité. Cette analyse s'appuie sur l'expérience du CSTB en matière d'évaluation technique sur les procédés de peintures réfléchissantes. Ce travail s'inscrit dans un contexte de fort développement de la filière et d'un recul encore relativement faible de l'utilisation de peintures réfléchissantes sur des revêtements de toitures neufs ou existants. Un ensemble de performances attendues a été identifié et listé dans le présent document, ainsi que les méthodes d'évaluation disponibles.

2. DOMAINE D'EMPLOI

L'application des peintures réfléchissantes (ne revendiquant pas de fonction d'étanchéité) peut se faire sur différents types de supports comme les toitures-terrasses accessibles ou non, les toitures terrasses techniques et les toitures inclinées. Elles peuvent être employées dans le cas de travaux neufs ou en cas de rénovation de la toiture, généralement sans réfection complète de la toiture.

Les domaines d'emploi revendiqués peuvent couvrir les climats de plaine ou de montagne en France métropolitaine mais également les départements ou région d'outre-mer (DROM).

3. PRESCRIPTION RELATIVE AUX SUPPORTS

3.1. Type de support

Les types de supports rencontrés dans le cas de peinture réfléchissante sont les suivants :

- Support lisse : bac acier laqué, polycarbonate, polyester fibré, acier, aluminium et zinc ;
- Support sablé ou poreux : membrane bitumineuse sablée, béton, tuiles et ardoises naturelles, fibrociment ;
- Support pailleté ou très poreux : membrane bitumineuse pailletée ;
- Support en revêtement d'étanchéité synthétique : PVC, TPO ou EPDM.

Seule la pose sur revêtement d'étanchéité (membrane bitumineuse, support PVC, TPO et EPDM) est traitée dans cette partie « aptitude à l'emploi » représentant l'application principale revendiquée pour ce type de procédé.

La pente des supports recommandée est généralement supérieure à 3 % afin de faciliter le lessivage naturel et d'éviter la stagnation d'eau. Les peintures peuvent également être appliquées sur des parties plus inclinées voire totalement verticales ce qui est le cas des relevés de toitures et éventuellement des éléments de façades.

Des pentes inférieures à 3 % peuvent être rencontrées, notamment dans le cas de rénovation. Dans ce cas, un nettoyage devra être préconisé par le fabricant afin d'éviter l'encrassement de la peinture (cf. paragraphe 5.3.1).

L'application de peinture thermo-réfléchissante dans le cas d'une pente nulle n'est pas préconisée puisque ce type de toiture comporte souvent des zones de stagnation d'eau, qui ne permettent pas de garantir la durabilité de la peinture réfléchissante dans le temps (création de zones d'encrassement privilégiées cf. paragraphe 5.3.1).

3.2. Compatibilité avec un revêtement d'étanchéité existant

Dans le cas de pose sur un revêtement d'étanchéité existant, la compatibilité doit être évaluée afin de vérifier la durabilité du procédé et que la mise en œuvre du revêtement réfléchissant ne remet pas en cause l'étanchéité et la durabilité du revêtement support.

Les méthodes d'évaluation sont décrites au paragraphe 5.4.

4. MISE EN ŒUVRE

4.1. Organisation de la mise en œuvre

Les peintures sont généralement pulvérisées ou étalées au rouleau sur le support en une ou plusieurs couches en respectant des conditions de pose particulières conformément aux prescriptions des fabricants.

La mise en œuvre est assurée par les entreprises dont les compagnons ont reçu une qualification individuelle par le fabricant.

Ces entreprises disposent du matériel utile à la mise en œuvre, aux contrôles des supports, aux contrôles en cours d'exécution et aux contrôles en fin de chantier.

Les moyens de formation et de qualification des entreprises, les conditions d'application et les contrôles à réaliser sont évalués dans le cadre d'une évaluation de type ATEEx ou ATec.

4.2. Précautions d'emploi

Les fiches de sécurité des composants du procédé sont disponibles sur demande auprès du fabricant.

Sont fournis ci-après quelques principes généraux à respecter lors de la mise en œuvre :

- Les applicateurs doivent porter des équipements de protection individuelle (lunettes de soleil, gants, masque, vêtement de travail). Tout équipement de protection individuelle mentionné dans les fiches de sécurité est obligatoire ;
- Malaxer le produit pendant quelques minutes avant utilisation. Ne pas diluer ou mélanger à une autre résine ;
- Ne pas laisser les seaux ouverts ou en plein soleil au cours de l'application ;
- Ne pas rejeter dans l'environnement ;
- Tout élément souillé (emballage, nettoyage) doit être traité selon les réglementations en vigueur ;
- Nettoyer le produit frais à l'eau.

Dans le cas des produits pulvérisés, des précautions complémentaires sont à prendre en compte :

- La projection de systèmes par temps de vent peut nécessiter des dispositions particulières, telles que la pose de bâches, afin de protéger les équipements et bâtiments limitrophes de la toiture à peindre ;
- Veillez à ce qu'aucun véhicule ou éléments ne soient situés au bas de la toiture du bâtiment et que les protections contre les chutes soient en place.

4.3. Préparation des supports

La surface doit être saine, propre et sèche pour permettre une bonne adhérence, il faut veiller à :

- Éliminer les parties non adhérentes, les mousses et moisissures ;
- Nettoyer et dégraisser si nécessaire. Les moyens de nettoyage (produits et méthodes) doivent être en adéquation avec le support (pas de produits chimiques sur les membranes synthétiques ou d'étanchéité liquides par exemple) ;

- Protéger les surfaces qui ne doivent pas être revêtues ;
- Vérification de l'adhérence si nécessaire.

Les conditions de réception du support doivent être données par le fabricant. Aujourd'hui, pour la plupart des procédés de peintures thermo-réfléchissantes les conditions suivantes relatives aux supports sont préconisées pour la mise en œuvre :

- Ne pas appliquer sur support gelé ou condensant ;
- Ne pas appliquer sur un support humide (taux d'humidité maximum à ne pas dépasser) ;
- D'autres préconisations peuvent être requises en fonction des procédés.

4.4. Matériel d'application et équipements recommandés

À titre indicatif, sont donnés ci-après, le type de matériel et le type d'équipement généralement préconisé :

- Pistolet sans air : buses de diamètre 19 à 23 millièmes de pouce et filtres de 50 "mesh"/maille. Mode d'application préconisé pour les grandes surfaces ;
- Rouleau polyamide texturé de 18 mm ;
- Brosse spéciale acrylique (petites surfaces uniquement) ;
- Airless : pompe thermique ou électrique avec une longueur de tuyau suffisante, un pistolet avec rallonge.

Un nettoyage des outils à l'eau, immédiatement après l'application est recommandé, sans rejet dans l'environnement.

4.5. Conditions d'application

Les conditions d'application doivent être données par le fabricant.

Aujourd'hui la plupart des systèmes recommandent les conditions d'applications suivantes :

- La température ambiante doit être comprise entre + 5 °C et + 35 °C ;
- Ne pas appliquer dans des zones où l'eau stagne souvent ;
- Respecter un délai de séchage entre chaque couche ;
- Ne pas appliquer s'il existe un risque d'averse dans les 24 heures.

D'autres préconisations peuvent être requises en fonction des systèmes.

5. METHODE D'EVALUATION

5.1. Les différents types d'évaluation réalisés sur les peintures ATec, ATEx et certification)

L'évaluation du procédé a pour but de s'assurer de l'aptitude à l'emploi du procédé, de sa tenue dans le temps et dans les conditions d'application préconisées par le fabricant, de sa compatibilité avec le support et permet de s'assurer de sa constance de fabrication.

Les conditions de mise en œuvre, la faisabilité, les contrôles avant, en cours et après l'exécution et la faisabilité, ainsi que la formation des entreprises sont également évalués.

Il existe plusieurs types d'évaluation possibles sur les peintures thermo-réfléchissantes :

- L'Avis Technique ou ATec désigne l'avis formulé par un groupe d'experts représentatifs des professions sur l'aptitude à l'emploi des procédés innovants de construction. Les Avis Techniques sont délivrés par la Commission Chargée de Formuler les Avis Techniques, rattachée au ministère en charge de la construction et de l'habitation ;

- L'Appréciation Technique d'Expérimentation ou ATEEx est une procédure rapide d'évaluation technique formulée par un groupe d'experts sur tout produit ou procédé innovant. Cette évaluation permet des premiers retours d'expérience sur la mise en œuvre de produits ou procédés en préalable à un Avis Technique. Elle permet également de valider des conceptions innovantes.

À ce jour, il n'y a pas d'ATec/DTA publié mais il existe des ATEEx sur les peintures thermo-réfléchissantes associées à des revêtements d'étanchéité.

Des certifications sont également en cours de développement au CSTB avec les acteurs du marché pour caractériser les propriétés thermo-réfléchissantes des peintures ou des revêtements.

La certification aura pour but d'attester que les caractéristiques de ces produits sont conformes à celles décrites dans un référentiel, établi avec l'ensemble des parties prenantes. Ce signe de qualité visera à donner confiance aux utilisateurs dans les atouts des procédés, en lien avec des attentes ciblées du marché.

5.2. Caractéristiques d'identification de la peinture

Les essais d'identification sont la première étape de l'évaluation. Ils permettent de fixer les caractéristiques du procédé.

Certaines caractéristiques sont contrôlées en usine par des auto-contrôles qui permettent de s'assurer de la constance de fabrication des produits. Les caractéristiques demandées dans le cas des peintures thermo-réfléchissantes sont les suivantes :

- Aspect ;
- Epaisseur ;
- Teinte (RAL) ;
- Densité ;
- Extrait sec ;
- Teneur en COV ;
- Conditionnement ;
- Conservation ;
- Temps de séchage ;

Ces caractéristiques sont mesurées à température et humidité fixée à 23 °C et 55 % H.R.

5.3. Performance de la peinture

5.3.1. Propriétés thermo-réfléchissantes de la peinture

Elle est essentiellement obtenue par les propriétés de surface de la peinture qui sont sa réflectivité et son émissivité. Elle contribue d'une manière plus ou moins significative selon les situations à la limitation des apports solaires dans le local situé sous la toiture. La performance thermo-réfléchissante initiale peut néanmoins se dégrader de manière plus ou moins importante sous l'effet des sollicitations climatiques extérieures (pluie, variations de température, UV...), environnementales (pollution...) ou mécaniques (variation dimensionnelle du support, retrait, chocs...).

Les performances principales évaluées pour vérifier du caractère thermo-réfléchissant d'une peinture sont les suivantes :

- La réflectance solaire (ou son pendant, l'absorption solaire) ;

Pour des parois opaques (pas de transmission directe), la réflectance solaire (ρ) est liée à l'absorption solaire par la relation $\rho = 1 - \alpha$ où α est le coefficient d'absorption solaire. Pour une paroi soumise à un flux solaire incident (dans le spectre énergétique, de 0,3 μm à 2,5 μm de longueur d'onde), le coefficient d'absorption solaire est une propriété de surface qui représente la somme des flux énergétiques absorbés pour chaque longueur d'onde. La part qui est

réfléchi (réflectance solaire) peut se déduire par calcul. Ces caractéristiques peuvent être mesurées selon les normes NF EN 410 et NF EN 14500. A défaut, on trouve aussi dans les règles Th-Bât annexée à l'arrêté de la RE2020 des valeurs présentant une équivalence entre des teintes de couleur et un coefficient d'absorption.

- L'émissivité thermique ;

L'émissivité ϵ est une propriété radiative de surface. Dans le milieu du bâtiment, l'émissivité se définit sur le spectre « grande longueur d'onde », c'est-à-dire de $5\mu\text{m}$ à $50\mu\text{m}$. Elle est le rapport entre le flux radiatif émis par un corps à une température donnée, et le flux radiatif émis par un corps noir à la même température. La plupart des matériaux ont une émissivité proche de 0,9, mais certains matériaux ont des émissivités beaucoup plus faibles, allant jusqu'à 0,03. Cette grandeur peut être mesurée par exemple en suivant la norme NF EN 15976.

- L'Indice de Réflectance Solaire (SRI).

L'Indice de Réflectance Solaire (SRI) est un indicateur performanciel issu de la norme américaine ASTM E1980. Il permet d'inclure dans un seul indicateur l'impact du coefficient d'absorption α et de l'émissivité ϵ . Même si le SRI est présenté sur une échelle de 0 à 100, certains matériaux peuvent être négatifs (revêtements noirs et très peu émissifs) ou supérieurs à 100 (par exemple de nombreuses peintures blanches avec une application « cool roof » atteignent un SRI de 110, elles ne sont pas pour autant « plus blanches que blanches »). Il se calcule à partir des deux premières grandeurs et d'hypothèses complémentaires.

Un essai de résistance aux UV de la peinture doit être réalisé pour attester de la tenue des performances thermo-réfléchissantes après exposition aux UV.

La principale cause de chute des performances thermo-réfléchissantes du revêtement est l'encrassement dû à la poussière qui se dépose au cours du temps.

Des études ont montré que l'effet de la poussière sur la réflectance solaire des peintures se produit principalement au cours des trois premières années d'utilisation. En raison des chutes de poussière, la réflectance solaire des peintures thermo-réfléchissantes peut être réduite de 0,15 au cours de la première année d'utilisation. A titre de comparaison la valeur de la réflectance initiale des peintures thermo-réfléchissantes peut aller de 0,75 à 0,95 en fonction des compositions et pigments utilisés. Le carbone noir et le carbone organique sont deux contaminants identifiés comme fortement adsorbés par les peintures et qui réduisent leur réflectance au rayonnement solaire. Différentes méthodes de nettoyage existent et peuvent éliminer une partie de ces contaminants [0].

Un des enjeux des méthodes d'évaluation sera de déterminer la sensibilité des revêtements thermo-réfléchissants vis-à-vis de l'encrassement et l'efficacité des méthodes de nettoyage. Néanmoins, à ce jour, il n'existe pas d'essai normalisé pour évaluer cette caractéristique ainsi que l'efficacité du nettoyage. Un projet de développement d'une méthode d'évaluation est en cours au CSTB afin de caractériser cette performance.

Afin de limiter le risque d'encrassement, des préconisations sur la pente minimale des supports favorisant le nettoyage naturel ou un nettoyage artificiel du revêtement peuvent être proposées par le fabricant.

Le nettoyage peut se faire à l'eau à basse pression, éventuellement à l'aide d'une brosse. Il convient de s'assurer par essais ou évaluation de l'expérience, que ce nettoyage recommandé permet de garder les propriétés thermo-réfléchissantes annoncées sans dégrader la peinture ou son support.

5.3.2. Performances mécaniques de la peinture

Il est nécessaire d'évaluer la tenue de la peinture vis-à-vis des possibles sollicitations mécaniques extérieures.

Ces essais permettent de reproduire les différentes sollicitations rencontrées en toiture :

- La perméabilité à l'eau liquide de la peinture permet de vérifier la compatibilité de la peinture pour une pose en extérieur exposée aux intempéries ;

- Les essais de résistance à l'abrasion de la peinture permettent de vérifier la tenue de la peinture dans le temps sous l'effet des frottements en phase d'exploitation ;
- Les essais d'adhérence de la peinture sur le support permettent de vérifier l'absence de décollement du support ;
- Les essais de résistance au poinçonnement statique permettent de vérifier le comportement de la peinture dans le cas d'un élément posé sur la toiture ;
- Les essais de poinçonnement dynamique simulent la chute d'un objet ;
- L'essai d'allongement à la rupture permet de vérifier la capacité de la peinture à s'étirer et suivre les possibles mouvements du support.

Ces performances sont vérifiées dans le cas d'une application de la peinture à sa température minimale et maximale d'utilisation.

Ces essais permettent également de fixer des caractéristiques mécaniques du produit qui pourront être vérifiées par essais dans le temps pour s'assurer de la constance de fabrication.

Ces mêmes essais doivent être réalisés à l'état vieilli pour vérifier la durabilité du produit notamment vis-à-vis des aléas climatiques.

Les échantillons vont subir un vieillissement artificiel permettant de simuler les aléas climatiques en toiture.

Ces vieillissements sont principalement des vieillissements en étuve (6 mois à 70 °C), des vieillissements par expositions aux UV à l'état sec ou en présence d'humidité ou des vieillissements par exposition à l'eau chaude.

5.4. Évaluation de la compatibilité avec le revêtement d'étanchéité existant

En complément de l'évaluation des performances sur la peinture, il est nécessaire de vérifier la compatibilité entre la peinture thermo-réfléchissante et le revêtement d'étanchéité existant, pour d'une part s'assurer de la tenue dans le temps de la peinture thermo-réfléchissante mais également s'assurer qu'il n'existe pas d'interactions négatives entre les deux produits qui pourraient remettre en cause l'étanchéité du revêtement support.

L'adhérence de la peinture sur le revêtement à l'état neuf est vérifiée, ainsi que la stabilité dimensionnelle de la peinture sur le revêtement. Cela permet de s'assurer de la compatibilité des différents mouvements des composants et de la résistance au poinçonnement statique, afin de vérifier que le couple peinture/revêtement conserve les mêmes performances sous une charge statique.

L'adhérence de la peinture sur le revêtement d'étanchéité doit également être vérifiée à l'état vieilli, après une immersion dans l'eau chaude dans le cas où la pente de la toiture est inférieure à 3 %, pour simuler une zone de rétention d'eau, et/ou après exposition aux UV.

Des essais à état vieilli spécifiques au type de revêtement support sont également nécessaires pour vérifier la compatibilité et la durabilité du couple peinture/revêtement :

- Dans le cas de revêtements bitumineux, des essais de pliage à froid et de tenue à la chaleur sont demandés après un vieillissement de 6 mois à 70 °C et après exposition à l'eau chaude ou aux UV ;
- Dans le cas de revêtements PVC, qui sont sujets à une perte de plastifiant au cours du temps, c'est la variation de masse de l'échantillon avant et après vieillissement en plus de la tenue au pliage à froid qui sera mesurée ;
- Dans le cas d'autres revêtements d'étanchéité dont la chimie est particulière à chaque procédé, tels que les revêtements en EPDM, TPO ou systèmes liquides, des essais particuliers sont demandés au cas par cas. Ces compatibilités sont propres à chaque produit et ne permettent pas de valider tous les produits de même nature.

6. SOLUTIONS ALTERNATIVES

Il existe des revêtements d'étanchéité qui revendiquent la fonction réfléchissante. La « couche réfléchissante » fait partie intégrante du procédé.

Par exemple :

- Etanchéité bitume autoprotection ardoisée avec paillettes claires aux fonctions réfléchissantes ;
- Etanchéité TPO – FPO de couleur blanche ;
- Etanchéité PVC-P de couleur blanche ;
- Etanchéité EVA de couleur blanche ;
- Système d'Etanchéité Liquide PMMA avec couche de finition réfléchissante ;
- Système d'Etanchéité Liquide PU avec couche de finition réfléchissante.

Ces procédés sont évalués dans le cadre de leur avis technique ou ATEx en tant que procédés d'étanchéité de toiture. Dans ce cas, leurs propriétés d'étanchéité et de durabilité des procédés sont évalués suivant les différents référentiels par type de produits et les propriétés thermo-réfléchissantes sont évaluées suivant le paragraphe [5.3.1](#).

IMPACT ENERGETIQUE

1. OBJECTIF

La mise en place d'une peinture ou d'un revêtement réfléchissant sur une toiture a pour impact de modifier sa capacité à transmettre le flux solaire à l'intérieur du bâtiment, en abaissant sa température de surface. Cette caractéristique des revêtements réfléchissants est bénéfique pour les bâtiments en termes de confort thermique en période estivale, puisqu'il va conduire à diminuer les transferts de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur.

À l'opposé, en hiver, cette baisse du facteur solaire va diminuer la récupération des apports solaires via la toiture, et donc provoquer une augmentation des besoins de chauffage.

Dans le cadre de cette étude, les objectifs sont les suivants :

- **Se doter d'éléments chiffrés** (sur les besoins énergétiques, sur le confort d'été) d'impact de la mise en place d'une peinture ou d'un revêtement réfléchissant ;
- **Identifier les types de bâtiments tertiaires les plus favorables** à l'application d'une peinture ou d'un revêtement réfléchissant en toiture.

Plus encore, certains calculs alimenteront le volet économique (se basant sur les consommations d'énergies) pour calculer un bilan de ces solutions, incluant la maintenance, en comparaison avec d'autres solutions alternatives (panneaux photovoltaïque, toitures végétalisées, etc.).

2. METHODOLOGIE

L'étude de l'impact énergétique de la mise en œuvre d'un revêtement réfléchissant sur les toitures des bâtiments tertiaires s'étend sur plusieurs échelles :

- **À l'échelle du produit (peinture ou revêtement réfléchissant)** : la peinture ou le revêtement réfléchissant peut être thermiquement caractérisé par deux grandeurs :
 - o Le coefficient d'absorption α représentant la part de rayonnement solaire directement absorbé en chaleur par le produit (dans le spectre énergétique), de 0 à 1 et sans unité ;
 - o L'émissivité ε représentant la capacité du produit à rayonner en infrarouge vers son environnement à une température donnée. L'émissivité est le rapport entre le rayonnement du produit et le rayonnement d'un corps noir parfait, de 0 à 1 et sans unité.

Le produit est ensuite intégré à un procédé constructif en toiture, lui-même caractérisé par les grandeurs thermiques suivantes :

- **À l'échelle de la paroi (toiture dans son ensemble)** :
 - o Le coefficient de déperdition U ($W/m^2 \cdot K$) représentant le flux thermique traversant la paroi pour un écart de température d'un degré de part et d'autre de la paroi (par m^2 de surface du volume déperditif). Plus le U est faible et plus le procédé est isolant. Ce coefficient est très dépendant de la résistance thermique (et cette dépendance suit une loi inverse) ;
 - o Le facteur solaire S représentant la part du flux solaire transmis à l'intérieur du bâtiment pour un flux solaire incident donné sur la face extérieure du bâtiment, de 0 à 1 et sans unité. Il permet de caractériser à quel point le procédé est « isolé » du rayonnement solaire. Un facteur solaire faible concourt au confort d'été.

Ces deux grandeurs permettent de faire le lien avec la caractérisation à l'échelle du bâtiment. Celles-ci dépendent de nombreux paramètres (niveau d'isolation, pont thermiques intégrés, coefficient d'absorption solaire, etc.)

- **À l'échelle du bâtiment** :
 - o Géométrie : empreinte au sol, nombre d'étages, surface des murs et de toiture, surface vitrée ;
 - o Localisation et zone météorologique (on se limite ici à la métropole) ;
 - o Orientation des façades du bâtiment ;

RAPPORT

- Composition des parois (structure porteuse, niveaux d'isolation, type de fenêtre, traitement des ponts thermiques) ;
- Usage et occupation (type de public occupant le bâtiment, horaire d'occupation) ;
- Apports internes de chaleur (appareils électroniques, électroménagers, ...) ;
- Ventilation mécanique contrôlée et perméabilité du bâtiment ;
- Systèmes énergétiques (chauffage, climatisation, ...) ;
- Masques solaires proches et lointain du bâtiment (vis-à-vis, densité urbaine).

Avec l'utilisation d'un logiciel adapté (ici le moteur de calcul règlementaire de la Réglementation Environnementale RE2020), il est possible de calculer les **indicateurs** suivants (définis au paragraphe 4.2.1) :

- Le besoin de chauffage exprimant le besoin énergétique du bâtiment pour se maintenir à une température intérieure donnée en période de chauffage, exprimé en kWh/m².an ;
- Le besoin de climatisation exprimant le besoin énergétique du bâtiment pour se maintenir à une température intérieure donnée en période estivale, exprimé en kWh/m².an ;
- L'indicateur DH exprimant l'inconfort de l'occupant en période estivale.

Ces indicateurs permettent d'apprécier la performance de l'enveloppe (en écartant à ce stade l'influence des systèmes énergétiques qui ont pour objectif de combler ces besoins avec un rendement énergétique qui leur est propre).

La méthodologie adoptée se décline en trois étapes :

- À l'échelle paroi : calcul des propriétés thermiques des composants de la paroi (cartographies de coefficient de déperdition U et facteur solaire S fournis au paragraphe 3.2) ;
- À l'échelle bâtiment : réalisation d'un plan de simulation large permettant de cartographier l'ensemble des couples (U, S) pour obtenir les indicateurs présentés ci-dessus et disposer de données chiffrées sur un grand nombre de combinaisons (cartographie fournies en annexe 3) ;
- À l'échelle quartier : calcul de l'impact de certains paramètres (variantes) sur ces indicateurs afin de déduire les paramètres qui sont favorables à l'application des peintures et revêtements réfléchissants en toiture (résultats donnés au paragraphe 4.3.)

Ne pouvant pas traiter la problématique à travers un seul bâtiment représentatif de l'ensemble des bâtiments tertiaires, il a été décidé de traiter les **trois typologies majoritaires** de cet ensemble, à savoir **les bâtiments de bureaux, de commerce et d'enseignement**. La méthodologie décrite précédemment est appliquée sur chacune des typologies traitées. Pour autant, **les grandes tendances qui seront tirées au travers des différents calculs auront une portée qui pourra être étendue à l'ensemble des bâtiments tertiaires**.

Pour chacune des typologies, un bâtiment représentatif de son segment sera sélectionné à partir d'une base de données (OPE, paragraphe 4.1.2). Cette base de données est alimentée par l'ensemble des bâtiments construits depuis la mise en œuvre de la RT2012. Il s'agit donc d'une base de données de bâtiments relativement récents. Afin de couvrir également des cas de bâtiments plus anciens, des calculs supplémentaires ont été faits sur la base du même bâtiment sélectionné, mais sensiblement dégradé en performance thermique. L'ensemble des typologies et de leurs caractéristiques sont disponibles en paragraphe 4.1.3.

Pour l'échelle quartier, il ne s'agit pas de produire des éléments chiffrés, mais plutôt d'attirer l'attention sur les impacts susceptibles d'être observés en s'appuyant sur les connaissances acquises par le CSTB sur le sujet.

3. RESULTATS A L'ECHELLE PAROI

Comme expliqué dans le paragraphe 2, le revêtement réfléchissant seul est caractérisé thermiquement par son coefficient d'absorption α et son émissivité ϵ . Une fois intégré à un procédé constructif en toiture, il affecte les propriétés de celui-ci, notamment son coefficient de transmission thermique U et son facteur solaire S .

C'est pourquoi, la démarche à l'échelle de la paroi consiste à établir le lien entre les grandeurs à l'échelle produit et celles à l'échelle procédé à l'aide d'une cartographie des différentes valeurs possibles afin de couvrir le maximum de procédés constructifs qui peuvent être rencontrés en toiture.

3.1. Plan de simulation

Beaucoup de systèmes constructifs existent en toiture pour des bâtiments tertiaires (cf. chapitre relatif à l'aptitude à l'emploi, paragraphe 3.1). Du point de vue de la modélisation thermique, tous ces systèmes constructifs peuvent être distingués en deux catégories, les toitures terrasses (non ventilées en sous-face) et les couvertures ventilées. Dès lors, l'étude à l'échelle paroi se limite à ces deux configurations pour représenter l'ensemble des systèmes constructifs, du point de vue de la thermique.

Les toitures terrasses sont des parois plates ou légèrement inclinées qui utilisent une membrane d'étanchéité pour protéger le bâtiment des infiltrations d'eau. Un isolant thermique est généralement présent sous la membrane.

Les couvertures ventilées sont des systèmes de toiture aménageant un espace d'air ventilé entre la couverture extérieure (tuiles, ardoises, panneaux métalliques) et l'isolant thermique. Ces systèmes sont plus ou moins inclinés.

Les coefficients U et S sont ici calculés pour chacun de ces procédés constructifs conformément aux conventions de calcul des règles Th-Bat, et selon plusieurs configurations :

- Coefficient U :
 - o Selon plusieurs résistances thermiques : allant de la paroi la moins isolée² (R de $0,001 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) à une paroi présentant une très bonne isolation³ (R de $12 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) ;
 - o Selon 3 valeurs d'émissivité des matériaux : $0,05$; $0,6$; $0,9$.
- Facteur solaire S : distingué selon la saison (été et hiver), celui-ci est calculé suivant :
 - o La résistance thermique de la paroi : de $0,001$ à $12 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$;
 - o Différentes valeurs d'absorption solaire de 0 à 1 .

À noter que dans le cas des couvertures ventilées, des variantes en fonction de l'inclinaison de la toiture ont été étudiées. Néanmoins, après calculs, l'impact de ce paramètre s'avère négligeable sur le facteur solaire. En conséquence, seule l'inclinaison de 15° pour ce procédé de toiture est retenue dans le reste du présent rapport.

3.2. Résultats : cartographie de détermination des coefficients U et S

Pour une meilleure lisibilité, les graphiques sont scindés en 2 parties, avec des échelles variables :

- Les cas de toiture faiblement isolée (Résistance thermique $\leq 2 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) ;
- Les cas de toiture présentant une meilleure isolation par rapport au cas précédent (résistance thermique $\geq 2 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$).

² Valeur non réaliste, utilisée ici dans le cadre d'une étude de sensibilité pour décrire l'absence totale d'isolation

³ L'équivalent de 30 cm de mousse polyuréthane en toiture ou de 48 cm d'un isolant standard

3.2.1. Cartographie de détermination des coefficients U

Généralités :

Comme évoqué précédemment, le coefficient U représente le coefficient de déperdition thermique de la paroi. Il est inversement proportionnel à la résistance thermique qui elle, caractérise l'aptitude d'un matériau à s'opposer au passage du flux de chaleur. Par conséquent, plus la paroi est résistante, plus son U est faible. Par extension, un matériau est dit isolant lorsqu'il présente une bonne résistance au flux thermique.

Les figures ci-après illustrent les cartographies réalisées sur les coefficients U en fonction des résistances thermiques des couches sous-jacentes et les émissivités des surfaces de toitures-terrasses ou de couvertures.

Figure 3 : Cartographie U -Toitures Terrasses

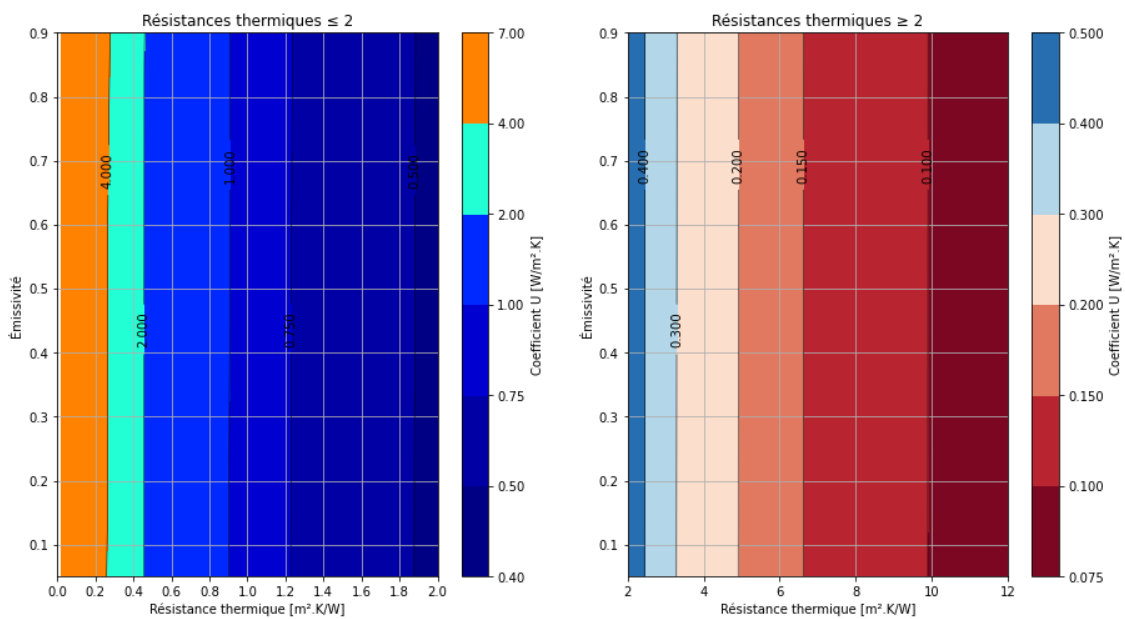
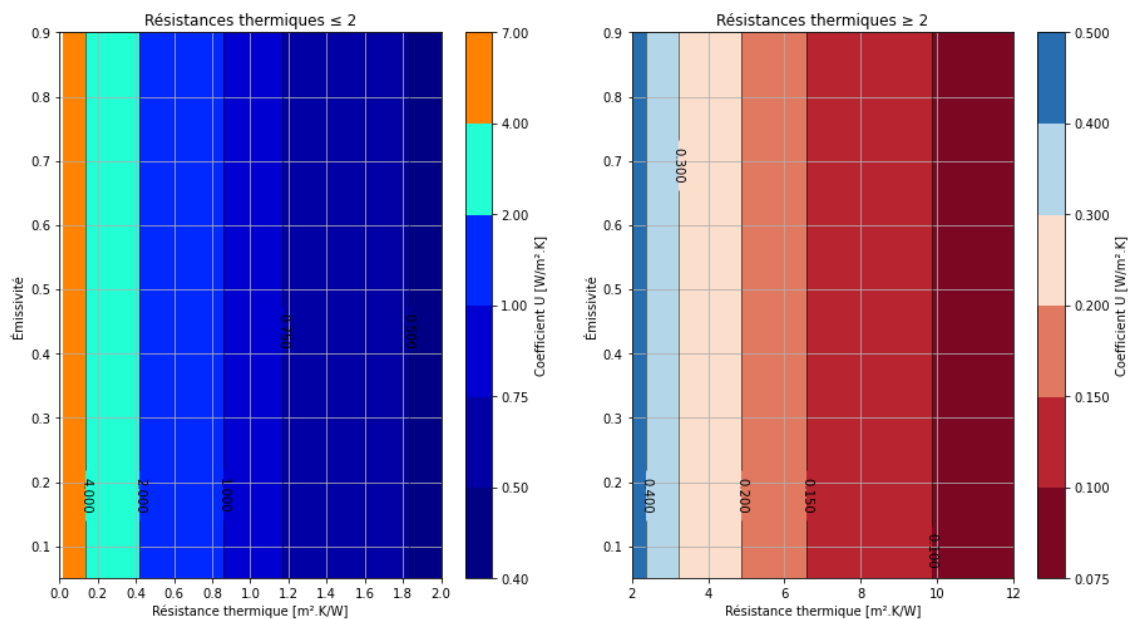


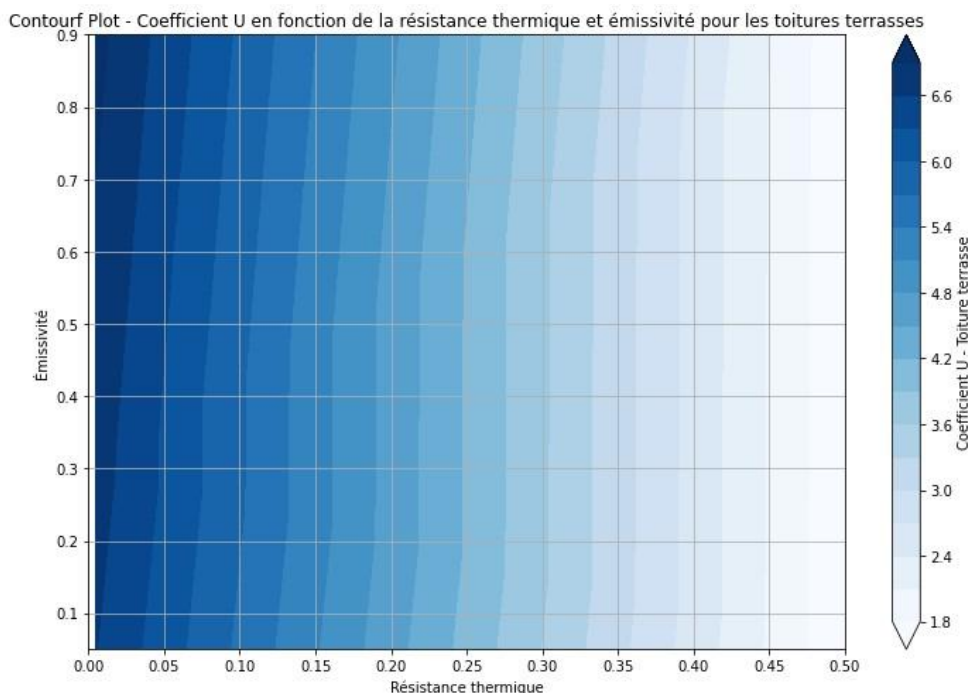
Figure 4 : Cartographie U – Couvertures ventilées



Observations :

- Pour les toitures avec une bonne isolation :
 - Il n'y a pas de différence significative entre le U des toitures terrasses et des couvertures ventilées ;
 - Le coefficient U dépend exclusivement de la résistance thermique sur l'ensemble des deux procédés ;
 - L'émissivité n'a pas d'impact sur le coefficient U.
- Pour les toitures faiblement isolées :
 - À résistances thermiques et émissivités égales, les couvertures ventilées présentent de meilleures performances thermiques ;
 - L'émissivité influe modérément pour les configurations de toitures avec un très faible niveau d'isolation, comme l'illustre la
 - 5, où un focus est réalisé sur les résistances thermiques inférieures à $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Plus la résistance est faible, plus l'effet de l'émissivité se fait ressentir.

Figure 5 : Impact de l'émissivité sur le coefficient U pour des résistances thermiques très faibles



Ces observations s'expliquent par les conventions de calculs suivantes :

- D'une part, l'émissivité n'intervient que dans le calcul des résistances thermiques superficielles. Plus la résistance intrinsèque d'un composant est faible, plus le poids de ces résistances thermiques superficielles est prépondérant sur le coefficient U ;
- D'autre part, l'espace d'air de la couverture ventilée est prise en compte dans la convention.

3.2.2. Cartographie de détermination des facteurs solaires S

Les figures ci-après illustrent les cartographies réalisées sur les facteurs solaires en fonction des coefficients d'absorption solaire et des résistances thermiques.

Figure 6 : Cartographie facteur solaire d'hiver - toiture terrasse

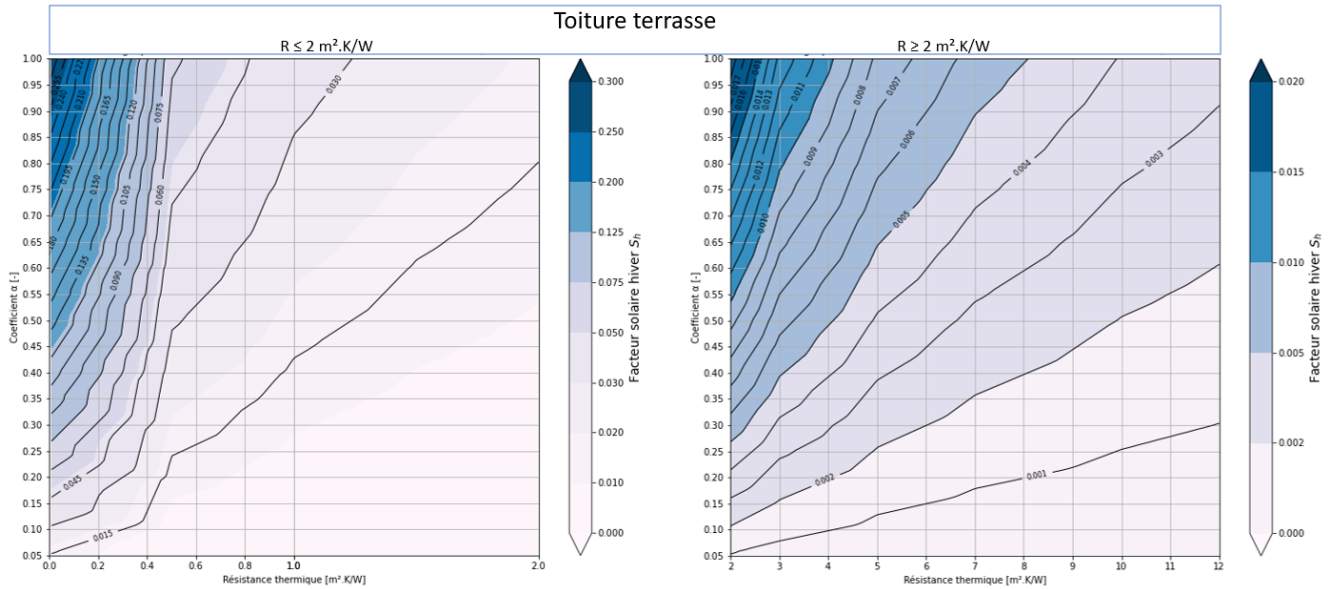


Figure 7 : Cartographie facteur solaire d'hiver – couverture ventilée

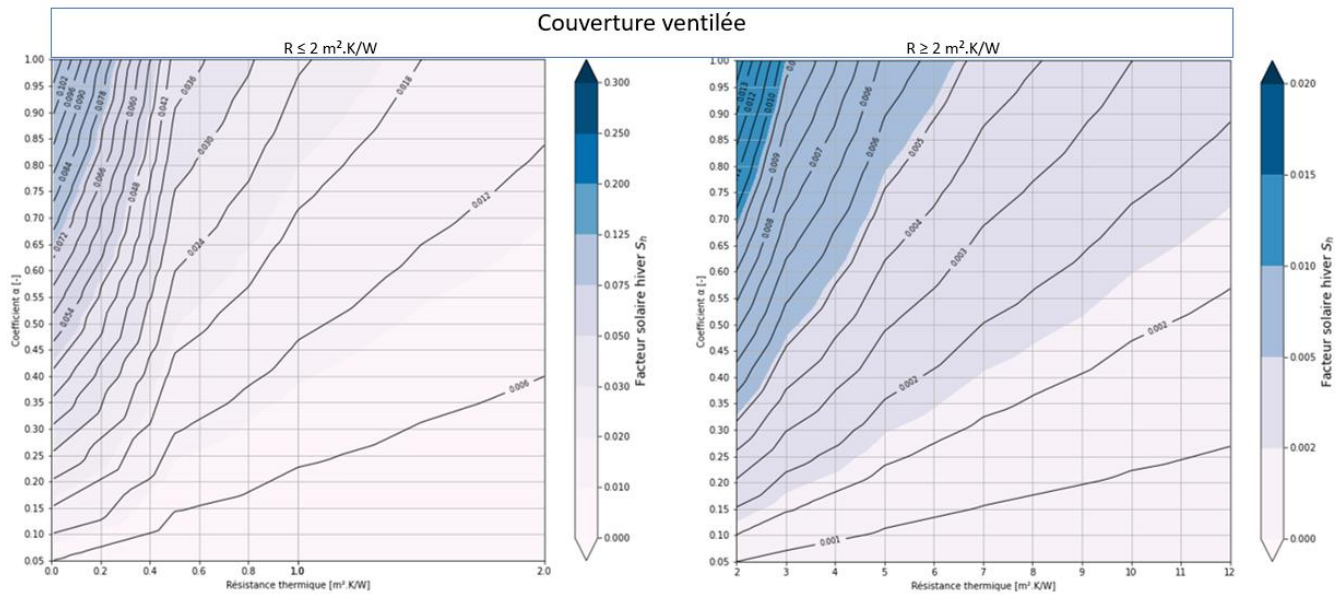


Figure 8 : Cartographie facteur solaire d'été - toiture terrasse

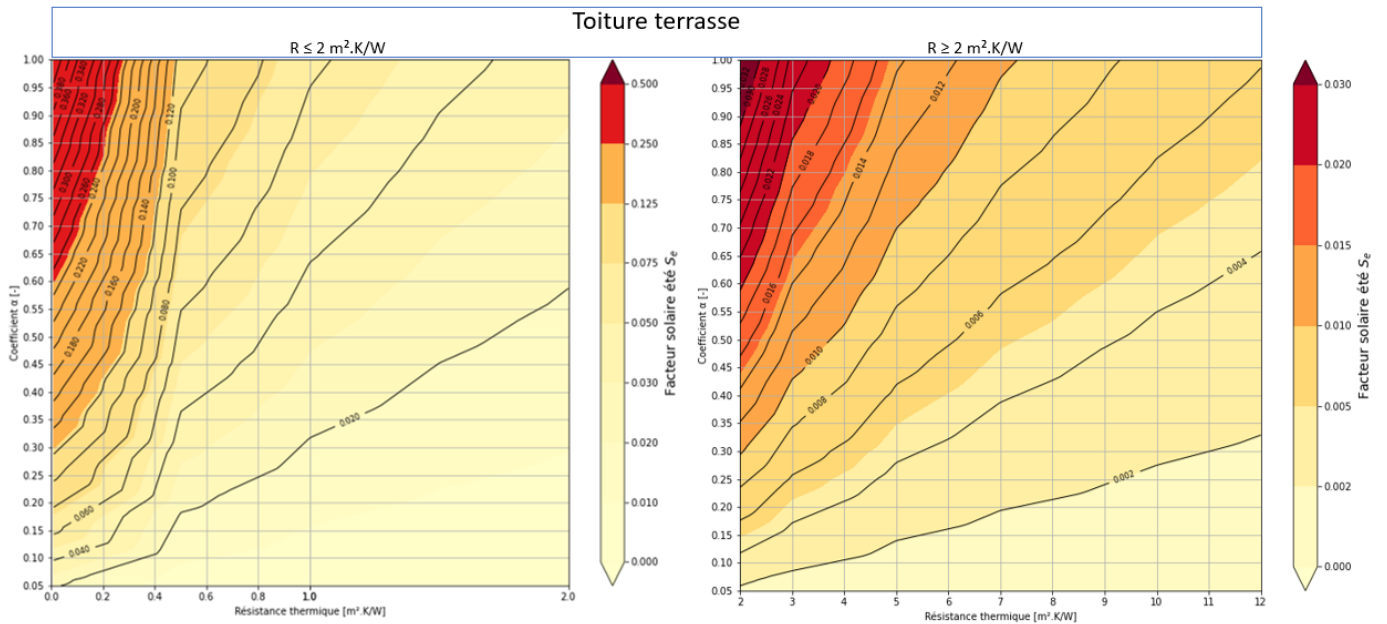
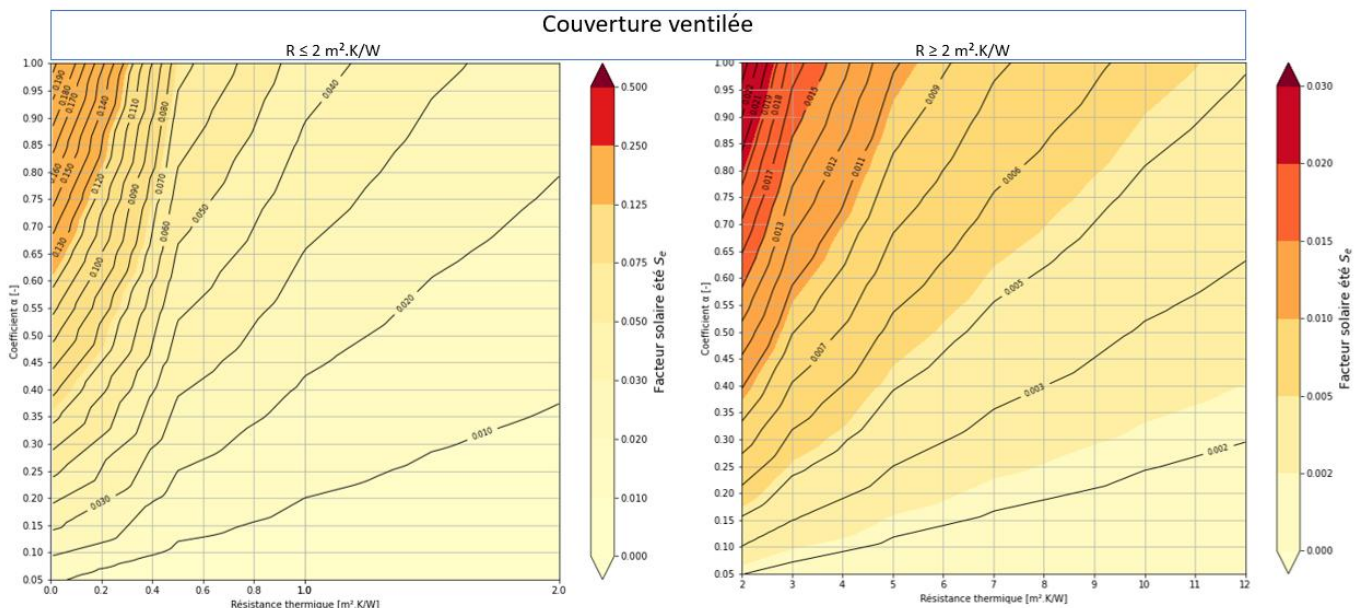


Figure 9 : Cartographie facteur solaire d'été – couverture ventilée



À noter que dans le cadre de cette étude, une corrélation a également pu être réalisée entre les facteurs solaires d'été et d'hiver.

Avant d'interpréter ces résultats, il est essentiel de rappeler que le facteur solaire, par définition, représente la proportion d'énergie solaire transmise vers l'intérieur sur un flux solaire incident. Il s'agit d'un rapport et non d'une valeur absolue. Ainsi, réduire de moitié un facteur solaire de 2 % n'a pas le même effet que de diviser par 2 un facteur solaire de 50 % sur le flux solaire effectivement transmis. Dans le premier cas, la quantité d'énergie solaire transmise à l'intérieur est négligeable (1 % du flux solaire incident), dans l'autre, elle reste considérable (25 % du flux solaire incident).

Observations :

- Les facteurs solaires sont plus faibles en hiver. En effet, la convention de calcul tient compte d'un coefficient d'échange superficiel plus important en hiver qu'en été.
- Les facteurs solaires sont légèrement plus importants dans le cas des toitures terrasse, en été comme en hiver. En effet, l'espace d'air de la couverture ventilée permet la circulation de l'air, contribuant à évacuer une partie de la chaleur accumulée sous la couverture extérieure en été.
- Plus le coefficient d'absorption α (directement fonction de la réflectivité ρ de la surface par la relation $\alpha = 1 - \rho$) se rapproche de 1, plus le facteur solaire est important. En d'autres termes, plus la toiture est absorbante, plus elle va avoir tendance à absorber la chaleur reçue du soleil, et la restituer vers l'intérieur. Ce phénomène se répercute sur le confort des occupants car il contribue à apporter des calories en hiver mais augmente aussi la chaleur à évacuer en été.
- Plus la résistance de la toiture est faible, plus son facteur solaire est élevé. A l'inverse, une toiture fortement isolée possède un facteur solaire faible, se traduisant en une coupure importante des apports solaires ayant traversés la toiture.
- Les configurations présentant les facteurs solaires les plus défavorables sont obtenues pour des toitures combinant un coefficient α élevé et une faible isolation de toiture. Il s'agit des configurations les plus vulnérables à la transmission du flux solaire vers l'intérieur.

Conclusion :

À l'échelle de la toiture, atténuer le risque d'inconfort estival nécessite une attention particulière au coefficient d'absorption α et à la résistance thermique de la paroi pour réduire le facteur solaire.

À titre d'exemple, le recours à un revêtement réfléchissant permet de réduire efficacement le coefficient d'absorption α , ce qui contribue à baisser le facteur solaire de manière significative. Par ailleurs, l'isolation de la paroi offre un double avantage : elle améliore le coefficient U tout en diminuant le facteur solaire associé.

Dans ce qui suit, le coefficient d'absorption α d'une toiture dite **standard** est pris à **0,6**. En utilisant un **revêtement réfléchissant on suppose que** ce coefficient peut être réduit à **0,1** (valeur performancielle prise comme hypothèse pour une peinture réfléchissante à l'état neuf).

4. RESULTATS A L'ECHELLE BATIMENT

Cette partie présente successivement :

- La méthodologie retenue ;
- Le plan de simulation réalisé (cas de base et variantes) ;
- Les éléments issus de l'approche n° 1 (à dire d'expert) ;
- Les éléments issus de l'approche n° 2 (approche numérique), et notamment :
 - o Les bâtiments ayant servi à réaliser les calculs (méthode de sélection des bâtiments / description des bâtiments retenus) ;
 - o Le plan de simulation réalisé (hypothèses de calcul, indicateurs observés, outil de calcul utilisé) ;
 - o Les résultats obtenus.

La synthèse des deux approches permet de conclure sur les bâtiments tertiaires les plus adaptés à la mise en œuvre de la peinture réfléchissante.

4.1. Méthodologie retenue à l'échelle bâtiment.

L'application limitée à la toiture des peintures réfléchissantes conduit à rendre certains bâtiments (notamment ceux disposant d'une surface de toiture importante) plus propices à la mise en œuvre de ce procédé en termes d'impact positif sur le confort thermique en période estivale.

Afin d'identifier l'ensemble des conditions favorables à la mise en œuvre des peintures réfléchissantes et d'en évaluer l'impact, l'analyse a été réalisée sur la base de deux approches :

Approche n° 1 « à dire d'expert » : cette approche est basée essentiellement sur les connaissances du CSTB. Elle permet de tracer les contours des typologies de bâtiments les plus susceptibles de bénéficier de la mise en œuvre de la peinture réfléchissante et d'identifier les paramètres ayant le plus d'impact sur l'efficacité du procédé de peinture réfléchissante.

Approche n° 2 dite « numérique » : cette seconde étape réalisée par simulation permet d'objectiver les éléments qualitatifs de l'approche à dire d'expert en y apportant des éléments chiffrés d'impact (positif ou négatif).

La quantification des impacts est réalisée sur la base de bâtiments tests, issus de l'Observatoire des Performances Energétiques (OPE) mis en place lors de l'entrée en vigueur de la RT2012 (un pré-traitement a permis de supprimer les doublons et les très petites surfaces de l'analyse). Cette base de données constitue un vivier de bâtiments que nous pouvons utiliser pour réaliser ces simulations.

À partir de l'étude du parc de bâtiments tertiaires, 3 usages ont été retenus, afin de disposer de trois bâtiments dits "de base", sur lesquels l'étude de sensibilité sur les paramètres jugés pertinents a été réalisée (à titre d'exemple, la zone climatique, le niveau d'isolation du bâtiment, etc.).

Bien que les usages disponibles dans la base OPE ne soient pas exhaustifs (par exemple, les data centers n'y figurent pas) l'analyse réalisée sur plusieurs bâtiments d'usage différents permet de fournir des résultats génériques applicables à tous les usages du parc tertiaire.

L'ensemble des simulations sur les bâtiments de base (et leurs variantes) constitue le plan d'expérience.

Tableau 1 : Méthodologie de l'étude à l'échelle bâtiment

Etape n° 1 à dire d'expert	Sur la base des connaissances CSTB	Permet de donner des premières indications sur l'impact de la mise en œuvre
Etape n° 2 numérique	Travail sur des bâtiments tests	Issus de la base OPE et donc récents
	Travail sur 3 usages	Issus de l'analyse du parc tertiaire de bâtiments
	Dégradation de l'isolation des bâtiments tests	Ramenés à un niveau datant des années 90 (le CSTB dispose de données fiables pour décrire un bâtiment tertiaire moyen de cette époque) [5]
	Réalisation de variantes sur les cas de base	Plan d'expérience permettant de faire varier le bâtiment de base, et élargir le champ des bâtiments testés
	Exploitation des résultats	Obtenir des valeurs chiffrées d'impact permettant de confirmer / infirmer / compléter l'approche n° 1

4.1.1. Le parc de bâtiments tertiaires

La sélection des bâtiments dans la base OPE implique au préalable une analyse des caractéristiques du parc de bâtiments non résidentiels.

Le parc de bâtiments non résidentiels est extrêmement hétéroclite en termes d'usage. Néanmoins, le CEREN (Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'Energie) réalise un regroupement en 8 branches d'activité des établissements ayant un comportement homogène du point de vue de la consommation d'énergie [1]. On retrouve ainsi :

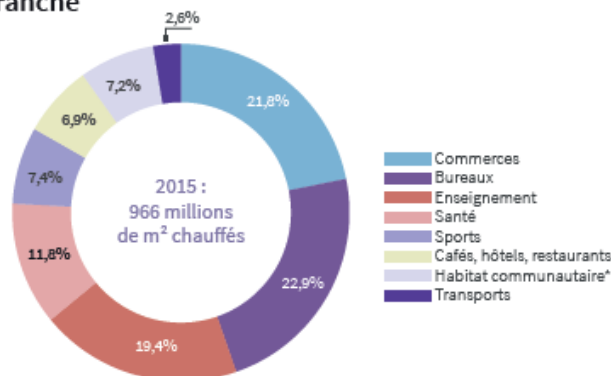
- **Bureaux et administration** : espaces destinés au travail administratif, à la gestion d'entreprises, ou à des activités professionnelles diverses ;
- **Commerces** : magasins, boutiques, centres commerciaux, etc. ;
- **Établissements d'Enseignement** : écoles, collèges, lycées, universités et autres établissements éducatifs.
- **Cafés, hôtels et restaurants** : établissements offrant un hébergement temporaire, avec parfois des services de restauration. Lieux de restauration, allant des cafés aux restaurants gastronomiques ;
- **Établissements de Santé** : hôpitaux, cliniques, cabinets médicaux, laboratoires ;
- **Sport, culture, loisirs, équipements collectifs divers** : gymnases, stades, piscines, centres de fitness. Musées, galeries, théâtres, cinémas, bibliothèques ;
- **Transport** : les consommations d'énergie couvertes par nos enquêtes concernent exclusivement les consommations relevant de la problématique bâtiment pour les établissements de cette branche (sociétés de transport, aéroports, gares, ports autonomes, locaux des compagnies de taxi, transporteurs routiers...) ;
- **Habitat communautaire** : les habitats communautaires sont une alternative à la maison individuelle où les espaces privés sont généralement plus petits que les espaces collectifs.

Cette distinction par branches est utilisée par l'ADEME pour fournir des éléments chiffrés sur le parc de bâtiments tertiaires, et notamment sur la répartition de la surface chauffée des locaux tertiaires par branches comme illustré par la figure :

Figure 10 : Répartition de la surface chauffée des locaux tertiaires par branche [2]

Caractéristiques du secteur tertiaire

G6. Répartition de la surface chauffée des locaux tertiaires par branche



* Les habitats communautaires sont une alternative à la maison individuelle où les espaces privés sont généralement plus petits que les espaces collectifs.
 Source : CEREN - « Suivi du parc et des consommations d'énergie - secteur tertiaire » - avril 2017
 Champ : France métropolitaine

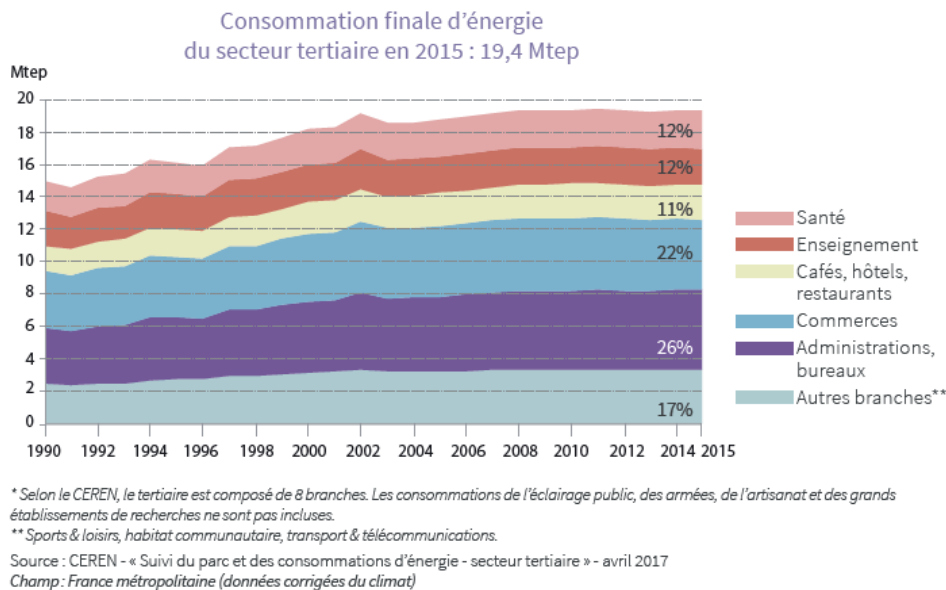
RAPPORT

Les trois branches les plus représentées (environ 60 % de la surface chauffée du parc tertiaire) sont les branches Commerces, Bureaux et Enseignement.

Bien que légèrement moins fiables sur le parc tertiaire, les données issues de la BDNB offrent un ordre de grandeur intéressant sur les typologies présentées.

L'ADEME fournit également la répartition des consommations finales d'énergie du secteur par branche.

Figure 11 : Répartition de la consommation finale d'énergie des usages tertiaires par branche [2]



Les branches commerces et bureaux représentent à elles seules près de la moitié de la consommation d'énergie du secteur.

Pour la réalisation des simulations énergétiques d'impact, il est nécessaire de disposer de bâtiments tests. La ressource allouée pour la présente étude impose de limiter le nombre de bâtiments test à trois typologies distinctes, à savoir les trois plus importantes. L'objectif est de pouvoir extrapoler les conclusions aux autres branches à partir des résultats obtenus sur ces bâtiments tests.

Ainsi, les trois usages retenus sont les bureaux, les commerces et les bâtiments d'enseignement. Des éléments d'appréciation ont néanmoins été fournis par extrapolation des résultats pour les usages de types data centers et hôpitaux.

Afin de disposer de bâtiments dont les performances énergétiques pourront être évaluées par modélisation, les bâtiments sont sélectionnés dans la base OPE.

De manière à couvrir une part du parc la plus importante possible, tout en ayant des usages pour lesquels nous disposons de bâtiments tests (voir sélection des bâtiments sur la base OPE chapitre 4.1.3, il a été retenu en première approche **les trois branches tertiaires ci-dessous, compte tenu de leur impact en termes de consommation énergétique et/ou de leur part dans la surface chauffée** :

- Bureaux ;
- Commerces ;
- Enseignement.

Ces trois branches représentent 60 % des consommations finales d'énergie du secteur et 64 % de la surface chauffée du secteur.

4.1.2. Sélection des bâtiments tests dans la base OPE

La base OPE collecte des données issues des récapitulatifs standardisés d'études thermiques (RSET) déposés sur le site rt-re-batiment.fr dans le but d'obtenir une attestation de conformité à la réglementation. La réalisation de l'attestation est obligatoire pour tout bâtiment neuf depuis la mise en œuvre de la réglementation thermique 2012. Elle comporte ainsi des données relatives aux bâtiments résidentiels et aux bâtiments non-résidentiels.

Les études thermiques déposées ne représentent qu'une partie des projets de bâtiments neufs réalisées en France, la base de données n'est donc en aucun cas exhaustive. Néanmoins, elle est une source précise d'informations détaillées sur les bâtiments récents.

Les usages de bâtiments tertiaires catégorisés dans la base OPE sont décrits dans le tableau ci-dessous. Il s'agit donc uniquement des catégories d'usage soumises à la RT2012 (les data centers ne font par exemple pas partie de ces usages).

Tableau 2 : Nombre de bâtiments tertiaires dans la base OPE par catégorie d'usage tertiaire

Usage	Numéro d'identification de l'usage	Nombre de bâtiments associés
Enseignement	5	4 558
Hôtels et équivalent	6	1 388
Bureaux	7	14 355
Restauration	8	2 109
Commerce	9	6 176
Bâtiments hospitaliers	10	4 302
Transport & aérogare	11	45
Etablissements sportifs	12	1 182
Autres	13	4 837
Totaux tertiaires	5 à 13	38 952

Le nombre de bâtiments disponibles est important et la sélection d'un bâtiment "de base" se fait à l'aide de filtrages successifs sur plusieurs paramètres. Ces paramètres sont utilisés car ils influencent fortement la performance thermique de l'ouvrage. En observant les valeurs prises par ces paramètres (minimum, maximum, moyenne et répartition statistique), un bâtiment "de base" est choisi par chaque usage.

RAPPORT

Les paramètres influents sont décrits ci-dessous puis récapitulés dans le tableau suivant :

- Ratio de surface de toiture : il permet d'évaluer la part de la toiture dans l'ensemble des surfaces déperditives. Plus cette part est grande, plus grand sera l'impact de la mise en œuvre du produit réfléchissant. Ce ratio est fortement corrélé avec le nombre d'étages du bâtiment.
- Ratio de surface vitrée (en toiture et en mur) : il permet d'évaluer la part de vitrage sur les parois déperditives, et donc leur impact sur la performance. Par exemple, plus le ratio de surface vitré en toiture sera important, moins l'impact du produit réfléchissant sera important, car ne s'appliquant que sur la partie opaque.
- Compacité surfacique (resp. volumique) : c'est le rapport entre les surfaces déperditives et la surface utile (resp. le volume) du bâtiment. Plus la valeur du paramètre est basse, plus le bâtiment sera compact, et meilleur sera la performance énergétique de base du bâtiment.
- Bbio : Besoin bioclimatique du bâtiment qui agrège les besoins de chauffage, de refroidissement et d'éclairage du bâtiment selon la formule donnée dans la méthode de calcul Th-BCE.
- Cep : Consommation conventionnelle d'énergie primaire du bâtiment regroupant les consommations de chauffage, de refroidissement, d'eau chaude sanitaire, d'éclairage, de ventilation, et les auxiliaires pour ces usages et utilisée en RT2012 et RE2020.

Ces deux derniers paramètres permettent d'apprécier la performance globale du bâtiment, et notamment de l'enveloppe (via le Bbio) puis de l'efficacité des systèmes énergétiques (via le Cep), afin de servir à la partie économique.

Tableau 3 : Les paramètres influents de l'échantillonnage

Paramètre	Formule	Unités
Ratio de surface de toiture	$\frac{S_{toiture}}{S_{toiture} + S_{murs} + S_{baies}}$	-
Ratio de surface vitrée en toiture	$\frac{S_{vitrée_{toiture}}}{S_{vitrée_{toiture}} + S_{toiture}}$	-
Ratio de surface vitrée en mur	$\frac{S_{vitrée_{murs}}}{S_{vitrée_{murs}} + S_{murs}}$	-
Compacité surfacique	$\frac{S_{toiture} + S_{murs} + S_{plancherbas} + S_{baies}}{S_{urt}}$	-
Compacité volumique	$\frac{S_{toiture} + S_{murs} + S_{plancherbas} + S_{baies}}{V_{volumegroupe}}$	m ⁻¹
Bbio	Besoin bioclimatique (efficacité énergétique de l'enveloppe du bâtiment)	pts
Cep	Consommation d'énergie primaire annuelle renouvelable et non renouvelable (efficacité énergétique des systèmes du bâtiment)	kWh _{ep} /m ² .an

Pour chacun de ces paramètres influents, des statistiques de répartition des valeurs ont été mises en place pour permettre d'identifier les valeurs médianes ainsi que les quartiles. L'objectif est de disposer de valeurs représentatives de ces différents paramètres afin de sélectionner un bâtiment représentatif dans la base OPE pour les trois usages identifiés.

RAPPORT

Pour davantage de précision, les données extraites de la base OPE et les statistiques de répartition des paramètres influents sur les usages sont décrites respectivement en Annexe I et II.

4.1.3. Les bâtiments retenus

Sur la base des éléments décrits ci-dessus, nous avons retenu un bâtiment représentatif par catégorie d'usage concerné.

Ils sont décrits plus en détail ci-dessous, d'une part pour le bâtiment issu de la base OPE (bâtiment récent), d'autre part pour sa version dégradée d'un point de vue de l'isolation thermique.

Description du bâtiment de bureau retenu pour l'étude (version de base)

Tableau 4 : Principales caractéristiques du bâtiment de base à usage de bureaux

Généralités		
Type de bâtiment	Bureaux - R+1	
Surface utile	1 540 m ² (770m ² de surface au sol)	
Zone climatique	H2b	
Parois opaques		
	Bâtiment récent	Bâtiment ancien (années 90)
Types de murs verticaux	Up = 0,27 W/m ² . K	Up = 0,5 W/m ² . K
Plancher bas	Up = 0,17 W/m ² . K	Up = 0,6 W/m ² . K
Toiture	Up = 0,1 W/m ² . K	Up = 0,5 W/m ² . K
Ubat	Ubat = 0,4 W/m ² . K	Ubat = 0,82 W/m ² . K
Parois vitrées		
	Bâtiment récent	Bâtiment ancien (années 90)
Types de baies	Uw = 1,5 W/m ² . K / Facteur solaire 0,5 Pas de protections mobiles	Uw = 3,6 W/m ² . K / Facteur solaire 0,5 Pas de protections mobiles
Perméabilité à l'air		
	Bâtiment récent	Bâtiment ancien (années 90)
	1,7 m ³ /h.m ²	1,7 m ³ /h.m ²
Inertie		
	Moyenne	Moyenne
Systèmes de ventilation		
	Ventilation double flux avec récupération d'énergie : efficacité échangeur 85 %	Ventilation double flux avec récupération : efficacité de l'échangeur 50 %

RAPPORT

Description du bâtiment de commerce retenu pour l'étude (version de base)

Tableau 5 : Principales caractéristiques du bâtiment de base à usage de commerces

Généralités		
Type de bâtiment	Commerces (surface de vente supérieure à 300 m ²) – plain-pied	
Surface utile	900 m ²	
Zone climatique	H2b	
Parois opaques		
	Bâtiment récent	Bâtiment ancien (années 90)
Types de murs verticaux	Bardage double-peau Up = 0,25 W/m ² . K	Bardage double-peau Up = 1 W/m ² . K
Plancher bas	Dalle sur terre-plein Up = 0,24 W/m ² . K	Dalle sur terre-plein Up = 1,3 W/m ² . K
Toiture	Toiture bac acier Up = 0,25 W/m ² . K	Toiture bac acier Up = 0,5 W/m ² . K
Ubat	Ubat = 0,4 W/m ² . K	Ubat = 1 W/m ² . K
Parois vitrées		
	Bâtiment récent	Bâtiment ancien (années 90)
Types de baies	Mur rideaux Uw = 2 W/m ² . K / Facteur solaire 0,6 Pas de protections mobiles	Uw = 4,3 W/m ² . K / Facteur solaire 0,75 Pas de protections mobiles
Perméabilité à l'air		
	Bâtiment récent	Bâtiment ancien (années 90)
	3,0 m ³ /h.m ²	3,0 m ³ /h.m ²
Inertie		
	Quotidienne : Moyenne Séquentielle : très légère	Quotidienne : Moyenne Séquentielle : très légère
Eclairage		
	Puissance installée : 20 W/m ²	Puissance installée : 30 W/m ²

RAPPORT

Description du bâtiment d'enseignement retenu pour l'étude (version de base)

Tableau 6 : Principales caractéristiques du bâtiment de base à usage d'enseignement primaire

Généralités		
Type de bâtiment	Enseignement primaire – plain-pied	
Surface utile	450 m ²	
Zone climatique	H2b	
Parois opaques		
	Bâtiment récent	Bâtiment ancien (années 90)
Types de murs verticaux	U _p = 0,17 W/m ² . K	U _p = 0,43 W/m ² . K
Plancher bas	U _e = 0,16 W/m ² . K	U _e = 0,34 W/m ² . K
Toiture	U _p = 0,21 W/m ² . K	U _p = 0,32 W/m ² . K
Ubat	Ubat = 0,35 W/m ² . K	Ubat = 0,62 W/m ² . K
Parois vitrées		
	Bâtiment récent	Bâtiment ancien (années 90)
Types de baies	U _w = 1,4 W/m ² . K / Facteur solaire 0,5 Pas de protections mobiles	U _w = 2,75 W/m ² . K / Facteur solaire 0,75 Pas de protections mobiles
Perméabilité à l'air		
	Bâtiment récent	Bâtiment ancien (années 90)
	1,7 m ³ /h.m ²	2,5 m ³ /h.m ²
Inertie		
	Lourde	Lourde
Systèmes de ventilation		
	Ventilation simple flux	Ventilation simple flux

4.2. Plan de simulation global

4.2.1. Indicateurs observés

L'outil de simulation COMETH permet le calcul de différents indicateurs à l'échelle bâtiment. Dans le cadre de ce projet, les indicateurs suivants sont retenus pour mesurer l'impact d'une peinture réfléchissante sur le bâtiment.

- Besoins de chauffage et de refroidissement du bâtiment

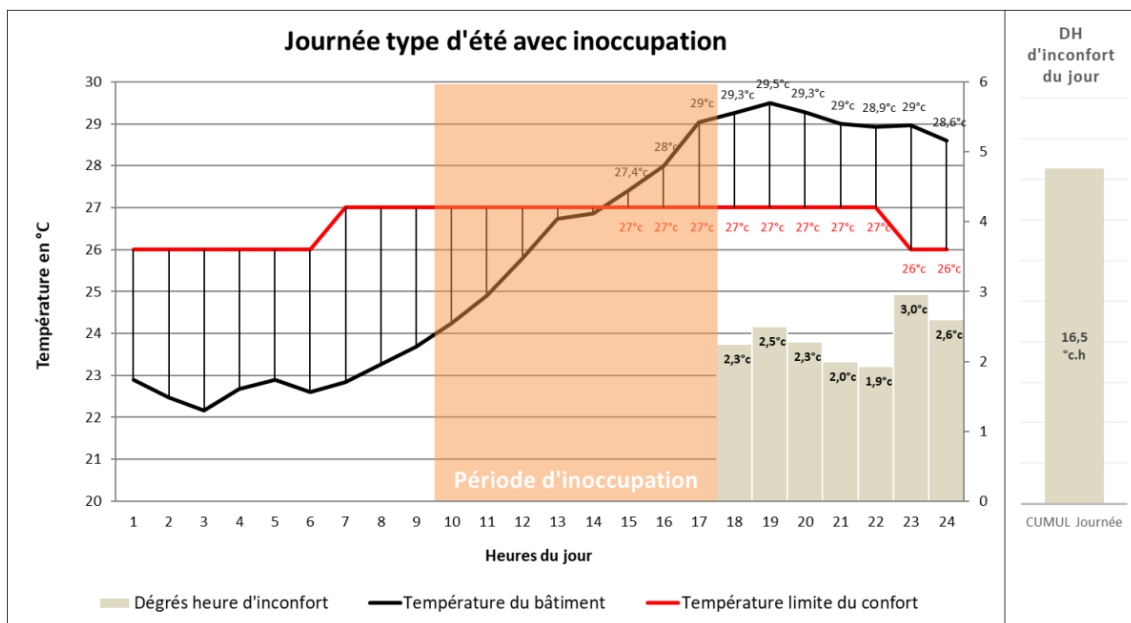
La présence d'une peinture réfléchissante sur une toiture va venir modifier les caractéristiques énergétiques (facteur solaire) de la toiture. L'observation des besoins énergétiques (et non des consommations) permet de s'affranchir du système énergétique utilisé pour satisfaire ces besoins afin de mesurer uniquement l'impact lié aux changements réalisés sur le bâti.

- Confort d'été du bâtiment - DH

Dans le cadre de la RE2020, il existe l'indicateur de confort DH qui permet de mesurer les degrés-heures d'inconfort en °C.h. Ce calcul est réalisé avec **une météo spécifique (donc différente de celle utilisée pour le calcul des besoins)** contenant une période caniculaire en été qui permet de tester le bâtiment sur le critère du confort d'été **sans prendre en compte de système de refroidissement du bâtiment.**

Dès que la température opérative intérieure dépasse la température de confort, l'indicateur est incrémenté. Cet indicateur fournit des éléments sur l'impact de la peinture réfléchissante sur le confort d'été du bâtiment. La figure ci-dessous permet de mieux comprendre le calcul réalisé.

Figure 12 : Exemple de calcul de l'indicateur DH de la RE2020 (issu des travaux du GTM2 de la RE2020)



Les degrés-heures d'inconfort sont représentés par les histogrammes, et la valeur cumulée sur la journée est présentée à droite du graphique. En début de journée, la température opérative du bâtiment (en noir) est inférieure à la température limite de confort (en rouge). Aucun DH n'est comptabilisé. S'en suit une période d'inoccupation durant laquelle les DH ne sont pas non plus comptabilisés. Puis, le soir, le bâtiment est occupé, et la température opérative dépasse la température limite de confort. L'indicateur DH de la journée est incrémenté.

À noter que la RE2020 définit des seuils maximaux à ne pas dépasser. Ces seuils dépendent de l'usage du bâtiment et de sa catégorie de contrainte (allant de 1 à 3) qui est liée à la zone climatique, à la présence d'un système de

RAPPORT

climatisation et aux possibilités d'ouverture (ou pas selon l'exposition au bruit ou les conditions de sécurité) des baies. A ce jour, pour les bâtiments tertiaires, les valeurs des seuils ne sont disponibles que pour les bureaux et l'enseignement. Ci-dessous à titre indicatif les DH_max connus.

Tableau 7 : Exigences DH_max de la RE2020 pour les bâtiments de bureaux

	Catégorie 1, sauf parties de bâtiments climatisées en zones H2d et H3	Catégorie 1 climatisé, en zone H2d et H3		Catégorie 3
DH_maxcat	1150	2400	2600	Pas de seuil

Tableau 8 : Exigences DH_max de la RE2020 pour les bâtiments d'enseignement

	Catégorie 1, sauf parties de bâtiments climatisées en zones H2d et H3	Catégorie 1 climatisé, en zone H2d et H3	Catégorie 2
DH_maxcat	900	1800	2200

Pour les commerces, les seuils hauts sont en cours de calage (cf. [présentations](#) faites au GTM2 (Groupe de travail Modélisateur n° 2)). Les valeurs officielles retenues ne sont pas encore connues. Seule certitude, ils seront nettement supérieurs à ceux des bureaux et des bâtiments d'enseignement, les seuils hauts proposés en catégorie 1 variant entre 2 000 et 4 500 DH.

- Consommations de chauffage et de refroidissement du bâtiment - Cep

La différence entre les besoins et les consommations est liée à la performance du système énergétique installé pour satisfaire ces besoins. Les impacts énergétiques sont déterminés sur la base des besoins. En revanche, les analyses économiques détaillées dans le chapitre « impact économique » s'appuient sur les consommations du bâtiment récupérées par poste. Pour l'analyse économique, les systèmes énergétiques sont majoritairement électriques exceptés pour le bâtiment d'enseignement dont le chauffage fonctionne au gaz.

Les données météorologiques utilisées pour les simulations diffèrent entre :

- Le calcul des besoins et des consommations qui utilisent une météo de référence de la période climatique actuelle (météo type) ;
- Le calcul de l'indicateur de confort d'été DH qui intègre une période caniculaire proche de celle observée en 2003 en métropole. Cela permet de réaliser une sorte de « stress test » du bâtiment soumis à ce type de canicule.

Dans les résultats analysés au chapitre 4.4, cela pourra donner lieu à des évolutions différenciées entre les différents indicateurs lors de la mise en œuvre de la peinture réfléchissante.

4.2.2. Outil de calcul

Les calculs sont réalisés à l'aide du logiciel COMETH développé par le CSTB. Le cœur de calcul pour la modélisation énergétique et le confort thermique COMETH est un simulateur énergétique dynamique au pas de temps horaire. Servant de base à la réglementation thermique, COMETH permet le calcul sans conventions réglementaires des besoins pour l'enveloppe et des consommations d'énergie pour le chauffage, le refroidissement, l'eau chaude

sanitaire, de l'éclairage et des auxiliaires tels que les pompes et les ventilateurs. Il permet également d'apprécier le confort thermique.

4.2.3. Hypothèses du plan d'expérience

Un plan d'expérience est défini pour faire varier certains paramètres de l'étude, à la fois sur le bâtiment récent et sur le bâtiment ancien.

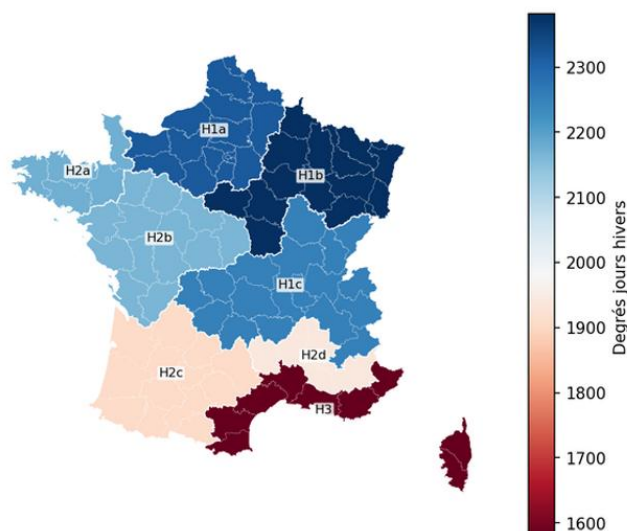
Les variantes envisagées sur les cas de base sont détaillées ci-dessous (toutes les variantes ne sont pas appliquées à tous les bâtiments) :

- Ratio de surface vitrée en façade : variation du taux de surface vitrée afin de traiter les cas extrêmes observés sur la base OPE, utilisation de valeurs minimales / maximales ;
- Ratio de surface vitrée en toiture : valeurs minimales / maximales uniquement pour le bâtiment de commerce ;
- Ratio de surface de toiture : la mise en œuvre se faisant uniquement en toiture, le ratio de surface de toiture par rapport aux autres parois du bâtiment a un impact majeur. La démarche adoptée ici pour évaluer l'impact de ce paramètre a consisté à rajouter des étages pour moduler ce paramètre (notamment sur le bâtiment de bureaux, initialement de type R+1 que l'on passe en R+3) ;
- Rotation du bâtiment : le bâtiment de base possède une répartition de vitrages par orientation qui n'est pas homogène (par exemple 15 % au Nord et 27 % au Sud). La démarche adoptée ici pour évaluer l'impact de ce paramètre a consisté à faire tourner le bâtiment par pas de 90° de manière à tester des répartitions par orientation différentes ;
- Protections mobiles : mise en place des protections mobiles sur les parois vitrées.

Hypothèses : protections solaires mobiles extérieures, manuelles et motorisées. Valeurs de facteur solaire avec protection solaire non-opaque et sombre (fascicule d'application des règles Th-Bat). Version non motorisée pour le bâtiment ancien ;

- Masques lointains liés à l'environnement du bâtiment : mise en place de masque lointains sur les parois vitrées et opaques du bâtiment (pas de masque en configuration de base). Deux situations sont considérées :
 - o Celle d'un bâtiment situé en zone peu dense mais entouré de collines qui créent un masque sur le bâtiment (cas moyen) ;
 - o Celle d'un bâtiment situé en zone dense et entouré de bâtiments de même hauteur situés près du bâtiment objet de l'étude (typiquement de l'autre côté de la rue). Ce qui correspond à un cas extrême.
- Zone climatique : les bâtiments extraits de la base OPE se trouvent en zone H1. Les simulations ont été étendues aux zones climatiques H2b et H3 de la réglementation environnementale. Par la suite, la zone H2b a été considérée comme la zone de base, et zones H1 et H3 respectivement comme variantes minimales et maximales.

Figure 13 : Carte des zones climatiques métropolitaines associées à leur rigueur climatique quantifiée par les DJU



- Inertie : modification de l'inertie du bâtiment de base, en l'augmentant ou la diminuant afin de simuler les valeurs extrêmes (très lourde à très légère).
- Apports internes : sans changer l'usage du bâtiment, les apports internes sont modulés (liés aux occupants mais aussi aux appareils électriques). Les valeurs de base sont augmentées (multipliées par 2 ou 5 pour représenter des cas extrêmes).

Les différentes variantes sont simulées sur des bâtiments ayant des niveaux d'isolation du bâti variés (hors toiture) : les bâtiments de la base OPE sont des bâtiments récents. L'isolation de ces bâtiments est dégradée afin de les ramener à des niveaux d'isolation des années 90. Bien que fournissant des niveaux d'isolation plus élevés que des bâtiments des années 60/70, il a été fait le choix de mener l'étude d'impact énergétique sur la base de données jugées plus fiables correspondant à des bâtiments des années 90 issues de travaux menés à cette période par le CSTB [5] [6]. Cependant, dans l'analyse économique, afin d'évaluer l'intérêt des peintures réfléchissantes sur un bâtiment combinant un ensemble de conditions favorables, le niveau d'isolation de la toiture a été dégradé à un niveau correspondant à un bâtiment des années 70.

Chaque variante est identifiée par son acronyme, avec les règles suivantes :

- Type de bâtiment : BU pour le bâtiment de bureaux – COM pour le bâtiment de commerces - ENS pour le bâtiment d'enseignement primaire ;
- Niveaux d'isolation, le niveau dégradé étant représenté par le rajout de l'acronyme ANC lorsqu'il s'agit d'un bâtiment ancien ;
- Puis des acronymes rappelant la variante réalisée :
 - o SVIT pour la variante sur le taux de surface vitrée en façade ;
 - o VTOI pour la variante sur le taux de surface vitrée en toiture ;
 - o ROTA pour la variante de rotation du bâtiment ;
 - o PM pour la présence de protections solaires mobiles ;
 - o MASQ pour la présence de masques lointains ;
 - o INE pour les différents types d'inertie ;
 - o APP pour les différentes valeurs d'apports internes ;
 - o PEINT pour les variantes avec mise en place du revêtement réfléchissant.

RAPPORT

Tableau 9 : Hypothèses retenues pour les variantes sur le bâtiment de bureau : BU et BU_ANC

Variante	Valeur de base	Variantes
Ratio de surface vitrée en façade	23 % BU-BASE	Valeur haute 30 % - BU-SVIT-HAUTE Valeur basse 17 % - BU-SVIT-BASSE
Ratio de surface de toiture	R+1 BU-BASE	R+3 - BU-R+3
Zone climatique	Zone médiane H2b BU-BASE	Zone froide H1c - BU-H1c Zone chaude H3 - BU-H3
Rotation du bâtiment	% surface vitrée par orientation : BU-BASE 27 % Sud 32 % Ouest 15 % Nord 35 % Est	Rotation de 90° vers l'Est BU-H2b-ROTA-90 Rotation de 180° BU-H2b-ROTA-180 Rotation de 90° vers l'Ouest BU-H2b-ROTA-270
Protections solaires mobiles	Sans protections BU-BASE	Avec protection BU-PM
Masque lointain	Aucun BU-BASE	Cas extrême – zone dense urbaine - bâtiment entouré d'autres bâtiments situés de l'autre côté des rues - BU-MASQ-EXTR Cas moyen – bâtiment en zone moins dense entouré de collines - BU-MASQ-MOY
Inertie	Moyenne BU-BASE	Variante Lourde BU-INE-LOU Variante Légère BU-INE-LEG
Apports internes	Scénario conventionnel BU-BASE	Cas moyen (x2) BU-APP-MOY Cas extrême (x5) BU-APP-EXTR
Variantes couplées		
Ratio de surface vitrée en façade ET protections solaires mobiles	23 % de surface vitrée Sans protections BU-BASE	Valeur haute 30 % de surface vitrée BU-SVIT-HAUTE Valeur basse 17 % de surface vitrée BU-SVIT-BASSE Sans protections
	23 % de surface vitrée Avec protections BU-PM	Valeur haute 30 % de surface vitrée BU-PM-SVIT-HAUTE Valeur basse 17 % de surface vitrée BU-PM-SVIT-BASSE Avec protections
Zone climatique ET Rotation du bâtiment	Zone médiane H2b % surface vitrée par orientation : 27 % Sud 32 % Ouest 15 % Nord 35 % Est BU-BASE	Rotation de 90° vers l'Est Zone climatique H1c BU-H1c-ROTA-90 Zone climatique H3 BU-H3-ROTA-90 Rotation de 180° Zone climatique H1c BU-H1c-ROTA-180 Zone climatique H3 BU-H3-ROTA-180 Rotation de 90° vers l'Ouest Zone climatique H1c BU-H1c-ROTA-270 Zone climatique H3 BU-H3-ROTA-270

RAPPORT

Tableau 10 : Hypothèses retenues pour les variantes sur le bâtiment de commerce : COM et COM_ANC

Variante	Valeur de base	Variantes
Ratio de surface vitrée en façade	11 % COM-BASE	Valeur moyenne 17 % - COM-SVIT-MOYENNE Valeur haute 25 % - COM-SVIT- HAUTE
Ratio de surface vitrée en toiture	1 % COM-BASE	Valeur moyenne 5 % - COM-VTOI-MOYENNE Valeur haute 10 % - COM-VTOI-HAUTE
Rotation du bâtiment	% surface vitrée par orientation : COM-BASE 4 % Sud 0 % Ouest 2 % Nord 3 1% Est	Rotation de 90° vers l'Est COM-H2b-ROTA-90 Rotation de 180° COM-H2b-ROTA-180 Rotation de 90° vers l'Ouest COM-H2b-ROTA-270
Protections solaires mobiles	Sans protections COM-BASE	Avec protection COM-PM
Masque lointain	Aucun COM-BASE	Cas extrême – zone dense urbaine - bâtiment entouré d'autres bâtiments situés de l'autre côté des rues - COM-MASQ-EXTR Cas moyen – bâtiment en zone moins dense entouré de collines - COM-MASQ-MOY
Zone climatique	Zone médiane H2b COM-BASE	Zone froide H1c - COM-H1c Zone chaude H3 - COM-H3
Inertie	Moyenne COM-BASE	Variante Lourde COM-INE-LOU Variante Légère COM-INE-LEG
Apports internes	Scénario conventionnel COM-BASE	Cas moyen (x2) COM-APP-MOY Cas extrême (x4) COM-APP-EXTR
Variantes couplées		
Ratio de surface vitrée en façade ET protections solaires mobiles	11 % de surface vitrée Sans protections COM-BASE	Valeur moyenne 17 % de surface vitrée COM-SVIT-MOYENNE Valeur haute 25 % de surface vitrée COM-SVIT- HAUTE Sans protections mobiles
	11 % de surface vitrée Avec protections mobiles COM-PM	Valeur moyenne 17 % de surface vitrée COM-PM-SVIT-MOYENNE Valeur haute 25% de surface vitrée COM-PM-SVIT- HAUTE Avec protections mobiles
Zone climatique ET Rotation du bâtiment	Zone médiane H2b % surface vitrée par orientation : 4 % Sud 0 % Ouest 2 % Nord 31 % Est COM-BASE	Rotation de 90° vers l'Est Zone climatique H1c COM-H1c-ROTA-90 Zone climatique H3 COM-H3-ROTA-90 Rotation de 180° Zone climatique H1c COM-H1c-ROTA-180 Zone climatique H3 COM-H3-ROTA-180 Rotation de 90° vers l'Ouest Zone climatique H1c COM-H1c-ROTA-270 Zone climatique H3 COM-H3-ROTA-270

RAPPORT

Tableau 11 : Hypothèses retenues pour les variantes sur le bâtiment d'enseignement : ENS et ENS_ANC

Variante	Valeur de base	Variantes
Ratio de surface vitrée en façade	26 % ENS-BASE	Valeur moyenne 33 % - ENS-SVIT-MOYENNE Valeur haute 47 % - ENS-SVIT- HAUTE
Rotation du bâtiment	% surface vitrée par orientation : ENS-BASE 42 % Sud 30 % Ouest 17 % Nord 19 % Est	Rotation de 90° vers l'Est ENS-H2b-ROTA-90 Rotation de 180° ENS-H2b-ROTA-180 Rotation de 90° vers l'Ouest ENS-H2b-ROTA-270
Protections solaires mobiles	Sans protections ENS-BASE	Avec protection ENS-PM
Masque lointain	Aucun ENS-BASE	Cas extrême – zone dense urbaine - bâtiment entouré d'autres bâtiments situés de l'autre côté des rues - ENS-MASQ-EXTR Cas moyen – bâtiment en zone moins dense entouré de collines - ENS-MASQ-MOY
Zone climatique	Zone médiane H2b ENS-BASE	Zone froide H1c - ENS-H1c Zone chaude H3 - ENS-H3
Inertie	Lourde ENS-BASE	Variante Moyenne ENS-INE-MOY Variante Légère ENS-INE-LEG
Apports internes	Scénario conventionnel ENS-BASE	Cas moyen (x2) ENS-APP-MOY Cas extrême (x5) ENS-APP-EXTR
Variantes couplées		
Ratio de surface vitrée en façade ET protections solaires mobiles	26 % de surface vitrée Sans protections ENS-BASE	Valeur moyenne 33 % de surface vitrée ENS-SVIT-MOYENNE Valeur haute 47 % de surface vitrée ENS-SVIT- HAUTE Sans protections mobiles
	26 % de surface vitrée Avec protections mobiles ENS-PM	Valeur moyenne 33 % de surface vitrée ENS-PM-SVIT-MOYENNE Valeur haute 47 % de surface vitrée ENS-PM-SVIT- HAUTE Avec protections mobiles
Zone climatique ET Rotation du bâtiment	Zone médiane H2b % surface vitrée par orientation : ENS-BASE 42 % Sud 30 % Ouest 17 % Nord 19 % Est	Rotation de 90° vers l'Est Zone climatique H1c ENS-H1c-ROTA-90 Zone climatique H3 ENS-H3-ROTA-90 Rotation de 180° Zone climatique H1c ENS-H1c-ROTA-180 Zone climatique H3 ENS-H3-ROTA-180 Rotation de 90° vers l'Ouest Zone climatique H1c ENS-H1c-ROTA-270 Zone climatique H3 ENS-H3-ROTA-270

Chaque variante est réalisée sur les bâtiments en version récente et ancienne, avec et sans application de la peinture.

4.3. Résultats de l'analyse de l'étape n° 1 : à dire d'expert

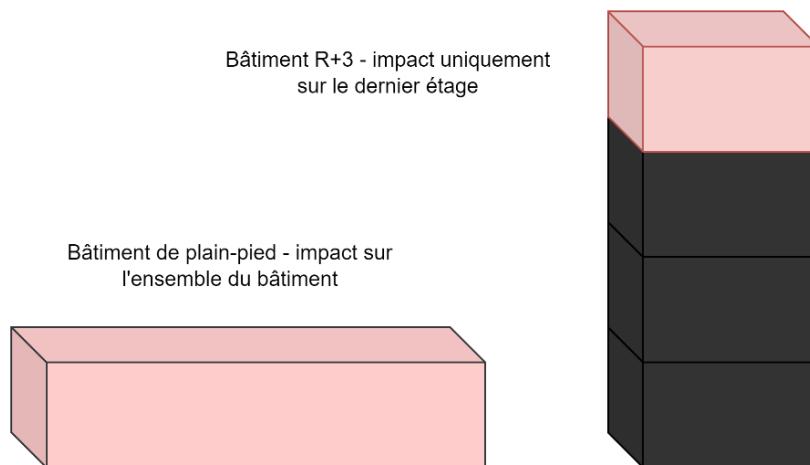
Les configurations de bâtiment les plus pertinentes pour la mise en œuvre d'une peinture réfléchissante sur la base de l'approche « à dire d'expert », sont détaillées ci-après.

1. L'impact de la peinture réfléchissante est visible principalement sur l'étage situé juste en-dessous de la toiture.

L'intervention réalisée lors de la mise en œuvre d'un revêtement réfléchissant sur la toiture va modifier uniquement les caractéristiques de cette paroi. L'impact est donc limité au niveau situé directement sous la toiture (des simulations réalisées dans l'approche n° 2 approfondissent cette réflexion en fournissant des éléments chiffrés étage par étage, dans le cas d'un bâtiment de type R+1 ou R+3).

De ce fait, à l'échelle bâtiment, l'impact de la mise en œuvre sera visible :

- Sur les bâtiments de plain-pied, qui sont donc plus favorables ;
- Sur le dernier étage d'un bâtiment à étages.

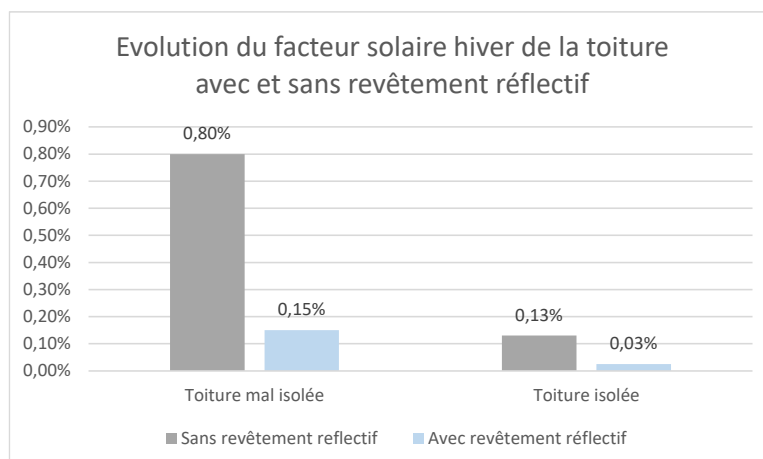


2. L'impact de la peinture réfléchissante est plus important sur des toitures peu ou pas isolées

La mise en œuvre d'un revêtement réfléchissant en surface de toiture affecte les propriétés de celle-ci, notamment son coefficient de transmission thermique U et son facteur solaire S. Cependant le niveau d'isolation sous-jacent intervient dans une proportion bien plus grande (cf. observation paragraphe 3.2)

L'application d'un revêtement réfléchissant fait passer le facteur solaire d'une toiture mal isolée de 0,8 % à 0,15 % alors que celui d'une toiture bien isolée passe de 0,13 % à 0,025 %. L'illustration ci-dessous présente ces résultats sous forme graphique.

Figure 14 : Comparaison de l'impact du niveau d'isolation et de l'application de la peinture sur le facteur solaire



Dans les 2 cas le facteur solaire est divisé par 6. Néanmoins, en raisonnant sur la base d'un flux solaire incident de 1000 W/m^2 , l'application de la peinture sur la toiture mal isolée permet de réduire le flux de chaleur traversant la paroi de $6,5 \text{ W/m}^2$ alors que dans le cas de la toiture bien isolée la réduction du flux de chaleur traversant n'est que de $1,05 \text{ W/m}^2$ (6 fois moins).

Par ailleurs, sur une toiture-non isolée, on remarque que le gain apporté par un renforcement de l'isolation sur le facteur solaire est similaire à celui de la mise en œuvre du revêtement réfléchissant. Cette isolation va cependant apporter un gain supplémentaire en limitant la transmission thermique surfacique de la paroi (division par 5 du coefficient U de la toiture) qui passe de $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ à $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ et agir de manière positive en hiver (réduction des pertes thermiques dues à la toiture) et en été (réduction des apports solaires via la toiture). **Il est donc préférable, lorsque cela est possible, de privilégier la mise en place d'une isolation performante en toiture. La mise en œuvre combinée d'une isolation thermique et d'un revêtement réfléchissant peut s'avérer également intéressante pour en cumuler les effets.**

3. L'impact de la peinture réfléchissante est plus important sur des bâtiments ayant des besoins de froid élevés.

Comme il a été dit précédemment, la mise en œuvre d'un revêtement réfléchissant conduit à diminuer le facteur solaire de la toiture. Et cela, aussi bien durant la période hivernale, qu'estivale.

Il y aura donc un double effet : d'une part une augmentation des besoins de chauffage (les apports solaires récupérés par la toiture étant moindres) et d'autre part une diminution des besoins de refroidissement, et également de l'inconfort estival lorsque le bâtiment n'est pas climatisé.

L'approche numérique permet de quantifier ces deux mouvements opposés. Il apparaît néanmoins logique de considérer que les bâtiments présentant les besoins de froid les plus importants seront les plus à même de bénéficier de manière positive de la mise en œuvre du revêtement. Cela peut être lié aussi bien :

À la situation géographique du bâtiment : en métropole, la réglementation thermique découpe la France en zones climatiques, la plus chaude étant la zone H3. L'approche numérique prévoit ainsi de déplacer virtuellement le bâtiment dans des zones climatiques représentatives des différents climats métropolitains pour évaluer l'impact du climat sur l'effet du revêtement ;

À ses particularités architecturales : les bâtiments présentant des surfaces vitrées importantes, qui ont structurellement un facteur solaire plus important que les parois opaques (l'ordre de grandeur peut varier de 50 à 70 % à comparer aux valeurs beaucoup plus faibles pour les parois opaques) récupéreront plus d'apports solaires que des bâtiments proportionnellement moins vitrés. Et ce, d'autant plus que cette surface vitrée est orientée au sud. L'approche numérique prévoit ainsi de faire varier le taux de vitrage sur les façades du bâtiment, ainsi que de faire

pivoter le bâtiment sur les différentes orientations, de manière à orienter les façades les plus vitrées alternativement au Nord, Sud, Est et Ouest ;

À ses apports internes : les bâtiments présentant les apports internes les plus importants (par exemple du fait de la présence d'équipements dégageant beaucoup d'énergie) sont ceux présentant le plus de besoins de froid, et potentiellement le plus d'inconfort estival. Par exemple, les data centers présentent ce type de profil, et semblent donc être des candidats intéressants pour la mise en œuvre du revêtement réfléchissant. Les bâtiments de type data centers n'étant pas présents dans la base OPE, ils ne font pas l'objet de l'approche numérique. Néanmoins, dans l'approche numérique une augmentation des apports internes a été prise en compte dans l'étude de sensibilité et appliquée aux bâtiments test afin de mesurer l'importance de ce paramètre.

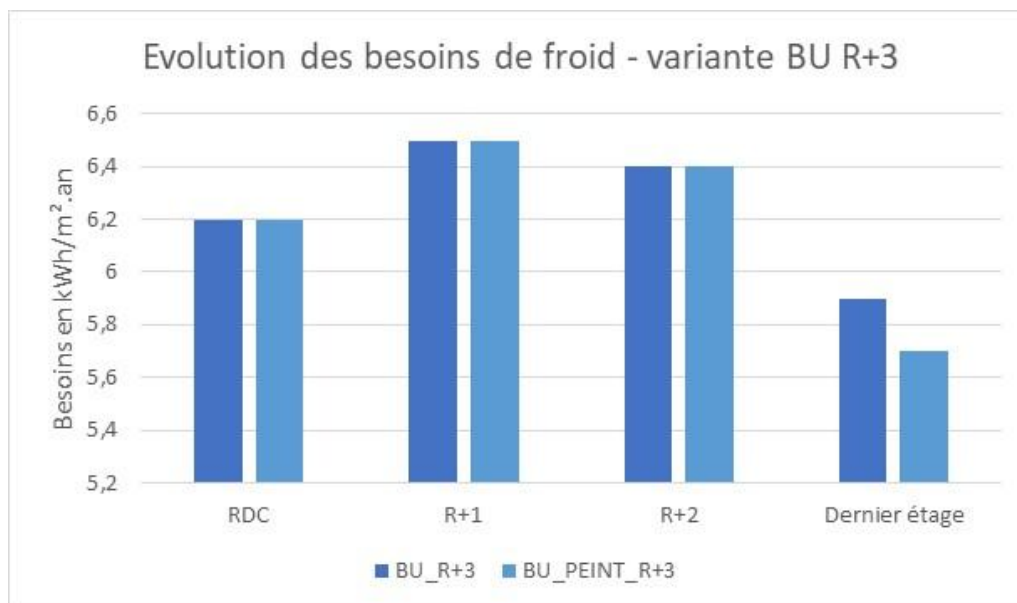
4.4. Résultats de l'approche n° 2 dite numérique

À partir des résultats chiffrés des simulations réalisées sur les différents bâtiments, les principaux enseignements qui peuvent être tirés sont présentés ci-après.

4.4.1. Un impact limité au dernier étage d'une construction

Ce point soulevé dans l'approche à dire d'expert est évalué sur la base des résultats de la variante réalisée sur le bureau. L'évaluation consiste à simuler un bâtiment de type R+3 (le cas de base est de type R+1), et regarder l'impact de la mise en œuvre de la peinture sur les différents étages. La configuration sans peinture (BU_R+3) est donc comparée à la configuration avec peinture (BU_PEINT_R+3).

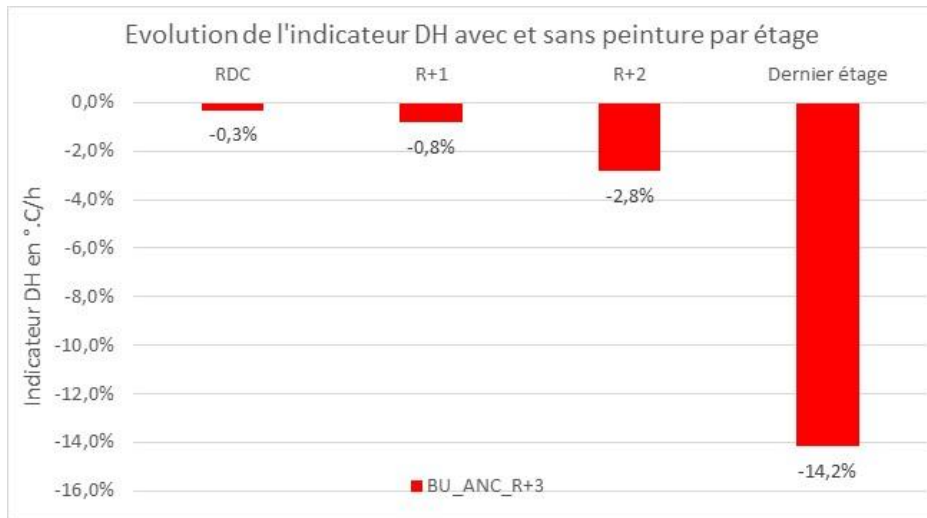
Figure 15 : Évolution des besoins de froid pour le bâtiment de bureau récent en R+3, avec et sans peinture en toiture, pour chacun des étages



Ce graphique montre clairement que l'impact n'est visible que sur le dernier étage, avec une réduction des besoins de froid de 5 %.

Sur l'indicateur DH, le graphique ci-dessous présente le gain obtenu sur cet indicateur pour chacun des étages, entre la configuration sans peinture (BU_ANC_R+3) et la configuration avec peinture (BU_ANC_PEINT_R+3). L'impact observé est faible aux étages autres que le dernier étage. En effet, l'impact le plus important se situe au dernier étage, avec une baisse de 14 %, alors qu'elle est limitée de 0,3 à 3 % sur les autres étages.

Figure 16 : Évolution de l'indicateur de confort d'été DH pour le bâtiment de bureau ancien en R+3, avec et sans peinture en toiture, pour chacun des étages



Les résultats obtenus montrent un impact nul ou très faible sur les étages autre que le dernier étage du bâtiment de bureaux. **L'impact de la mise en œuvre d'un revêtement réfléchissant se limite donc au dernier étage des bâtiments en comportant plusieurs.**

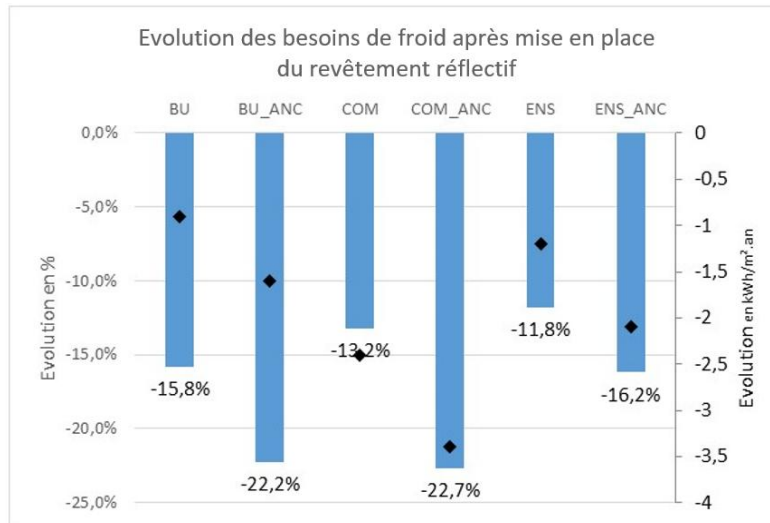
Dans les analyses suivantes, lorsqu'il s'agira du bâtiment de bureaux, l'examen se limitera aux résultats du dernier étage. Pour les autres usages, les bâtiments sont de plain-pied.

4.4.2. Les niveaux d'impact

Dans ce chapitre, l'analyse est conduite sur les bâtiments de base (sans variante) décrits au chapitre 4.1.1 pour évaluer l'impact de la mise en place d'un revêtement réfléchissant. Cette analyse se décline pour les trois usages étudiés, et pour les bâtiments de base en version récente et ancienne. La zone climatique considérée est une zone climatique moyenne, la zone H2b.

L'évolution des besoins de froid est d'abord regardée pour les différents bâtiments, en présentant à la fois l'évolution en % (les histogrammes), et l'évolution en valeur absolue (les points en kWh/m².an). **Les gains présentés pour le bâtiment de bureau concernent uniquement le dernier étage.** Les gains ramenés à l'échelle du bâtiment entier sont bien moindres.

Figure 17 : Évolution des besoins de froid pour les différents bâtiments de base après application du revêtement réfléchissant



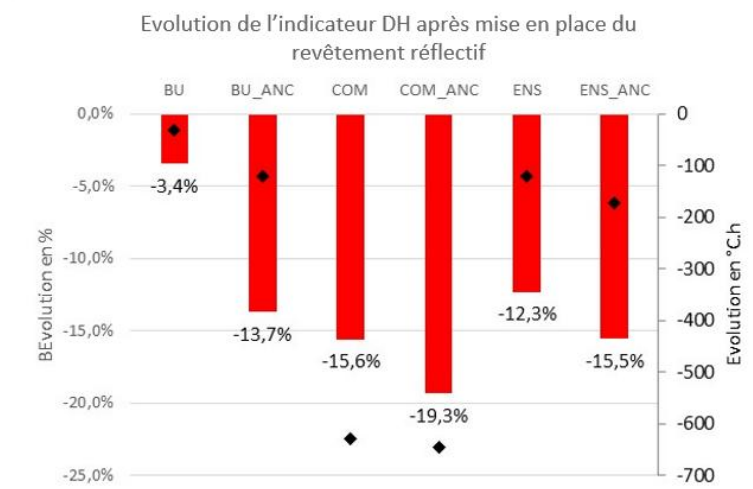
Les besoins de froid diminuent logiquement pour l'ensemble des usages après application d'un revêtement réfléchissant. La baisse va de 12 % pour le cas le plus défavorable à 23 % pour le plus favorable. Ces gains pourraient être plus importants dans le cas de revêtements existants très sombres ayant un coefficient d'absorption avant application de la peinture supérieur à 0,6 (hypothèse adoptée dans la présente étude).

Les gains obtenus en valeur relative sont proches pour les différents usages de bâtiments, quoique légèrement moins importants pour le bâtiment d'enseignement. Mais, en termes de valeur absolue, les gains du bâtiment d'enseignement sont similaires à ceux du dernier étage du bureau.

En termes de valeur absolue, les gains varient entre 0,9 kWh/m².an pour le bâtiment de bureau à 3,5 kWh/m².an pour le bâtiment de commerce ancien. Les gains plus importants en commerce s'expliquent par des besoins de froid de base plus importants.

Un autre élément intéressant à noter est que le gain, en termes de pourcentage et de valeur absolue, est toujours plus important pour les bâtiments anciens, que les bâtiments récents (confirmant un des points soulevés dans l'approche à dire d'expert (cf. paragraphe 5.3).

Figure 18 : Evolution du confort d'été (indicateur DH) pour les différents bâtiments de base après application du revêtement réfléchissant 4.3



Si l'on s'intéresse maintenant à l'impact sur le confort d'été via l'indicateur DH, on note également un effet bénéfique. Les gains vont de 3,4 % à près de 20 %.

Là aussi, les gains sont plus importants pour les bâtiments anciens que pour les bâtiments récents. L'impact du procédé est plus important sur une toiture moins bien isolée, qui présente de base un facteur solaire plus élevé.

Les gains relatifs sont assez homogènes, excepté pour le dernier étage du bâtiment de bureau neuf. Cela s'explique par un niveau d'isolation élevé sur la toiture du bureau (U de $0,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) comparativement aux autres toitures (comprises entre $0,25$ et $0,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Comme indiqué dans la partie « à dire d'expert », les gains sont donc plus importants sur des toitures moins bien isolées.

En termes de valeur absolue, les gains vont de $30 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ sur le bureau récent à près de $650 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ en commerces anciens. Comme indiqué dans le paragraphe 4.2 dédié aux indicateurs observés, et notamment à l'indicateur DH, le niveau de cet indicateur varie largement entre les différents usages. Il est ainsi, de base, plus élevé en commerces. Ce qui explique le gain en valeur absolue plus important. Le rapport est de 1 à 4 pour l'indicateur DH (entre 800 et 900 $^\circ\text{C}\cdot\text{H}$ pour le bureau et entre 3 500 et 4 000 pour le commerce).

L'impact sur les besoins de chauffage est analysé dans le chapitre suivant.

La mise en place du revêtement réfléchissant permet de faire baisser les besoins de froid et le niveau d'inconfort d'été du bâtiment. **Les gains obtenus sont plus importants sur les bâtiments anciens**, du fait de la présence de toitures moins bien isolées.

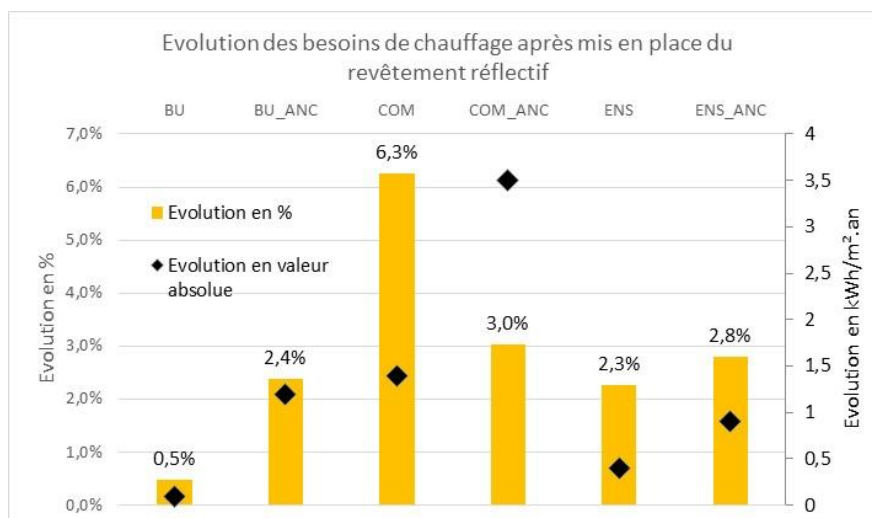
Les gains sur les besoins de froid sont au maximum de 23 % sur l'ensemble des cas étudiés.

4.4.3. Un impact positif sur les besoins de froid et le confort d'été, mais négatif sur les besoins de chauffage

Les éléments ci-dessus se sont attachés à montrer l'impact de l'application du revêtement réfléchissant sur les besoins de froid, et le confort d'été du bâtiment. **Mais, si la diminution du facteur solaire de la toiture est bénéfique durant les périodes estivales (limitation des apports solaires entrant par la toiture), elle est néfaste en hiver pour cette même raison.**

Le même graphique que dans le paragraphe précédent est présenté ci-dessous, mais pour les besoins de chauffage.

Figure 19 : Évolution des besoins de chauffage pour les différents bâtiments de base après application du revêtement réfléchissant

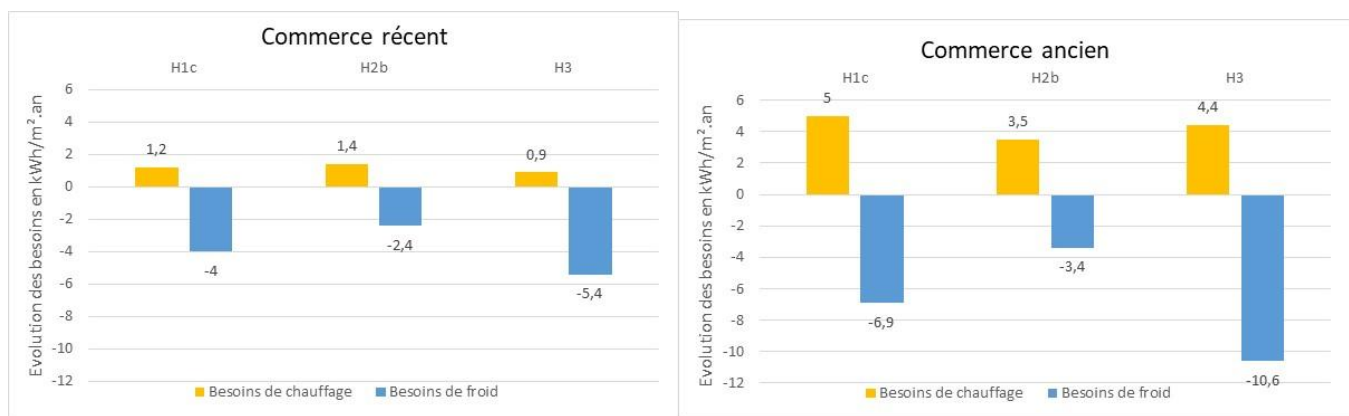


L'impact de la mise en œuvre du revêtement est cette fois-ci négatif, puisqu'il conduit à une augmentation des besoins de chauffage pour les différents bâtiments. L'impact va de 0,5 % pour le dernier étage du bureau (qui possède une toiture très isolée, ce qui limite l'impact du revêtement réfléchissant) à 6,3 % pour le commerce récent. En termes de valeur absolue, les augmentations vont de 0,1 kWh/m².an pour le bureau à 3,5 kWh/m².an pour le commerce ancien.

L'impact est à nouveau plus important pour les bâtiments anciens que pour les bâtiments récents, du moins en valeur absolue. Pour le bâtiment de commerces, on a une inversion entre l'impact relatif et l'impact absolu, lié au fait que les besoins de chauffage sont très différents (rapport de 1 à 5).

Il est ainsi intéressant de comparer le gain apporté par la peinture en été, à la perte occasionnée en hiver. Pour cela, les résultats de la variante sur la zone climatique obtenues sur le bâtiment de commerce sont exploités.

Figure 20 : Évolution des besoins de chauffage et de refroidissement pour le bâtiment de commerce, récent (à gauche) et ancien (à droite), avec et sans peinture en toiture pour différentes zones climatique



La mise en place du revêtement réfléchissant conduit à augmenter les besoins de chauffage. Et, si les baisses de besoins de refroidissement peuvent être importantes (jusqu'à 10,6 kWh/m².an pour le commerce ancien en zone H3, soit 21 % du besoin), les hausses de besoins de chauffage ne sont pas négligeables, surtout pour le bâtiment ancien (+ 5 kWh/an pour la zone H1, soit 4 % des besoins de chauffage).

Ainsi, selon la zone climatique, l'impact de la mise en place de la peinture, en regardant cette balance entre effets positifs et négatif, va être plus ou moins bénéfique pour le bâtiment. L'analyse réalisée sur le bâtiment de commerce est transposable aux autres usages étudiés.

Selon les types de chauffage et de refroidissement utilisés dans le bâtiment, et notamment selon la source d'énergie utilisée (par exemple gaz en hiver et électricité en été), le bilan carbone de l'opération pourrait donc être négatif selon la zone climatique. De ce point de vue, **il est à noter que le bâtiment récent, mieux isolé, est le mieux protégé de l'impact sur l'augmentation des besoins de chauffage.**

Néanmoins, la baisse des besoins de refroidissement est toujours supérieure à la hausse des besoins de chauffage, excepté pour la zone H2b dans le cas du commerce ancien, où les évolutions se compensent.

Le bilan entre hausse et baisse est le plus nettement favorable dans la zone H3 quel que soit l'âge du bâtiment.

Les évolutions sont contrastées à la suite de la mise en place du revêtement réfléchissant :

Diminution des besoins de froid, et potentiellement des consommations de froid lorsque le bâtiment est équipé d'un système de climatisation ;

Diminution de l'inconfort d'été, notamment pour les bâtiments non équipés d'un système de refroidissement ;
Augmentation des besoins de chauffage, et donc des consommations.

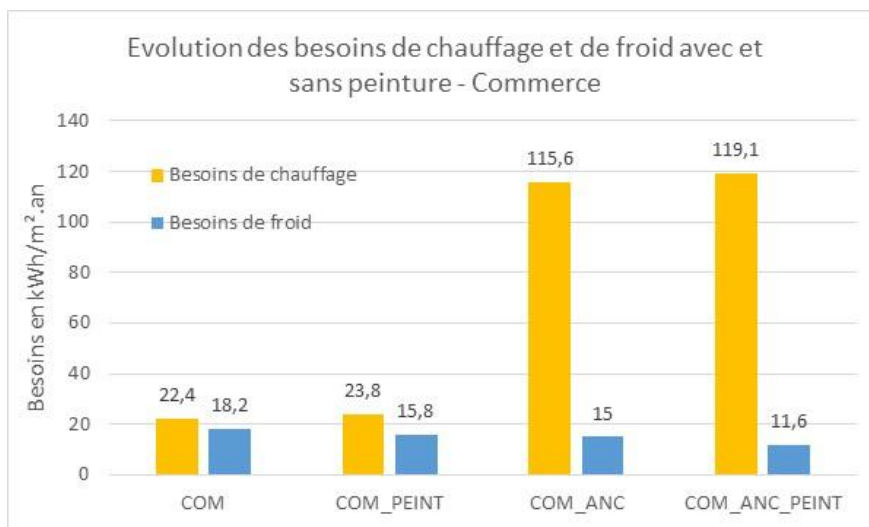
Ainsi, **la zone H3, zone métropolitaine la plus chaude, semble la zone la plus propice** à la mise en place du revêtement, celle pour laquelle le bilan entre hausse et baisse est le plus favorable.

4.4.4. Remise en perspective

Suite aux conclusions tirées dans le chapitre précédent, notamment concernant l'impact plus important de la mise en œuvre du revêtement sur les bâtiments anciens, il est important de remettre ces résultats en perspective avec un travail de **rénovation thermique** qui conduirait à mieux isoler ces bâtiments.

C'est l'objet du graphique ci-dessous, réalisé sur le bâtiment de commerce, mais qui pourrait être étendu aux autres usages étudiés.

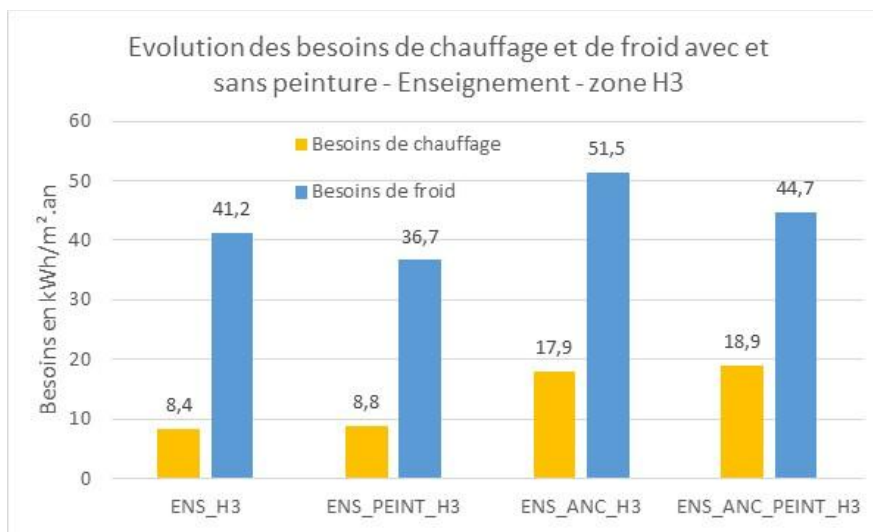
Figure 21 : Évolution des besoins de chauffage et de froid pour les bâtiments de commerce récent et ancien, avec et sans peinture en toiture



En effet, même si la mise en œuvre de la peinture réfléchissante permet des gains sur les besoins de froid, un bilan global réalisé sur les besoins de chauffage et de froid combinés à l'échelle du bâtiment montre tout l'intérêt de la rénovation thermique.

La somme des besoins de chauffage et de froid est autour de 40 kWh/m².an pour le bâtiment récent, contre 130 kWh/m².an pour le bâtiment ancien.

Figure 22 : Évolution des besoins de chauffage et de froid pour les bâtiments d'enseignement récent et ancien en zone H3, avec et sans peinture en toiture



Le même phénomène est observé pour le bâtiment d'enseignement, même en zone H3, zone climatique chaude qui conduit à ce que les besoins de froid dépassent les besoins de chauffage. Le bilan est autour de 45-50 kWh/m².an pour le bâtiment récent, et de 63-68 kWh/m².an pour le bâtiment ancien.

À nouveau, il faut souligner **l'importance de privilégier la mise en place d'une isolation thermique à celle d'une peinture réfléchissante sur des bâtiments mal isolés**, dès lors que l'enjeu sur le bâtiment étudié dépasse le seul cadre du confort d'été.

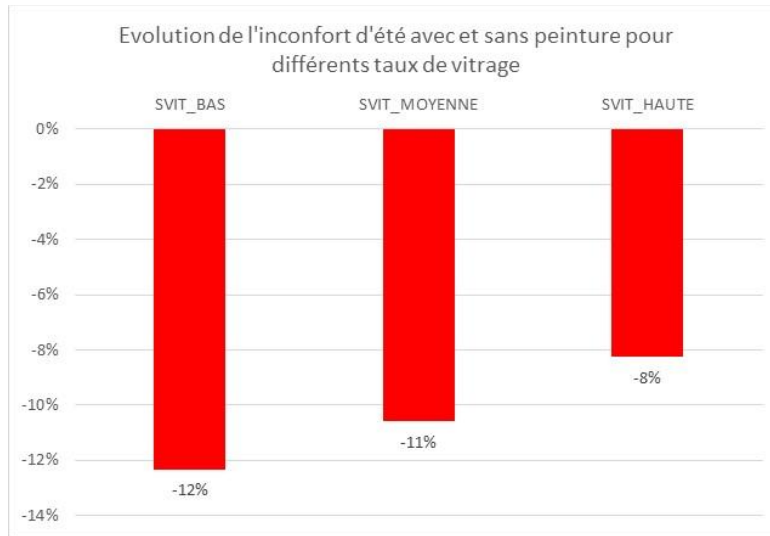
4.4.5. Un impact proportionné au « poids » de la toiture sur le bâtiment

Les différentes simulations menées ont permis de mettre en évidence un lien entre l'impact de la mise en place du revêtement réfléchissant en toiture, et le « poids » de cette toiture sur la thermique du bâtiment (la part des apports solaires entrants dans le bâtiment).

Logiquement, plus les apports solaires entrants par la toiture représentent une part importante des apports solaires entrants dans le bâtiment (par rapport à ceux entrant par les autres parois opaques ou par les baies vitrées), plus la mise en œuvre d'un revêtement réfléchissant sur cette toiture va avoir un impact important sur les besoins de froid et le confort d'été.

À titre d'exemple, les résultats ci-dessous obtenus sur le bâtiment d'enseignement (mais valable également pour les usages de bureaux et de commerces), pour la variante sur le taux de vitrage.

Figure 23 : Évolution de l'indicateur DH pour le bâtiment d'enseignement récent, avec et sans peinture en toiture pour différents taux de vitrage (bas, haut, moyen)

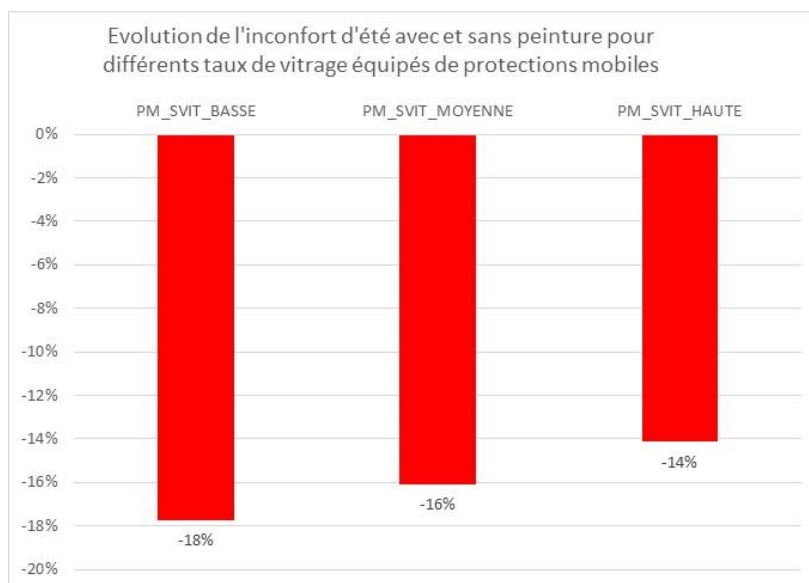


La figure ci-dessus représente l'évolution (ici la baisse) de l'indicateur DH à la suite de la mise en place du revêtement réfléchissant pour le bâtiment d'enseignement récent, pour différents taux de vitrage en façade (bas 26 %, moyen 33 % et haut 47 %). Le gain relatif apporté augmente lorsque le taux de vitrage diminue. Ceci est différent par rapport aux hypothèses émises dans l'approche n° 1.

Lorsque le taux de vitrage diminue, la part des apports solaires totaux passant par la toiture augmente. Diminuer le facteur solaire de la toiture permet donc un gain plus important.

Pour appuyer cette analyse, le même graphique est tracé ci-après pour le bâtiment d'enseignement, avec des baies comportant cette fois-ci des protections mobiles.

Figure 24 : Evolution de l'indicateur DH pour le bâtiment d'enseignement récent, avec et sans peinture en toiture pour différents taux de vitrage (bas, haut, moyen) et équipés de protections mobiles



Le gain relatif apporté par la mise en place du revêtement augmente toujours lorsque le taux de vitrage diminue. Cependant, par rapport au graphique précédent, les gains relatifs apportés sont plus importants.

L'explication vient du fait que la mise en place de protections solaires mobiles sur les baies vient diminuer les apports solaires entrants par celles-ci. La part relative des apports solaires passant par la toiture est donc plus importante. La mise en place d'un revêtement réfléchissant a alors plus d'impact.

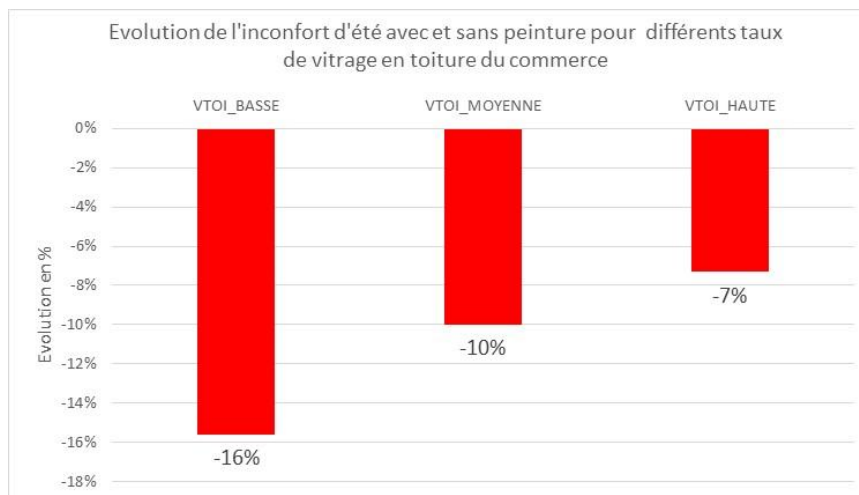
Même si cela dépasse un peu le cadre de l'analyse, il est à noter un élément intéressant, à savoir que, selon le taux de vitrage du bâtiment, la mise en place de protections solaires mobiles peut avoir plus ou moins d'impact en termes de réduction des besoins de refroidissement et de l'inconfort d'été que la mise en place du revêtement réfléchissant.

Par exemple, pour le bâtiment de bureaux vitré à hauteur de 23 % en façade, la mise en œuvre des protections solaires mobiles est plus performante que la mise en œuvre du revêtement réfléchissant. Ce n'est plus le cas pour le bâtiment de commerces, vitré à hauteur de 11 % seulement.

Néanmoins, on constate que l'association des deux mesures est possible, et permet donc même d'augmenter la performance de la mise en place du revêtement réfléchissant.

Enfin, pour compléter encore ce point, il y a ci-dessous un graphique pour le bâtiment de commerce pour la variante sur le ratio de surface vitrée en toiture, qui va de 1 (valeur basse) à 10 % (valeur haute).

Figure 25 : Évolution de l'indicateur DH pour le bâtiment de commerce récent, avec et sans peinture en toiture pour différents taux de vitrage (bas, moyen et haut) en toiture



Le gain est logiquement plus élevé (16 %) lorsque la surface vitrée en toiture est basse.

4.4.6. Focus sur les bâtiments de type datacenters

Un des usages ciblés en amont de la réalisation de l'étude sont les bâtiments de type datacenter.

Ces bâtiments se caractérisent par des apports internes très élevés, liés aux équipements informatiques abrités dans ces bâtiments. Ils se caractérisent également par une température de climatisation souvent basse, autour de 20 °C, nécessaire au bon fonctionnement des serveurs informatiques.

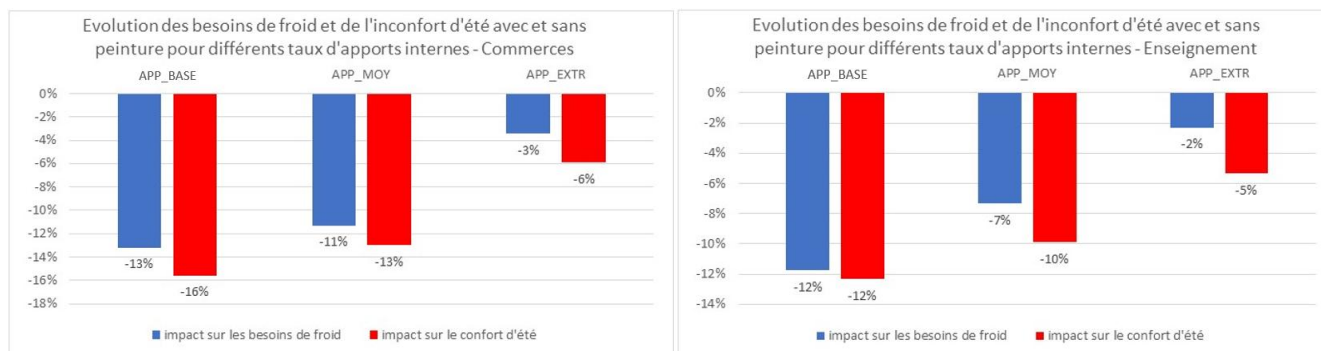
Le rafraîchissement opéré est donc continu et il n'y a pas de besoins de chauffage associés à ces bâtiments. Compte tenu de l'impact de la mise en œuvre d'un revêtement réfléchissant (positif sur les besoins de froid, mais négatif sur les besoins de chauffage), les caractéristiques de ces bâtiments en font des candidats potentiels très intéressants, puisque l'impact sera uniquement positif, et pas négatif comme on a pu le voir précédemment.

Il est cependant important d'avoir en tête que le gain apporté sera limité. En effet, la mise en œuvre du revêtement va limiter uniquement les apports solaires externes. Or, la majorité des apports dans ce type de bâtiment est interne.

RAPPORT

Pour visualiser cela, des variantes ont été réalisées sur les bâtiments de commerce et d'enseignement dans lesquelles nous avons augmenté les apports internes (multipliés par 2 voire 5 par rapport aux apports internes conventionnels, ces chiffres ont été choisis pour couvrir un panel assez large d'apports internes – avec des apports encore plus élevés, le moteur de calcul prédit des températures trop hautes et qui ne sont plus jugées réalistes, résultant dans l'arrêt de la simulation). Les graphiques ci-dessous représentent les gains obtenus selon le niveau d'apports internes.

Figure 26 : Evolution des besoins de froid et de l'indicateur DH pour les bâtiments d'enseignement (à gauche) et de commerce (à droite), avec et sans peinture en toiture pour différents taux d'apports internes



Rappel : APP_BASE correspond aux apports internes de base du bâtiment moyen sélectionné. APP_MOY correspond à des apports internes doublés par rapport aux apports internes de base. APP_EXTR correspond à des apports internes multipliés par 5 par rapport aux apports internes de base.

Ces graphiques, réalisés sur deux typologies (commerces et enseignement), montrent les mêmes tendances. A savoir que la diminution relative des besoins de froid et de l'inconfort d'été baisse lorsque les apports internes augmentent.

La mise en place du revêtement réfléchissant en toiture diminue uniquement les apports solaires externes mais pas les apports internes. Si les apports internes sont augmentés, la part liée aux apports solaires par la toiture sur les besoins de froid et l'inconfort d'été diminue, tout comme l'impact du revêtement réfléchissant.

C'est la même tendance que mentionnée au point précédent sur la liaison entre le poids de la toiture sur les apports du bâtiment, et l'impact du revêtement réfléchissant, mais cette fois-ci en lien avec les apports internes.

Les caractéristiques des datacenters (apports internes importants conduisant à des besoins de froid continuels, et à l'absence de besoins de chauffage) en font des **candidats potentiels très intéressants**.

Il est cependant important d'avoir en tête que **le gain apporté sera limité**. En effet, l'application du revêtement va limiter uniquement les apports solaires externes. Or, la majorité des apports dans ce type de bâtiment est interne.

4.4.7. Focus sur les bâtiments de type hôpitaux

Un autre usage ciblé en amont de la réalisation de l'étude sont les hôpitaux.

Il s'agit de bâtiments pour lesquels le public accueilli est plus vulnérable que dans d'autres bâtiments tertiaires (plus âgé en moyenne, et malade, donc supportant moins la chaleur, et ayant moins de possibilités physiques pour y résister). Le sujet du confort d'été est donc plus critique pour ces bâtiments.

En termes de configuration, ils peuvent être schématiquement séparés en deux parties en suivant ce qui est fait dans la réglementation thermique et environnementale RE2020 :

RAPPORT

Une partie occupée **de jour**, qui correspond aux locaux administratifs, aux locaux dédiés aux consultations et hospitalisations de jour, aux zones plus techniques spécifiques à un hôpital, aux circulations, sanitaires et autres locaux associés ;

Une partie occupée **de jour et de nuit**, qui correspond aux chambres des patients hospitalisés, et à tous les locaux associés (bureaux, salles d'attente, circulations, sanitaires, ...).

Pour la partie occupée de jour, les conclusions observées sur les autres usages, dans des bâtiments occupés uniquement de jour également, sont extrapolables aux hôpitaux.

La question qui se pose concerne donc la partie occupée de jour et de nuit. Cela change-t-il d'une manière ou d'une autre les conclusions précédemment mentionnées ?

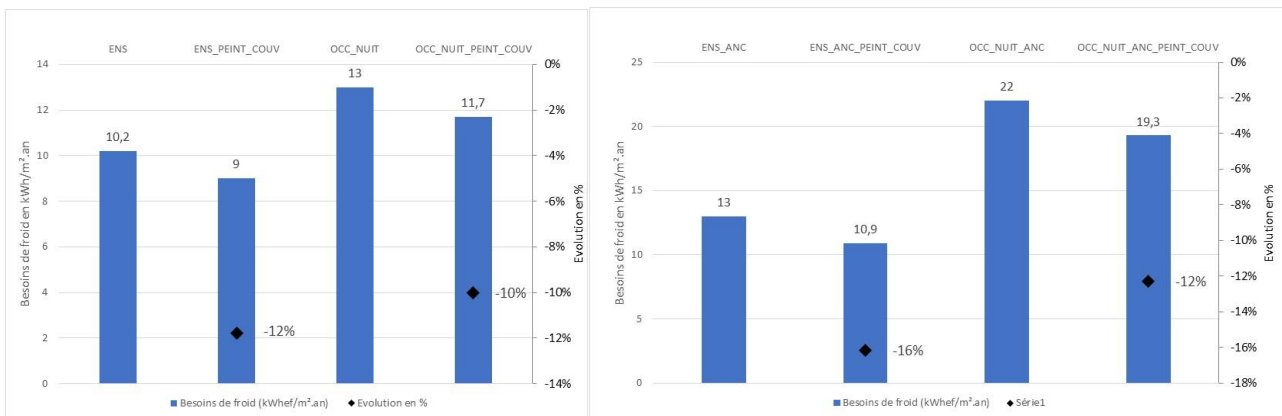
Du point de vue du confort d'été, l'indicateur DH étant calculé durant les périodes d'occupation (cf. paragraphe 4.2), sa valeur augmente donc logiquement puisque la période d'occupation augmente. Mais d'un autre côté, la majorité des heures d'occupation supplémentaires ont lieu la nuit, période durant laquelle il n'y a pas d'ensoleillement. La mise en œuvre du revêtement réfléchissant a donc moins d'impact durant cette période (il a tout de même un impact par l'abaissement de température provoquée durant la journée, et qui bénéficie aux heures nocturnes, selon l'inertie du bâtiment).

Il est donc possible, d'une part que l'inconfort soit plus important en termes de °C.h, mais que l'impact de la mise en œuvre du revêtement réfléchissant soit similaire aux autres usages en termes d'efficacité.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons réalisé une variante spécifique appliquée au bâtiment d'enseignement, et consistant à simuler une occupation nocturne pour ce bâtiment en plus de l'occupation diurne.

On trouve les résultats ci-dessous pour les besoins de froid, pour le bâtiment récent (à gauche), et ancien (à droite), avec et sans peinture.

Figure 27 : Evolution des besoins de froid pour le bâtiment d'enseignement récent (à gauche) et ancien (à droite), avec et sans peinture en toiture pour des occupations de jour (cas de base), et de jour et de nuit.

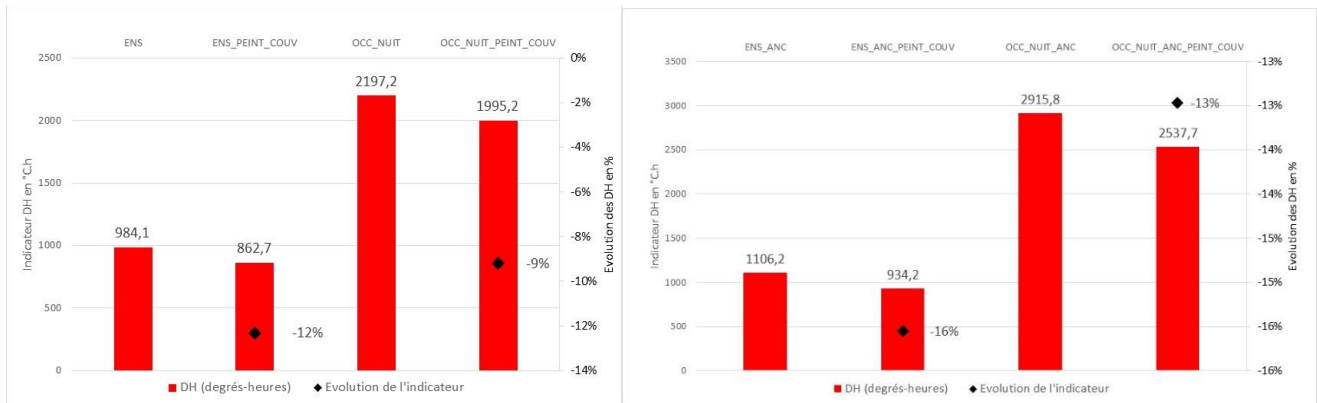


Les besoins de froid, pour le bâtiment occupé jour et nuit sont supérieurs à ceux du bâtiment occupé seulement de jour. L'occupation de nuit entraîne donc une augmentation des besoins de froid, plus marquée sur le bâtiment ancien.

Les réductions de besoins de froid amenées par la peinture sont en valeur relative plus faibles lorsque le bâtiment est occupé de jour et de nuit (par exemple -10 % contre -12 % pour le bâtiment récent), mais ces réductions sont plus importantes en valeur absolue, du fait que les besoins de froid sont plus élevés.

Les mêmes graphiques sont obtenus pour l'indicateur confort d'été.

Figure 28 : Evolution des degrés-heures pour le bâtiment d'enseignement récent (à gauche) et ancien (à droite), avec et sans peinture en toiture pour des occupations de jour (cas de base), et de jour et de nuit



Les constatations faites sur les besoins de froid sont également valables sur l'indicateur de confort d'été. Le nombre de degrés-heures est plus élevé lorsque le bâtiment est occupé de jour et de nuit et l'impact de la mise en place de la peinture réfléchissante est un peu moins important en valeur relative (par exemple -16 % contre -13 % sur le bâtiment ancien) pour le bâtiment occupé de jour et de nuit, mais plus important en valeur absolue, du fait des valeurs plus élevées de l'indicateur.

Ces observations, certes limitées en termes de représentativité, confirment les évolutions envisagées. Les hôpitaux sont donc des bâtiments dont l'inconfort en été est, de base, toutes conditions égales par ailleurs sur le bâtiment, plus élevé du fait d'une occupation plus longue que d'autres bâtiments tertiaires, mais le fait qu'ils soient occupés de jour et de nuit ne change pas les conclusions entrevues sur les autres usages tertiaires, qui peuvent donc lui être appliquées.

Les caractéristiques des hôpitaux (public accueilli particulièrement vulnérable, occupation de jour et de nuit pour une partie du bâtiment qui va augmenter les périodes d'inconfort subies) en font des **bâtiments particulièrement sensibles aux problématiques de confort d'été**.

Ils présentent, intrinsèquement, des niveaux d'inconfort DH plus élevés que des bâtiments identiques occupés seulement de manière diurne.

Les observations faites sur les autres bâtiments tertiaires peuvent être extrapolées à ces bâtiments, aussi bien sur la partie occupée uniquement de jour, que sur les parties occupées nuit et jour. Néanmoins, pour ces dernières, l'impact de la mise en œuvre du revêtement réfléchissant présente des réductions plus faibles en valeur relative (impact moins important la nuit) mais plus importantes en valeur absolue (niveau d'inconfort plus élevé).

4.4.8. Extrapolation à d'autres usages tertiaires

Les travaux menés sur les trois usages retenus montrent des évolutions similaires lorsque le revêtement réfléchissant est mis en place, aussi bien sur les cas de base, que sur les variantes. Les niveaux d'impact peuvent varier, comme le montrent les chapitres précédents, mais le sens d'évolution reste similaire, et les situations les plus favorables également.

De cette analyse, réalisée sur trois usages de bâtiments tertiaires, et sur un modèle moyen de bâtiment de chaque type (avec une version récente et une version ancienne), ressort le fait que certains types de bâtiments, du fait de

leurs caractéristiques géométriques, de leur localisation, de l'isolation de leur toiture, bénéficient plus que d'autres de la mise en place d'une peinture réfléchissante.

Ces observations peuvent raisonnablement être extrapolé à l'ensemble des types de bâtiments tertiaires.

On peut donc dresser ce que l'on appelle un portrait-robot du type de bâtiment pour lequel la mise en place d'un revêtement réfléchissant soit la plus pertinente. On trouve ces éléments ci-dessous :

- Bâtiment de plain-pied (l'effet sera limité au dernier étage dans les autres cas) ;
- Bâtiment faiblement vitré et dont les baies vitrées disposent de protections solaires efficaces ;
- Bâtiment dont les besoins de froid sont plus importants que les besoins de chauffage (bâtiment situé en zone climatique H3 ou disposant d'apports internes importants (cas extrême des datacenters) ;
- Bâtiment pour lequel la toiture est mal isolée. L'association de la peinture en complément d'une isolation limitée pour des raisons techniques (par ex : cas des relevés d'acrotères insuffisants) peut constituer une synergie intéressante.
- Bâtiment pour lequel la couleur de la toiture est très sombre d'origine ($\alpha > 0,8$).

À l'inverse, certaines situations apparaissent contre-productives et sont à éviter :

- Bâtiments situés en zone climatique froide (le gain obtenu en été est faible, et à contrario la surconsommation en hiver peut être importante, surtout pour des bâtiments mal isolés).

Sur ce dernier point, pour les bâtiments situés en zone climatique moyenne, la réponse n'est pas aussi tranchée. Cela va dépendre des caractéristiques du bâtiment déjà mentionnées plus haut. L'impact négatif obtenu en conditions hivernales n'est pas négligeable, et peut même venir supplanter l'impact positif obtenu en été.

4.4.9. Extrapolation à d'autres solutions alternatives (exploitation des cartographies à l'échelle bâtiment)

L'objectif de cette section est d'illustrer la manière avec laquelle les résultats mis à disposition dans cette étude peuvent être utilisés afin d'évaluer l'impact d'autres solutions alternatives dont on connaît les performances à l'échelle de la paroi. Les cartographies utilisées sont fournies au paragraphe 3.2 et en annexe 3.

À partir des caractéristiques énergétiques de la surface de la paroi (intégrant des propriétés réfléchissantes ou pas) et des caractéristiques de la toiture, les indicateurs à l'échelle bâtiment (besoin de chaud, besoin de froid, Cep, DH), pourront être déterminées.

À titre d'exemple, le cas du bâtiment de commerce ancien (COM_ANC) est utilisé. Les propriétés des produits qui composent la toiture sont définis dans le tableau 12 ci-après pour deux cas, l'un avec une toiture sans peinture réfléchissante, et l'autre recouverte avec une peinture réfléchissante.

Tableau 12 : Données d'entrées pour l'utilisation des cartographies à l'échelle du bâtiment

	Toiture avec peintures réfléchissantes	Toiture sans peintures réfléchissantes
Coefficient d'absorption α [-]	0,1	0,6
Emissivité [-]	0,9	0,9
Résistance thermique [$m^2.K/W$]	2,5	2,5
Type de toiture	Toiture terrasse	Toiture terrasse

À partir de ces données, en s'aidant des cartographies « Coefficient U » et « Facteur solaire S », respectivement en paragraphes 3.2.1. et 3.2.2 comme ci-après :

Figure 29 : Exploitation de la cartographie U

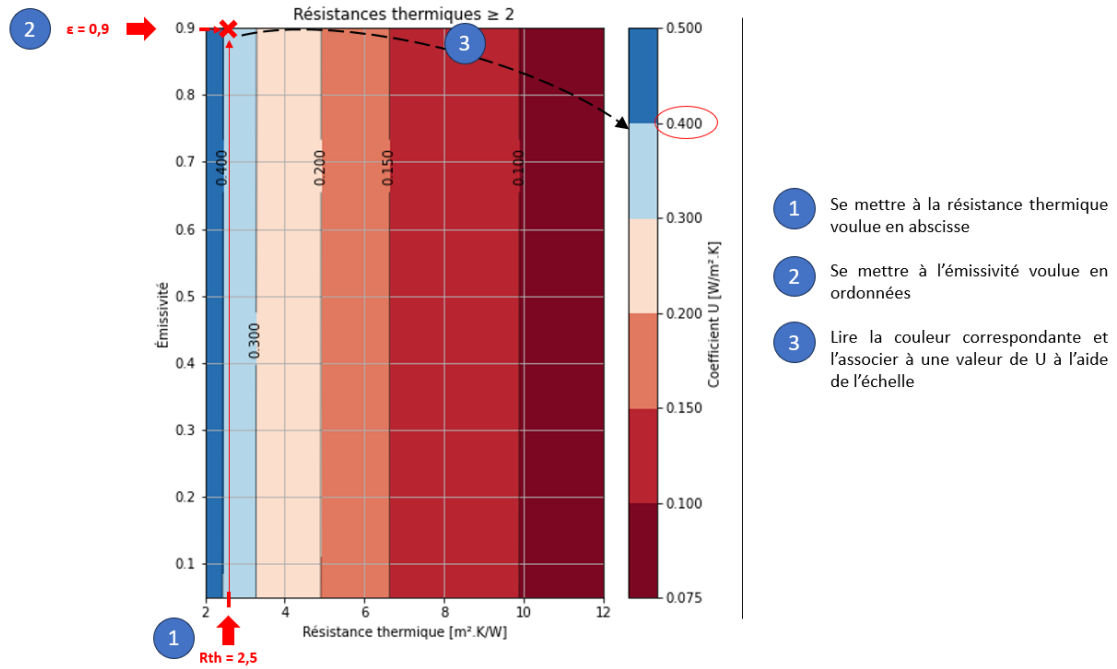
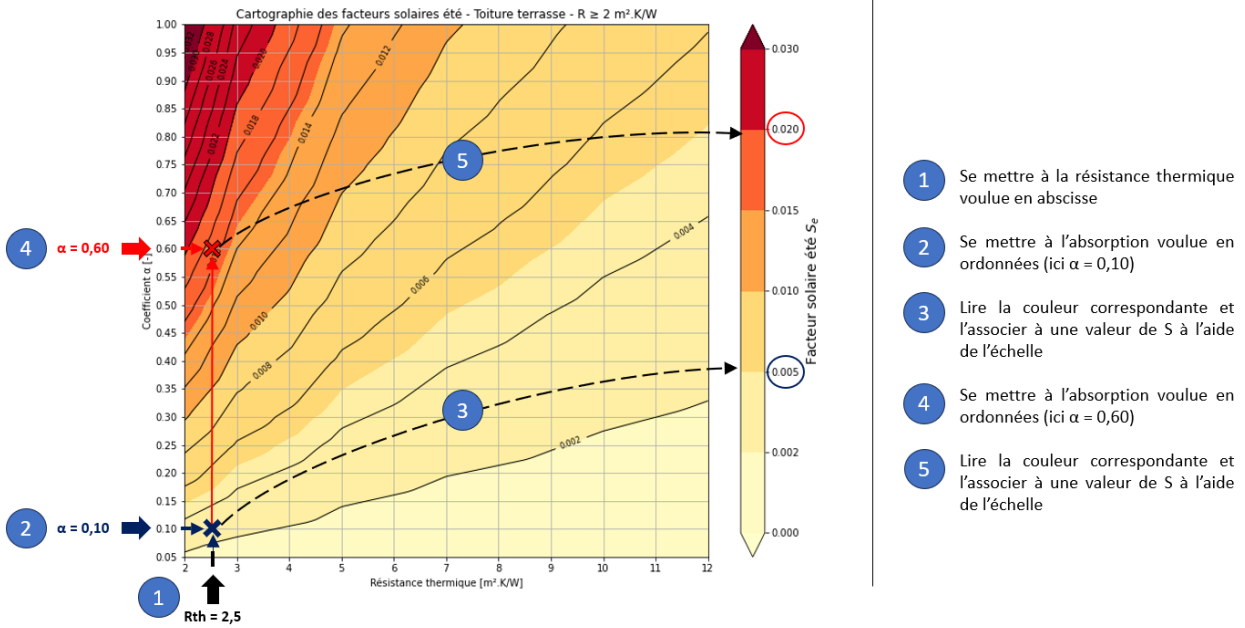


Figure 30 : Exploitation de la cartographie S



RAPPORT

Il est possible d'en déduire tableau ci-dessous :

Tableau 13 : Résultats d'utilisation des cartographies à l'échelle de la paroi

	Toiture avec peintures réfléchissantes ($\alpha = 0,1$)	Toiture sans peintures réfléchissantes ($\alpha = 0,6$)
Coefficient U de toiture [W/m². K]	0,400	0,400
Facteur solaire [-]	0,005	0,020

À partir des résultats des cartographies à l'échelle de la paroi, il est possible de déterminer les « Besoin de chauffage », « Besoin de froid » et « DH » en utilisant les cartographies à l'échelle du bâtiment tel que décrit sur le tableau 31. Les résultats obtenus sont détaillés dans le tableau 14.

Figure 31 : Exploitation des cartographies à l'échelle bâtiment

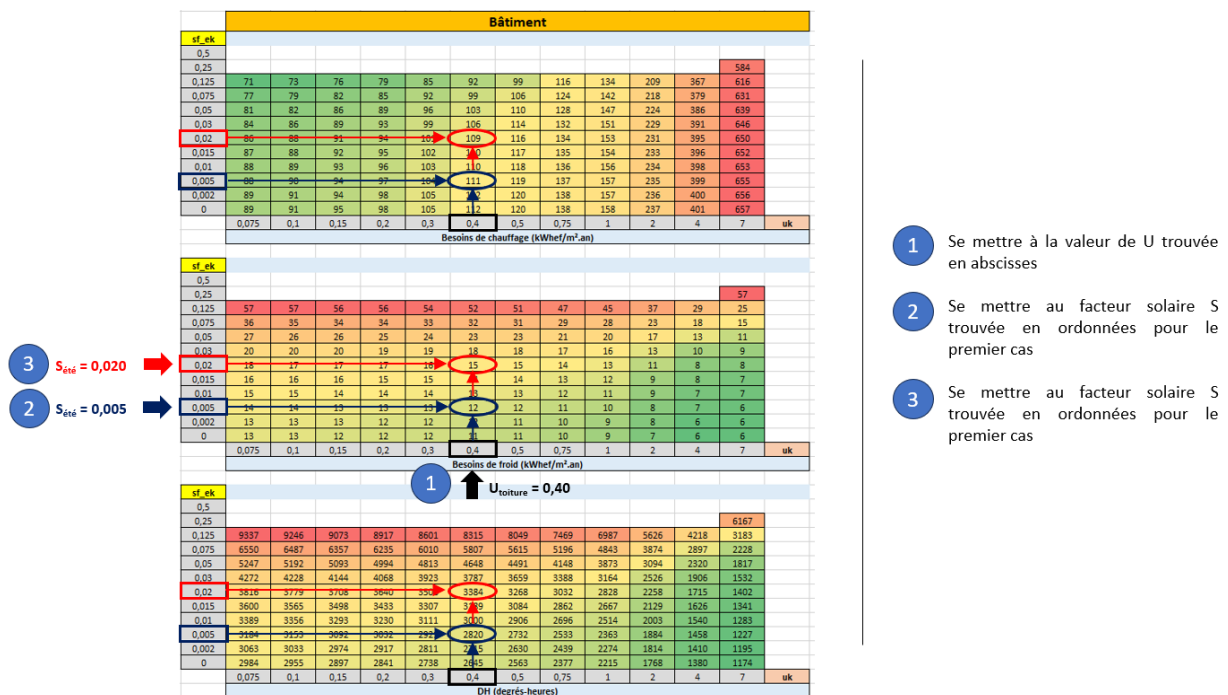


Tableau 14 : Résultats d'utilisation des cartographies à l'échelle du bâtiment

	Toiture avec peintures réfléchissantes ($\alpha = 0,1$)	Toiture sans peintures réfléchissantes ($\alpha = 0,6$)
Besoin de chauffage [kWh/m².an]	111	109
Besoin de froid [kWh/m².an]	12	15
DH [-]	2 820	3 384

Pour plus de précisions, les résultats pourront être interpolés bi-linéairement pour chaque exploitation d'une cartographie. La méthode mathématique à adopter est détaillée en annexe 4.

5. COMPARAISON A DES SOLUTIONS ALTERNATIVES : COM_ANC

Afin de positionner la performance des peintures réfléchissantes, il convient de se donner des ordres de grandeurs sur des solutions alternatives. Les calculs effectués dans cette partie ne sont qu'une exploitation des cartographies établies pour la zone climatique H2b, sans calculs supplémentaires. **Ces calculs ont été faits pour des hypothèses strictes et ne sont pas extrapolables** à des tendances plus générales.

Hypothèses :

- Le calcul est fait uniquement pour le bâtiment de commerce, dans sa version ancienne. Ce cas est présumé comme le plus favorable de toutes les typologies étudiées pour exacerber leurs différences. En effet, c'est un bâtiment de plain-pied, avec des apports internes relativement importants, une surface de toiture importante, peu de surface vitrée et une isolation peu performante. Ce sont les meilleures conditions pour évaluer ces solutions alternatives qui agissent toutes directement sur les apports solaires en toiture ;
- Les résultats ont été interpolés bi-linéairement à partir des cartographies des besoins de chauffage, de froid et de DH en annexe 3 (la méthode d'interpolation est présentée en annexe 4) ;
- Les calculs sont faits pour la zone H2b ;
- Pour les cas avec toiture végétalisée (selon les règles Th-Bât édition 2020) :
 - o La toiture végétalisée recouvre 100 % de la surface de la toiture ;
 - o Le drainage est supposé d'un matériau quelconque et adapté à cet usage ;
 - o Les cas irrigués le sont avec une irrigation automatique de 20 mm d'eau par semaine ;
 - o Le facteur solaire en hiver est divisé par 2 par rapport au facteur solaire d'été ;
 - o Extensive :
 - Une résistance additionnelle $\Delta R_{\text{vég}} = 0,15 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ est ajoutée pour prendre en compte la présence du substrat ;
 - Coefficient d'absorption du feuillage $\alpha = 0,70$.
 - o Semi-intensive :
 - Une résistance additionnelle $\Delta R_{\text{vég}} = 0,30 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ est ajoutée pour prendre en compte la présence du substrat ;
 - Coefficient d'absorption du feuillage $\alpha = 0,70$.
- Pour le cas avec des panneaux photovoltaïque (PV) :
 - o 80 % de la surface de toiture est occupée par des panneaux PV ;
 - o Le panneau PV est mis en œuvre sur une structure cadrée avec aménagement d'une lame d'air ventilée en sous-face du panneau de 10 cm minimum. Dans ces conditions, le facteur solaire S est considéré égal à 0 (hypothèse favorable) ;
 - o Les 20 % restant de la surface de toiture possède un facteur solaire de la toiture de base, avec un coefficient d'absorption de 0,6 ;
 - o Le facteur solaire pris en compte dans le calcul est une pondération surfacique des deux facteurs solaires pour les zones avec et sans PV, finalement $S = 0,004$;
 - o Le cas des panneaux PV avec module flexible qui sont collés sur la membrane d'étanchéité ne sont pas traités ici. Le facteur solaire attendu pour ces cas est plus élevé.

RAPPORT

Tableau 15 : Hypothèses sur le coefficient d'absorption solaire de la toiture

Cas	Coefficient d'absorption de la toiture
Base	0,6
Toiture très sombre	0,9
Toiture avec peinture réfléchissante à l'état neuf	0,1
Toiture avec peinture réfléchissante à l'état vieilli	0,4

Le tableau 16 ci-dessous synthétise les caractéristiques des parois et les résultats obtenus en exploitant les cartographies (cf. paragraphe 4.4.9, en absolu et en écart relatif par rapport au cas de base. La coloration des cases se fait selon l'échelle vert = performant, jaune = moyen, rouge = peu performant, pour chaque indicateur.

Tableau 16 : Résultats comparatifs des besoins énergétiques obtenues pour différentes solutions alternatives

LEGENDE Vert = Performant Jaune = Moyen Rouge = Peu performant		COMMERCE ANCIEN (COM_ANC)								
		Base	Toiture très sombre	Toiture avec peinture réfléchissante à l'état neuf	Toiture avec peinture réfléchissante à l'état vieilli	Toiture végétalisée extensive		Toiture végétalisée semi-intensive		Panneau photovoltaïque
						Sans irrigation	Avec irrigation	Sans irrigation	Avec irrigation	
Propriétés de paroi	Coefficient d'absorption α [-]	0,6	0,9	0,1	0,4	#	#	#	#	#
	Facteur solaire d'été S de toiture [-]	0,0222	0,0333	0,0037	0,0148	0,0214	0,0154	0,0114	0,0102	0,0044
	U mur [W/m ² .K]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	U toiture [W/m ² .K]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,46	0,46	0,43	0,43	0,50
Valeur absolue	Besoin de chauffage [kWh/m ² .an]	115,4	113,2	119,1	116,8	112,5	113,6	112,2	112,5	118,9
	Besoin de froid [kWh/m ² .an]	15,4	18,6	11,6	13,8	15,3	14,0	13,4	13,1	11,8
	Besoin de froid + besoin de chauffage [kWh/m ² .an]	130,8	131,8	130,7	130,6	127,8	127,7	125,6	125,6	130,7
	DH [°C.h]	3354,8	3797,3	2688,1	3077,3	3371,1	3144,5	3026,4	2979,2	2713,2
Ecart relatif (réf = Base)	Besoin de chauffage [%]	0 %	- 2 %	3 %	1 %	- 3 %	- 2 %	- 3 %	- 3 %	3 %
	Besoin de froid [%]	0 %	21 %	- 24 %	-11 %	-1%	- 9 %	- 13 %	- 15 %	- 23 %
	Besoin de froid + besoin de chauffage [%]	0 %	1 %	0 %	0 %	-2%	-2%	- 4 %	- 4 %	0 %
	DH [%]	0 %	13 %	- 20 %	- 8 %	0 %	- 6 %	- 10 %	- 11 %	- 19 %

Ces résultats ne sont pas extrapolables à d'autres systèmes constructifs ou d'autres types de bâtiments.

RAPPORT

Sur la base des hypothèses détaillées précédemment, les observations suivantes peuvent être formulées :

- Sur les besoins énergétiques :
 - o Pour les peintures, conformément aux analyses détaillées précédemment la hausse des besoins de chauffage est compensée par la baisse des besoins de froid ;
 - o Les toitures végétalisées sont légèrement plus performantes à limiter les besoins énergétiques.
- Sur le confort d'été (DH) :
 - o Le panneau photovoltaïque est aussi efficace que la peinture réfléchissante à l'état neuf, les deux solutions sont les plus performantes du panel étudié ;
 - o Une peinture réfléchissante à l'état vieilli voit son gain se diviser par 2 par rapport à l'état neuf ;
 - o Les toitures végétalisées sont moins performantes qu'une peinture réfléchissante à l'état neuf. Elles deviennent un peu plus performantes en comparaison d'une peinture réfléchissante à l'état vieilli ;
 - o La toiture très sombre est la moins performante du panel. Quelle que soit la solution adoptée, une toiture très sombre possède un potentiel d'amélioration du confort intéressant.

Ces résultats sont proposés uniquement à **titre illustratif**. Ils ne sont **pas représentatifs** d'une tendance générale et ne doivent pas être interprétés comme tels.

6. IMPACT A L'ECHELLE DU QUARTIER

L'analyse à l'échelle quartier présentée ici est qualitative et non exhaustive. Elle a été réalisée en exploitant seulement deux sources :

- D'une part sur une étude réalisée par le CSTB à l'échelle de Paris et de son agglomération, l'étude EPICEA ;
- D'autre part, sur une interview d'un chercheur du CSTB spécialisé dans les travaux réalisés à cette échelle, et à leur impact, notamment sur le confort d'été.

Il en ressort que l'échelle quartier est intéressante notamment pour quantifier les phénomènes d'ICU (Ilots de Chaleur Urbains) et trouver des solutions de remédiation efficaces. Ces phénomènes sont complexes car des couplages multi-échelles existent. Le problème s'étend de l'échelle bâtiment, au quartier, à la ville et enfin à la colonne atmosphérique et aux reliefs environnants. Des changements à chacune des échelles peuvent impacter les autres échelles (conditions météorologiques, sollicitations de systèmes de climatisation, etc.).

À l'échelle du bâtiment, en été, la baisse des besoins de froid liée à la mise en place d'une peinture réfléchissante va limiter les consommations de climatisation, et par ricochet, la chaleur évacuée à l'extérieur par ces systèmes. Par ailleurs, le rendement de ces systèmes et leur consommation sont liés à la température à l'intérieur et à l'extérieur du logement. L'étude EPICEA ne met pas en évidence un lien évident entre la nature des revêtements de toitures et leur température de surface. En période de canicule, les toitures en zinc situées dans la zone de Paris intra-muros et les toitures terrasses situées en périphérie présentent des températures de surfaces assez proche en période diurne. Les écarts sont un peu plus marqués la nuit mais probablement plus lié à l'inertie thermique des toitures que des propriétés de surface.

À l'échelle du quartier, l'interaction par rayonnement thermique de face à face entre les bâtiments est importante (par exemple, la mise en place d'un revêtement en toiture va possiblement réfléchir le flux solaire sur d'autres bâtiments alentours). De même, la température dans le canyon urbain est très dépendante de la hauteur des bâtiments, de la largeur des rues et de l'orientation des bâtiments par rapport au régime des vents. Sous ces dépendances :

- Comment se comporte l'application d'un revêtement réfléchissant en toiture ? En façade ?
- Quel type de microclimat est généré ?

- Est-ce que la mise en place de la peinture réfléchissante uniquement sur les bâtiments jugés « favorables » a un impact à l'échelle quartier ?
- À partir de quelle surface de toiture couverte d'un revêtement réfléchissant a-t-il un impact à cette échelle ?

L'étude EPICEA n'apporte pas vraiment de réponse à ces différentes questions...

Enfin à l'échelle de la colonne atmosphérique au-dessus de la ville, ce sont les conditions météorologiques qui sont impactés par la thermique de la ville elle-même. Par exemple, que se passerait-il si les toitures de la ville étaient toutes recouvertes par un revêtement réfléchissant ?

7. CONCLUSIONS

L'application d'une peinture ou d'un revêtement réfléchissant en toiture améliore le confort d'été (via le DH) en limitant les apports solaires en toiture et cela s'accompagne d'une baisse des besoins de refroidissement. À contrario, les besoins de chauffage sont augmentés car l'application de ce type de produit limite aussi les apports solaires en hiver (qui sont bénéfiques à cette période). L'un des enjeux énergétiques est d'évaluer les gains/pertes entre la hausse des besoins de chauffage et la baisse des besoins de refroidissement.

L'ambition première de l'étude est de flécher l'utilisation des peintures et revêtements réfléchissants vers les bâtiments qui en tirent le plus grand profit. Les calculs réalisés ont permis de quantifier les impacts énergétiques induits par l'application de ce type de procédé et d'identifier les conditions favorables à leur application. Ces caractéristiques sont listées ci-après :

Le bâtiment est de plain-pied. S'il possède des étages, seul le dernier étage est impacté. Ainsi, si le besoin de refroidissement du dernier étage d'un bâtiment de 3 étages est réduit de 5 %, le besoin de refroidissement estimé à l'échelle du bâtiment complet ne sera que de 1,7 % environ (3 fois moins) ;

La toiture du bâtiment initial est sombre ou très sombre ;

Le bâtiment présente des apports internes importants impliquant qu'il n'y a pas de besoins de chauffage dans celui-ci (cas extrême des datacenters) ;

Le bâtiment se situe dans une zone climatique chaude (par exemple H3) ;

Une part importante des apports solaires passe par la toiture (niveau d'isolation de la toiture faible, surface de la toiture importante au regard des autres surfaces déperditives, surface vitrée faible, présence de protections mobiles) ;

Le taux de surface vitrée est bas (que ce soit en mur ou en toiture) ;

Le masquage environnant sur les murs est important ;

- Enfin, une tendance permet d'expliquer l'ensemble des comportements observés. La peinture ou le revêtement réfléchissant a pour rôle thermique unique d'abaisser les apports solaires en toiture. Comparativement, si les apports solaires en toiture sont importants par rapport à ceux en façade (vitrée ou non), alors le revêtement réfléchissant peut réduire grandement les apports solaires, et donc l'inconfort en été. A contrario, si les apports solaires sont déjà faibles en toiture, le gain potentiel est plus modéré.

Pour rappel, avec l'application d'une peinture ou d'un revêtement réfléchissant, **le bâtiment n'est impacté qu'en dernier étage**. Ce n'est pas le cas d'autres solutions qui concourent au confort d'été et à la baisse de consommation, et qui ont une portée globale sur le bâtiment (isolation, ajout de protection solaire, etc.).

IMPACT ECONOMIQUE

1. OBJECTIF

L'objectif de ce chapitre est d'examiner à travers une analyse coûts/bénéfices, les atouts et les limites des peintures réfléchissantes par rapport à d'autres systèmes davantage diffusés en France tels que les panneaux photovoltaïques et les toitures végétalisées. De ce fait, ces deux systèmes bénéficient d'un retour d'expérience plus important.

Les bénéfices potentiels (amélioration du confort d'été, absence d'un recours à une climatisation source de consommation d'énergie, etc.) seront à mettre en perspective avec les coûts liés à la mise en œuvre de ces solutions (coûts de la solution, durée d'intervention, formation des acteurs, entretien-maintenance des toits, impacts environnementaux).

Les vendeurs de peintures réfléchissantes annoncent des durées de vie différentes selon la gamme de peinture considérée : autour de 5 ans pour les entrées de gamme, 8 ans pour le milieu de gamme et 20 ans et au-delà pour les gammes supérieures. L'analyse économique mettra en perspective ces trois gammes. La gamme qui offre le meilleur résultat sera ensuite comparée à deux solutions alternatives : les panneaux solaires et les toitures végétalisées.

Avant toute analyse, il est important de considérer le bâtiment dans sa durée de vie et les choix qui guident les maîtres d'ouvrage :

- Les projets neufs sont globalement peu concernés. La réglementation thermique actuelle apporte les réponses aux maux que pourraient corriger les peintures réfléchissantes : l'inconfort thermique et des surconsommations d'énergie.
- Les projets de réhabilitation lourde lancés afin de remédier à des problèmes d'étanchéité ou visant à une rénovation globale du bâti seront également peu concernés. En effet dans ce cadre comme dans le cas du neuf, la solution consiste davantage à poser une membrane d'étanchéité (de couleur claire ou non puisque l'objectif recherché est de remédier à un problème d'étanchéité) et à mettre en œuvre des solutions d'isolation du bâti.

Les bâtiments concernés sont davantage des bâtiments anciens pour lesquels les maîtres d'ouvrage privilégient une seule action. L'intervention est davantage ponctuelle et elle peut être menée en toute autonomie, c'est à dire ne pas nécessiter une autre action sur le bâti. Dans ce contexte, les peintures réfléchissantes sont bien en concurrence avec les panneaux photovoltaïques et la toiture végétalisée. Même si ces deux systèmes apportent des fonctionnalités supplémentaires (la production d'énergie pour les panneaux, un apport de biodiversité, une amélioration de la qualité de l'air et de l'environnement visuel urbain pour les toitures végétalisées), ils peuvent aussi être conçus indépendamment de toute autre action sur le bâti. L'analyse est menée sur des bâtiments moyens représentatifs issus des analyses d'impact énergétique menées précédemment. La comparaison des trois solutions a été effectuée sur la base d'une période de trente ans.

La première partie de l'analyse est basée sur une revue de la littérature et d'articles de presse. La seconde partie résume les enseignements des entretiens. La troisième partie se focalise sur les coûts et les gains associés à la mise en œuvre des peintures réfléchissantes. Les quatrième et cinquième parties reprennent la même approche en l'appliquant aux panneaux photovoltaïques et aux toitures végétalisées.

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1. Les peintures réfléchissantes

La littérature scientifique a accordé à ce jour assez peu d'intérêt au sujet des peintures réfléchissantes.

Chen et al. [7] (2021) ont examiné le potentiel des technologies « cool roof » pour dix grandes villes chinoises. Globalement, ils trouvent que des peintures réfléchissantes permettent de lutter efficacement contre la chaleur. Les résultats les plus probants sont obtenus pour Hong-Kong avec des économies variant de 6,9 à 15,8 \$/m²/an.

L'étude Rawat [8] et Singh (2022) porte sur l'État du Madhya Pradesh en Inde. Ils trouvent que l'application d'une peinture réfléchissante permet des économies allant de 2,16 à 3,09 \$/m²/an. Le taux de retour sur investissement est très rapide et s'établit à deux ans. Néanmoins, dans ce cas, comme dans celui de la Chine, les coûts liés à l'entretien ne sont pas pris en compte. Par ailleurs, les conditions climatiques ne correspondent pas à la situation française. La saison chaude y est beaucoup plus longue. Enfin, les bâtiments en Inde et en Chine sont de façon générale peu isolés.

Le sujet fait davantage l'objet d'articles de presse qui mettent en avant les gains énergétiques en période de forte chaleur et l'amélioration du confort d'été.

Le dirigeant d'un hypermarché à Saint-Jean-de-la-Ruelle (Loiret) a opté pour un aérogel de silice appliqué avec un pistolet haute pression sans air, pour incruster le produit dans le bitume, pour recouvrir les 1 200 mètres carrés de la toiture-terrasse des deux couches de ce produit [10] (Roudier-Valaud, 2023). Le chantier a été mené en deux semaines et a mobilisé quatre personnes pour nettoyer le toit puis le recouvrir. Le coût s'est établi entre 20 et 25 euros le mètre carré.

À la suite de l'application du revêtement blanc, les températures à l'intérieur du bâtiment ont chuté de 6 à 8 °C. Sur le toit, les températures sont passées d'un sol à 80 °C à 30 °C, avec les mêmes conditions météorologiques. L'application d'une peinture similaire qui renvoie plus de 90 % du rayonnement solaire, sur la toiture d'une laiterie voisine, a aussi conduit à un rafraîchissement de 6-7 °C à l'intérieur des bâtiments.

Des résultats similaires sont annoncés pour des membranes synthétiques de couleur claire. Dans le cas d'un projet de rénovation des bâtiments d'un centre commercial localisé dans les Bouches-du Rhône (zone H3), le recours à une membrane PVC blanche a conduit à une baisse des consommations d'énergie liées à la climatisation de 30 % au cours d'une période de six mois intégrant l'été [11] (Ploye, 2024).

Même si les retours d'expériences sont limités, deux grandes constantes apparaissent dans les résultats favorables apportés par les peintures réfléchissantes :

1. Un climat très chaud une grande partie de l'année ou la totalité de l'année ;
2. Des bâtiments peu isolés. Les temps de retour sur investissement seront a priori d'autant plus courts que ces deux éléments seront réunis.

2.2. Les toitures végétalisées

La plupart de la littérature se focalise sur les toitures végétalisées de type extensif. Ces toitures acceptent un substrat léger de 4 à 12 cm. Les végétaux utilisés auront donc forcément des racines peu profondes. L'atout principal est de pouvoir poser ces végétaux sur des bâtiments existants où leur poids est réduit, notamment par rapport à des toitures végétalisées intensives qui supportent des jardins. Dans ces derniers cas, l'épaisseur de la couche de terre est supérieure à 30 cm. Elles sont ainsi souvent posées dans le cadre de projets neufs où la toiture a été conçue pour pouvoir supporter le poids lié à la terre et aux plantations.

Pour la zone méditerranéenne de Chypre, [13] Ziogou et al. (2017) trouvent une valeur actualisée négative. Les calculs sont menés sur la base d'un bâtiment de bureau type représentatif du secteur : 365 m², quatre étages et des fenêtres qui occupent 35 à 40 % des parois des façades Sud et Ouest. La toiture végétalisée est extensive dans la mesure où elle s'adapte mieux à des projets de réhabilitation. La période de chauffage s'étend de mi-novembre à mi-mai. Les températures demandées sont de 22 °C. La période de climatisation commence à mi-mai et se termine à mi-novembre pour des températures de 25 °C. L'utilisation du bâtiment se limite à cinq jours de 7 heures à 17 heures. Les simulations visent à comparer des configurations types : non isolé / isolé avec une toiture végétalisée et sans toiture végétalisée. Les résultats ont montré que coûts d'installation et d'entretien ne sont pas compensés par les gains énergétiques liés à une baisse des besoins de chauffage en hiver et de climatisation en été et les gains environnementaux (le CO₂ économisé est valorisé au prix de la tonne de carbone vendue sur les marchés internationaux) ne compensent pas les coûts d'installation et d'entretien des toitures. Malgré tout, les gains

RAPPORT

énergétiques atteignent 25 % pour le chauffage et 20 % pour la climatisation de bâtiments isolés. Lorsque les bâtiments ne sont pas isolés, les gains sont environ deux fois moindres. Enfin, une toiture végétalisée permettrait d’allonger la durée de vie des isolants.

De nombreux travaux qui se sont penchés sur la pertinence du recours aux toitures végétalisées, ont privilégié des analyses coûts/bénéfices. Ces analyses sont régulièrement utilisées en tant qu’outil d’aide à la décision, notamment pour des projets environnementaux dont les bénéfices dépassent souvent les aspects purement économiques et financiers. Ces analyses permettent notamment (Dehnhardt et al., 2022) :

- De prendre conscience des enjeux environnementaux liés à un projet ;
- D’améliorer la transparence du processus de décision ;
- De stimuler les échanges liés aux avantages et limites de différentes stratégies.

Leur limite résulte aussi de l’intégration de nombreux éléments non monétisables.

L’analyse menée par [15] Teotonio et al. (2018) pour la ville de Lisbonne débouche sur des résultats plus nuancés. L’intérêt économique des toitures végétalisées dépend des bâtiments concernés (résidentiels ou commerciaux) et du type de végétalisation (intensive ou extensive). Le tableau 17 présente les différents postes de l’analyse coûts-bénéfices menée chacun des cas.

Tableau 17 : Les différents postes d’une analyse coûts – bénéfices (Source : [15] Teotonio et al., 2018)

Analyse financière	Analyse économique	Bénéfices socio-environnementale
Coûts d’installation	Isolation sonore	Risque d’inondation
Coûts de maintenance	Valeur esthétique	Biodiversité
Coûts de remplacement	Valeur récréative	Effet de chaleur urbaine
Assurance incendie		Bruit urbain
Consommation d’énergie		Qualité de l’eau et de l’air
Performance photovoltaïque améliorée		Drainage et traitement des eaux pluviales
Ferme urbaine		Santé publique

Douze configurations sont examinées. La toiture paysagère double aussi la durée de vie initiale des membranes d’étanchéité (20 ans) en les protégeant du climat extérieur (vent, radiation, variations de températures). La couverture végétale est remplacée tous les huit ans. L’investissement est moindre lorsque la toiture est plate.

Sur le plan financier, le meilleur résultat est obtenu pour des installations extensives avec des toits plats de bâtiments commerciaux et le plus mauvais pour des installations intensives sur des bâtiments résidentiels. Mais ce jugement est modifié dès lors où des critères économiques notamment liés aux externalités, sont intégrés à l’analyse. Par exemple, même si les installations intensives coûtent plus chères, elles apportent une plus-value largement supérieure (valeur récréative et possibilité de valoriser le bien immobilier). Par ailleurs, une mauvaise isolation du bâti renforce l’intérêt d’une toiture paysagère dans la mesure où elle améliore l’isolation du bâtiment et limite les pertes énergétiques.

L’analyse de [16] Hekrlé M. et al. (2023) s’inscrit dans un cadre similaire. L’analyse coûts bénéfices est limitée à trois bâtiments localisés en République Tchèque, qui venaient faire l’objet d’une rénovation : deux immeubles tertiaires et une maison individuelle.

RAPPORT

Dans ce cadre, des toitures paysagères avaient été intégrées au projet. Dans les trois cas, la toiture paysagère était de type extensif. Les gains obtenus compensent largement les coûts. Néanmoins, l'équilibre économique résulte essentiellement de la hausse de la valeur immobilière des biens liée à une amélioration de l'esthétique visuelle.

Tableau 18 : Analyses coûts bénéfiques liées à la mise en œuvre de toitures végétalisées (Source : [16] Herkle et al., 2023)

		Deux immeubles tertiaires		Bâtiment résidentiel
Surface de la toiture		360 m ²	639 m ²	125 m ²
Épaisseur du substrat		8 cm	10 cm	8 cm
Spécificités		Bâtiments voisins ont une vue sur les toitures paysagères		
Coûts d'installation (€/m ²)	1 ^{re} année	30	58	43
Coûts de maintenance (€/m ²)	Chaque année	0,40	0,93	0,57
Coûts de remplacement (€/m ²)	Tous les 40 ans	27	52	38
Gain lié à une meilleure évacuation de l'eau de pluie (€/m ²)	Chaque année	0,27	0,29	0,29
Gains énergétiques (chauffage et climatisation) (€/m ²)	Chaque année	1,71	2,18	1,49
Réduction des bruits internes (€/m ²)	1 ^{re} année	12	12	12
Amélioration de la qualité de l'air (€/m ²)	Chaque année	0,11	0,11	0,11
Baisse des émissions de CO ₂ (€/m ²)	Chaque année	0,002	0,002	0,002
Hausse de la valeur locative liée à une amélioration esthétique visuelle (€/m ²)	Chaque année après la 1 ^{re} année	0,50	0,75	
Hausse de la valeur immobilière des biens voisins en raison d'une amélioration esthétique visuelle (€/m ²)	1 ^{re} année		275,62	237,81
Hausse de la valeur locative des biens voisins en raison d'une amélioration esthétique visuelle (€/m ²)	Chaque année après la 3 ^e année	8,32		
Hausse de la durée de vie du système d'isolation du bâti (€/m ²)	30 ^e année	14	14	14

L'étude [9] d'Abdalazeem et al. (2024) s'est intéressée à l'impact énergétique des toitures végétalisées notamment lorsqu'elles étaient combinées avec des panneaux photovoltaïques dans le cas de bâtiments localisés en Egypte. Les résultats ont montré que selon la nature du sol, les toitures végétalisées engendraient une baisse de la température intérieure allant de 8 à 10,75 %. Lorsque des panneaux photovoltaïques étaient ajoutés, la baisse de température atteignait entre 9,6 et 11,9 %. Par ailleurs, le cumul de ces deux solutions améliorait la production électrique de 2,3 % par rapport à une solution sans toiture végétalisée et baissait les besoins en climatisation de 19 % par an et les émissions de CO₂ de 59,56 kg/m² annuellement.

2.3. Les panneaux photovoltaïques

La littérature liée aux panneaux photovoltaïques s'intéresse le plus souvent à des sujets plus globaux que la seule rentabilité économique. L'enjeu est souvent de savoir si la production photovoltaïque peut assurer le fonctionnement d'un bâtiment en toute autonomie. En outre, les questions de rentabilité sont assez souvent faussées par les subventions versées, le tarif de rachat, les prix de l'électricité qui évoluent fortement d'un pays à l'autre. Par ailleurs, le sujet des opportunités et des barrières à la diffusion de ce type de technologie est régulièrement évoqué.

Ces éléments ressortent notamment de l'analyse de [17] Lang et al. (2016) qui couvre l'Allemagne, l'Autriche et la Suisse. L'étude qui couvre le résidentiel et le tertiaire (petites et grandes surfaces), montre que le photovoltaïque peut être rentable pour l'Europe centrale même sans proposition de subventions. Les éléments clés favorables à une diffusion de cette technologie sont les tarifs de l'électricité et la capacité des bâtiments à auto-consommer l'énergie produite.

Les études menées en Italie [18] (Cucchiella et al., 2023) et en Espagne [19] (Saez et al., 2023) se focalisent sur la dépendance de ces technologies aux subventions et au tarifs de rachat. Par ailleurs, la problématique du photovoltaïque s'avère très différente entre les zones urbaines denses où le photovoltaïque en toiture peut difficilement assurer l'autonomie d'un bâtiment couvrant plusieurs étages et les zones péri-urbaines ou rurales où l'habitat individuel domine et où la production peut couvrir la plupart des besoins

3. LES PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS DES ENTRETIENS

3.1. Les peintures réfléchissantes

Les peintures réfléchissantes ont un pouvoir d'isolation reconnu notamment lorsqu'elles sont appliquées sur les toitures des bâtiments faiblement isolées. Leur autre atout majeur est leur légèreté. Elles sont donc très adaptées à des hangars, des toitures en tôle d'acier.

Selon la CSFE, le recours au peinture réfléchissante s'avère pertinent dans un nombre de situations très limité. Tout est fonction de l'environnement extérieur et des caractéristiques techniques du bâtiment : « *il s'agit d'un bâtiment faiblement isolé, peu vitré, situé en zone géographique chaude correspondant à H3, soit le sud-est de la France de la France et le DROM-COM et justifiant d'un important besoin de climatisation. Pour des bâtiments isolés en zone H1 et H2, l'impact est quasi-nul sur les économies d'énergie* » ([11] Ploye, 2024).

Néanmoins, elles relèvent à ce jour des techniques non courantes. Seule une ATEX (Appréciation Technique d'Expérimentation) a été déposée. Elle concerne une peinture appliquée à une membrane bitumineuse. Le procédé n'est pas ouvert et n'est pas applicable à toutes les membranes. Ce manque de recul sur des solutions considérées comme innovantes, ne permet pas d'apprécier les risques potentiels à court, moyen et long termes.

Sur le plan qualitatif, le classement des peintures réfléchissantes en technique non courante pour le produit, la mise en œuvre et le domaine d'emploi, pose un problème en matière d'assurance. Le DTU accepte en effet uniquement la mise en œuvre des peintures sur des bacs acier. Aucune référence n'est faite aux supports d'étanchéité bitumineux ou synthétiques. Une entreprise qui appliquerait ce produit devrait déclarer cette activité à son assureur afin de rester couverte en cas de sinistre.

L'intervention en toiture peut poser un problème puisque les personnes qui interviendront seront des peintres et non des étancheurs. Ceci soulève le problème de la qualification de l'intervenant. Par exemple, si la peinture n'a pas été appliquée de façon homogène, cela augmente le risque de fissuration.

L'AQC ([11] Ploye, 2024) pointe les interventions en cas de sinistre qui pourraient être dangereuses s'il convient d'effectuer une soudure sur un revêtement recouvert d'une peinture (dégagement de fumées potentiellement toxiques). Enfin, ces produits pourraient aussi modifier le classement de résistance au feu dans la mesure où ils modifient les propriétés des produits sur lesquels ils s'appliquent.

Le manque de retour d'expérience sur ce type de technique est également problématique notamment pour apprécier le vieillissement de ces revêtements et leur degré d'efficacité sur les moyen et long termes. Les fabricants annoncent des durées de vie de vingt ans alors que les experts estiment que ces durées ne sont pas réalistes faute de preuve. Le maintien de la capacité réfléchive à long terme est donc sujet à caution. Le marché des peintures réfléchissantes est exclusivement fait avec des peintures acryliques et l'expérience montre que sur cette famille chimique, les produits sont moyennement durables. Les meilleures tiennent les dix ans de la décennale mais certains retours d'expérience mentionnent aussi des peintures qui partent rapidement en paillettes.

Au-delà du classement en technique non courante de la plupart des peintures, l'autre enjeu, commun au photovoltaïque et aux toitures végétalisées, concerne la maintenance. Il est reconnu que certains maîtres d'ouvrage sont plus enclins que d'autres à effectuer la maintenance. Les bailleurs sociaux et les collectivités territoriales qui ont développé au cours des dernières années une gestion stratégique de leur patrimoine, ont une programmation régulière des activités de maintenance. Les propriétaires de centres commerciaux et de bases logistiques n'inscrivent pas a priori leurs actions dans une logique de gestion patrimoniale et ils sont moins réceptifs aux enjeux de la maintenance.

Or la performance des équipements réfléchissants et notamment le maintien de l'indice de réflectance solaire (SRI – Solar Reflectance Index) repose avant tout sur l'entretien maintenance régulière des toitures afin d'éviter un encrassement qui mettrait à mal la durabilité et la performance des solutions sélectionnées.

Dans le cas de bâtiments neufs, le DTU 43.05 précise que cet entretien est obligatoire (visite d'entretien au moins une fois par an) et un poseur d'étanchéité doit même donner le nom de la personne qui sera chargée d'effectuer cette tâche. Mais dès lors que les dix années sont passés, le risque existe que l'entretien soit moins régulier. Il est en effet reconnu que certains maîtres d'ouvrage remettent facilement en cause les budgets d'entretien maintenance. Dans le cas d'une application sur des bâtiments existants qui ne sont plus couverts par une garantie décennale, le risque est d'avoir un entretien moins régulier et une baisse de la performance attendue.

En fin de vie les membranes d'étanchéité sont des déchets valorisables. Elles ne le sont plus si elles sont recouvertes de peinture. Dans le cadre de la REP, il y a une reprise gratuite des déchets très (une évacuation en DIB coûte environ 200 euros par tonne). Avec la peinture, la membrane risque d'être requalifiée en déchets dangereux dans le cadre d'une dépose, notamment lorsque la peinture contient des PFAS.

3.2. Les panneaux photovoltaïques

Les procédés photovoltaïques pour le bâtiment comprennent une solution de couverture ou d'étanchéité de toiture ou de façade, associée à des modules photovoltaïques et à un système de montage assurant le maintien de ces derniers sur le bâtiment.

La technicité de ces procédés est assez mouvante. Ceci fait que tous les systèmes proposés sont sous avis techniques. Il n'existe pas de DTU et de règles professionnelles. Les évaluations visent à s'assurer de la compatibilité entre les panneaux, le système de montage et les domaines d'emploi et à tester l'impact de ces procédés sur la pérennité de l'ouvrage. Comme la technologie des modules évoluent très rapidement, il convient de s'assurer que tout nouveau module sera associé à un procédé bénéficiant d'un avis technique ou d'une ATEEx.

Ces éléments rendent la pose de panneaux très technique et nécessitent de s'appuyer sur des entreprises compétentes. Fin 2023, on comptait 4 220 entreprises qualifiées pour poser ces systèmes (2 330 une année plus tôt). La qualification « QualiPV » atteste des compétences des professionnels pour la pose des panneaux (méthodes utilisés et qualité des équipements). La certification distingue les entreprises qui réalisent l'intégration des panneaux photovoltaïques au bâti et celles qui s'attachent à la partie électrique de l'installation photovoltaïque. La progression des entreprises qualifiées s'explique par la volonté de nombreux électriciens et des couvreurs d'élargir leur marché. Malgré leurs démarches pour monter en compétences et se qualifier, la profession souffre encore d'un manque d'entreprises qualifiées.

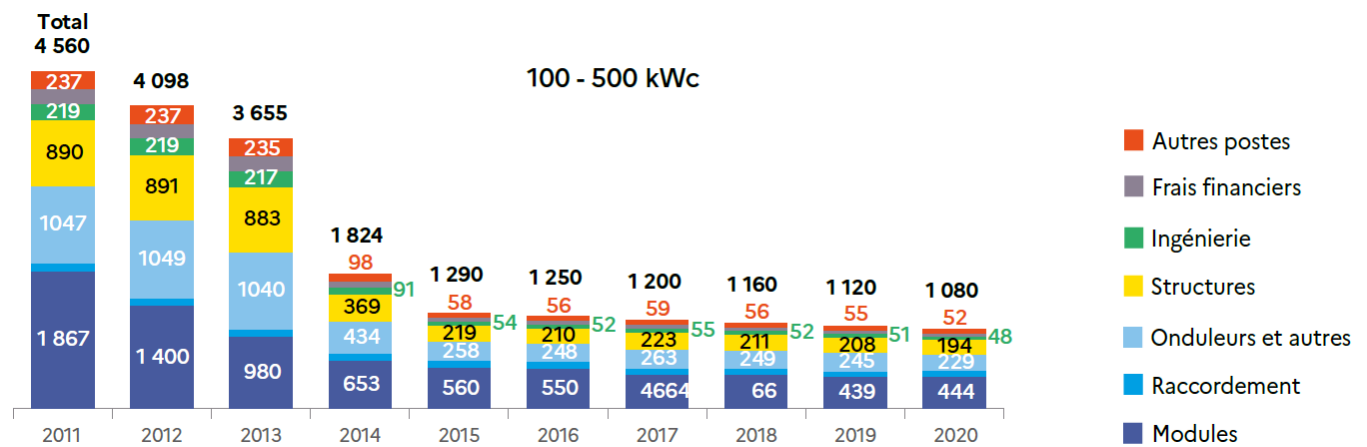
RAPPORT

La maintenance est menée de façon quasi-systématique afin de répondre au double enjeu assurantiel et productif. L'entretien régulier favorise le maintien du rendement initial des cellules mais il vise aussi à limiter le risque incendie.

Chaque année, on considère que le rendement des cellules baisse de 0,44 %. En vingt ans, le rendement est ainsi d'environ 90 % du rendement initial et à 30 ans, il atteint 80 %. Par ailleurs, le rendement des panneaux a augmenté avec les progrès technologiques. Il était d'environ 19 % en 2011 et il dépasse 25 % aujourd'hui. Ceci résulte de l'évolution du rendement surfacique (des demi-cellules sont installées) et de la puissance. Les panneaux atteignent actuellement une puissance de 400 watt-crête contre 250 voici quelques années.

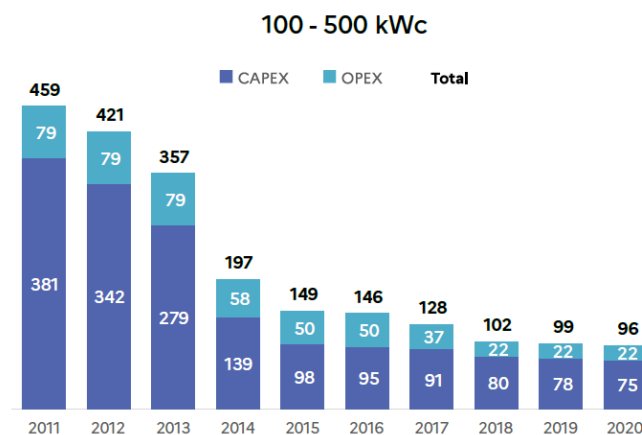
À l'inverse, les coûts d'investissement ont fortement baissé à la suite de la baisse du prix des modules, des onduleurs et de la baisse des coûts d'ingénierie (technique et financière). Pour des installations couvrant entre 100 et 500 kWc, on obtient ainsi un coût d'investissement d'environ 1,08 euro par watt-crête (figure 29).

Figure 32 : Évolution du CAPEX du PV sur grandes toitures (entre 100 et 500 kWc) en € HT/kWc (Source : [12] Arnaud et al., 2022)



De la même façon le coût complet moyen de production a chuté (figure 30). Ce coût qui correspond « au niveau auquel la production doit être valorisée pour couvrir les coûts d'investissement et de fonctionnement de l'installation de production pendant la totalité de sa durée de vie » ([12] Arnaud et al., 2022, p. 23).

Figure 33 : Évolution du coût complet moyen de production du photovoltaïque sur grandes toitures (entre 100 et 500 kWc) en €/HT/MWH (Source : [12] Arnaud et al., 2022)



3.3. Les toitures végétalisées

Les toitures végétalisées sont installées en priorité dans le neuf (90 % des cas selon l'ADIVET). 1,5 million de m² seraient installés par an en France. Le poids sur la toiture constituerait le principal frein. Ceci explique que pour des bâtiments existants, ce sont des systèmes extensifs qui dominent le marché. À la différence des peintures réfléchissantes qui sont monofonctionnelles, elles sont multifonctionnelles. Elles peuvent isoler, apporter de la biodiversité, améliorer la qualité de l'air, renforcer la valeur patrimoniale d'un bien immobilier. Néanmoins, la plupart de ces externalités ne sont pas chiffrables.

Neuf procédés de végétalisation de toiture sont sous avis technique. Ceci représente plusieurs dizaines de solutions de végétalisation.

Un système de végétalisation est toujours posé sur un système d'étanchéité et peut participer à l'allongement de la durée de vie de ce dernier système en raison d'un moindre vieillissement dû au rayonnement solaire.

Selon l'ADIVET, les coûts de mise en œuvre d'une toiture extensive varient de 40 à 50 euros par m². Pour une toiture intensive, l'investissement est au minimum de 150 euros par m². Tout est fonction de l'ambition du projet. Néanmoins, dans le cadre de cette étude, seules les toitures végétalisées extensives constituent de véritables solutions concurrentes des peintures réfléchissantes dans la mesure où ce sont les seules à pouvoir être installées sur des bâtiments anciens. Pour la maintenance, il convient de compter sur 4 à 5 euros par m² par an.

4. ANALYSE ECONOMIQUE DE L'APPLICATION DE PEINTURES REFLECHISSANTES SUR DES BATIMENTS TYPES

Les entretiens, l'analyse d'articles de presse et de documents commerciaux, la revue de la littérature ont permis de collecter des données qualitatives et quantitatives (coût de mise en œuvre et d'entretien des solutions, durée de vie, ...) nécessaires au calcul de la valeur actualisée nette des différentes solutions. Les informations qualitatives obtenues visent à nuancer les résultats qualitatifs et à apprécier le réalisme des données quantitatives.

4.1. Le principe de la valeur actuelle nette

La somme des estimations des coûts et des gains n'est pas directement comparable dans les différents cas examinés : peintures réfléchissantes, panneaux photovoltaïques et toitures paysagères.

La méthode de la valeur actuelle nette permet de comparer des investissements dont les coûts et les gains chiffrés interviennent à des moments différents. Plus les coûts d'un projet sont payés en fin de période, plus leur valeur actualisée est faible. Pour qu'un investissement soit intéressant, sa VAN doit être au minimum supérieure à zéro.

La valeur actuelle nette d'un projet est calculée à partir du taux d'actualisation de référence. Le taux retenu pour le calcul est celui présenté par le cabinet de consultant EY dans sa courbe des taux d'actualisation⁴. Au 29 février 2024, le taux d'actualisation à 30 ans basé sur le rendement d'obligations sélectionnées s'élevait à 3,51 %.

La formule standard de la valeur actualisée est la suivante :

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{C(t)}{(1+i)^t}$$

⁴ Chaque mois EY publie l'évolution des taux d'actualisation à retenir pour l'évaluation des engagements sociaux selon la norme IAS 19. La courbe des taux est réalisée à partir d'une sélection d'obligations du secteur privé notées AA par au moins la moitié des agences, avec un volume d'émission au moins égal à 50m€. Les obligations dites sécurisées sont exclues. Pour les durations longues, la courbe est extrapolée à partir de la courbe AAA publiée par la BCE.

La valeur actuelle nette de l'investissement est ici égale à la somme actualisée des coûts et des gains chiffrés $C(t)$ qui interviennent aux différentes années i , durant la durée de la période de comparaison, qui va de l'année 0 à l'année n ($n = 30$ dans le cas présent).

t est le taux d'actualisation. Ce taux d'actualisation donne une valeur au temps. Plus le taux d'actualisation est élevé, plus la préférence pour le présent du décideur est élevée, plus le taux d'actualisation est faible, plus la préférence pour le présent est faible.

L'actualisation et la valeur du temps ne doivent pas être confondues avec la valeur de la monnaie. L'euro se déprécie chaque année du fait de l'inflation, qui constitue une dépréciation de la monnaie. Ce phénomène de dépréciation monétaire n'est pas pris en compte dans la formule ci-dessus. Seule la valeur du temps est appréhendée. Le raisonnement s'effectue hors inflation.

4.2. Les hypothèses de calcul

L'analyse s'appuie sur les résultats de l'analyse énergétique. Toutes les options n'ont pas été examinées. L'objectif a été de se focaliser sur les cas sans variante afin de ne pas intégrer des éléments (les protections solaires, la rotation du bâtiment, la surventilation nocturne, les masques lointains) qui modifient le résultat de base. Parmi les simulations effectuées, celle relative aux zones climatiques semblait la plus pertinente pour une analyse économique. D'une part, elles mettent en parallèles des zones géographiques contrastées et permettent de tester certains éléments saillants de la revue de littérature et des propos recueillis lors des entretiens. Il s'agit notamment du fait que les peintures ne présenteraient un intérêt que dans les zones les plus chaudes et ensoleillées du territoire français.

Le choix du vecteur énergétique a été dicté par les données disponibles au sein de la base OPE. Les bâtiments du commerce et des bureaux possédaient déjà un système de chauffage et/ou de climatisation principalement électrique. Pour les bâtiments d'enseignement, le vecteur énergétique dominant était le gaz.

Les consommations électriques exprimées en kWh (énergie finale) par m^2 et par an issues de l'analyse énergétique sont ainsi reprises pour chacune des six typologies de bâtiment. Ces consommations se répartissent sur quatre usages : le chauffage, le refroidissement, la ventilation et l'éclairage. Le poste éclairage est neutre sur le calcul puisqu'il est identique pour toutes les zones climatiques.

Les coûts liés à la peinture réfléchissante se répartissent en plusieurs postes : la mise en œuvre, l'entretien en toiture destiné à conserver la performance initiale du produit, les poses successives liées au vieillissement plus ou moins prématuré du produit.

Pour ces différents postes les coûts suivants ont été retenus :

- Coût d'investissement et durée de vie (ces éléments sont tirés d'un article commercial du fournisseur [COVALBA](#)):
 - o Entrée de gamme : durée de vie 5 ans – 20 € HT / m^2 ;
 - o Moyen de gamme : durée de vie 8 ans – 25 € HT / m^2 ;
 - o Haut de gamme : durée de vie 20 ans – 35 € HT / m^2 (une durée de vie de 20 ans est excessive selon les experts).
- Coût d'entretien : 1€ / m^2 . Ce coût est très faible mais le nettoyage d'une toiture peinte ne réclame pas beaucoup de technicité. L'entretien d'une toiture végétalisée ou de panneaux photovoltaïque requiert davantage de soin et de temps. Néanmoins, dans le cas le plus favorable analysé (peinture réfléchissante sur des bâtiments de commerce ancien donnant lieu à l'absence de climatisation), les calculs sont aussi effectués pour un coût maximal de 5€/ m^2 .

En contrepartie, les gains se limitent à la seule baisse des consommations d'énergie sur la base d'un prix de l'électricité en option base tarif bleu professionnels 0,2047 € / kWh HT.

RAPPORT

Le taux d'actualisation à 30 ans a été estimé à 3,51 % (Source : [Taux EY 30 ans](#)).

Pour chaque typologie de bâtiment, les surfaces de toiture suivantes ont été retenues :

- Surface de toiture des bâtiments de bureaux : 767 m² ;
- Surface de toiture du commerce ancien / nouveau : 955 m² ;
- Surface de toiture des bâtiments d'enseignement : 450 m².

4.3. Les résultats pour les bâtiments de bureaux

4.3.1. Les bâtiments de bureaux neufs

Tableau 19 : Consommations électriques d'un bâtiment de bureaux neufs type dans trois zones climatiques en kWh/m².an

Consommations électriques (kWh/m ² .an)								
Peinture	Zone climatique	Chauffage	Refroidissement	ECS	Éclairage	Ventilation	Total	Écart (avec et sans)
Sans	H2b	18,7	6,5	4	5,2	3,7	38,1	0
	H1c	23,4	8,8	4	4,9	3,7	44,8	0
	H3	11,2	14,2	3,8	4,5	3,7	37,4	- 0,1
Avec	H2b	18,8	6,4	4	5,2	3,7	38,1	0
	H1c	23,5	8,7	4	4,9	3,7	44,8	0
	H3	11,5	14	3,8	4,5	3,7	37,5	+ 0,1

L'analyse énergétique réalisée sur des bâtiments de bureaux neufs a révélé que l'apport des peintures réfléchissantes était nul voire quasi nul pour les trois zones climatiques lorsque les cinq postes de consommation électrique étaient pris en compte (en zone H3, les bureaux neufs avec peinture consomment très légèrement plus). Les faibles gains liés à la baisse de l'usage de la climatisation sont intégralement compensés par des consommations supérieures en période de chauffe (tableau 19).

De ce fait, les coûts d'investissement et d'exploitation liés aux peintures réfléchissantes ne sont compensés par aucun gain. De ce fait, la valeur actualisée nette est négative. L'investissement (mettre en œuvre les peintures réfléchissantes) n'est absolument pas rentable (tableau 20).

Deux points complémentaires sont à noter :

1. Le coût d'investissement actualisé est moindre pour des peintures haut de gamme. L'investissement initial supérieur la première année évite de devoir revenir déposer régulièrement une nouvelle couche en toiture (tous les cinq ans pour le bas de gamme et tous les huit ans pour le moyen de gamme) ;
2. Les calculs énergétiques ont révélé un léger bénéfice associé à un meilleur confort d'été (les degrés heures d'inconfort sont moindres). Cette externalité n'a pas été chiffrée et il ne semble pas nécessaire de le faire. On peut supposer qu'un confort similaire peut être obtenu avec la mise en place de la climatisation. C'est d'ailleurs ce que révèle l'analyse énergétique qui quantifie les consommations électriques. Le prix de la climatisation correspond donc au prix pour un confort supérieur en été.

RAPPORT

Tableau 20 : Valeur actualisée nette de la mise en œuvre de peinture réfléchissante en toiture d'un bâtiment de bureaux neufs type

	H2b (montants en euros)	H1C (montants en euros)	H3 (montants en euros)
Coût d'investissement actualisé (cas entrée de gamme)	62 426,88	62 426,88	62 426,88
Coût d'investissement actualisé (cas moyen de gamme)	53 145,1	53 145,1	53 145,1
Coût d'investissement actualisé (cas haut de gamme)	40310,34	40310,34	40310,34
Entretien actualisé	14583,57	14583,57	14583,57
Gain énergie	0	0	-298,53
VAN cas entrée de gamme	- 77 010,45	- 77 010,45	- 77 010,45
VAN cas moyen de gamme	- 67 728,67	- 67 728,67	- 67 728,67
VAN cas haut de gamme	- 54 893,91	- 54 893,91	- 55 192,44

4.3.2. Les bâtiments de bureaux anciens

L'analyse énergétique réalisée sur des bâtiments de bureaux anciens a révélé que l'apport des peintures réfléchissantes était quasiment nul pour les trois zones climatiques lorsque les cinq postes de consommation électrique étaient pris en compte. Un petit gain est comptabilisé pour la zone H3, celle qui selon les entretiens étaient a priori la plus favorable aux peintures. Les faibles gains liés à la baisse de l'usage de la climatisation sont intégralement compensés dans les zones H2b et H1c par des consommations supérieures en période de chauffe (tableau 21).

Tableau 21 : Consommations électriques d'un bâtiment de bureaux ancien type dans trois zones climatiques en kWh/m².an

Consommations électriques (kWh/m ² .an)								
Peinture	Zone climatique	Chauffage	Refroidissement	ECS	Éclairage	Ventilation	Total	Écart (avec et sans)
Sans	H2b	53,8	5,8	4,1	8,9	3,7	76,3	0
	H1c	59,6	8,6	4,1	8,6	3,7	84,6	0
	H3	35,7	16,6	3,9	8	3,7	67,9	0,3
Avec	H2b	54,5	5,1	4,1	8,9	3,7	76,3	0
	H1c	60,2	8	4,1	8,6	3,7	84,6	0
	H3	36,3	15,7	3,9	8	3,7	67,6	- 0,3

Comme dans le neuf, la valeur actualisée nette est négative. L'investissement (mettre en œuvre les peintures réfléchissantes) n'est absolument pas rentable (tableau 22).

RAPPORT

Tableau 22 : Valeur actualisée nette de la mise en œuvre de peinture réfléchissante en toiture d'un bâtiment de bureaux anciens type

	H2b (montants en €)	H1C (montants en €)	H3 (montants en €)
Coût d'investissement actualisé (cas entrée de gamme)	62426,88	62426,88	62426,88
Coût d'investissement actualisé (cas moyen de gamme)	53145,1	53145,1	53145,1
Coût d'investissement actualisé (cas haut de gamme)	40310,34	40310,34	40310,34
Entretien actualisé	14583,57	14583,57	14583,57
Gain énergie	0	0	895,58
VAN cas entrée de gamme	- 77010,45	- 77010,45	- 76114,87
VAN cas moyen de gamme	- 67728,67	- 67728,67	- 66833,09
VAN cas haut de gamme	- 54893,91	- 54893,91	- 53998,33

4.4. Les résultats pour les bâtiments de commerce

4.4.1. Le commerce neuf

Le poste de climatisation est le second poste de consommation énergétique des bâtiments de commerce après l'éclairage. De ce fait, la baisse des consommations obtenue en période estivale liée à un moindre besoin de refroidissement du bâtiment dépasse les surconsommations de la période de chauffe. La mise en œuvre de peinture réfléchissante s'avère ainsi positive sur le plan énergétique pour les trois zones même pour des bâtiments récemment conçus (tableau 23).

Tableau 23 : Consommations électriques d'un bâtiment de commerce neuf type dans trois zones climatiques en kWh/m².an

Consommation électrique (kWh/m ² .an)							
Peinture	Zone climatique	Chauffage	Refroidissement	Ventilation	Éclairage	Total	Écart (avec et sans)
Sans	H2b	11,5	31,6	8,2	90,8	142,1	+ 2,1
	H1c	12,7	36,7	8,5	90,8	148,7	+ 2
	H3	9,6	48,1	9,2	90,8	157,7	+ 3,2
Avec	H2b	11,8	29,3	8,1	90,8	140	- 2,1
	H1c	13,2	34,2	8,5	90,8	146,7	- 2
	H3	10,1	44,6	9	90,8	154,5	- 3,2

RAPPORT

Tableau 24 : Valeur actualisée nette de la mise en œuvre de peinture réfléchissante en toiture d'un bâtiment de commerce neuf type

	H2b (montants en euros)	H1C (montants en euros)	H3 (montants en euros)
Coût d'investissement actualisé (cas entrée de gamme)	77 728,38	77 728,38	77 728,38
Coût d'investissement actualisé (cas moyen de gamme)	65956,2	65956,2	65956,2
Coût d'investissement actualisé (cas haut de gamme)	50190,84	50190,84	50190,84
Entretien actualisé	18158,16	18158,16	18158,16
Gain énergie	7805,65	7433,95	11894,32
VAN cas entrée de gamme	- 88080,89	- 88452,59	- 83992,22
VAN cas moyen de gamme	- 76308,71	- 76680,41	- 72220,04
VAN cas haut de gamme	- 60543,35	- 60915,05	- 56454,68

De ce fait, les coûts actualisés liés à la mise en œuvre des peintures et à l'entretien sont atténués par les gains énergétiques obtenus sur la période de 30 ans. Néanmoins, ces gains sont trop faibles pour compenser les gains (tableau 24). La surface supérieure du bâtiment type du commerce par rapport à celle du bâtiment type du bureau conduit d'ailleurs à une valeur actualisée nette davantage négative dans le cas du commerce malgré ces gains énergétiques.

4.4.2. Le commerce ancien

Les bâtiments de commerce anciens présentent a priori la configuration la plus favorable. D'après les simulations énergétiques, c'est dans cette configuration que les gains énergétiques liés à l'application de la peinture thermo-réfléchissante, sont les plus importants (tableau 25).

Tableau 25 : Consommations électriques d'un bâtiment de commerce ancien type dans trois zones climatiques en kWh/m².an

Consommation électrique (kWh/m ² .an)							
Peinture	Zone climatique	Chauffage	Refroidissement	Ventilation	Eclairage	Total	Ecart (avec et sans)
Sans	H2b	56,3	29,3	10,7	136,2	232,5	+ 2,8
	H1c	61,5	37,7	11,4	136,2	246,8	+ 3,5
	H3	40,6	55,3	10,5	136,2	242,6	+ 5,9
Avec	H2b	57,4	25,5	10,6	136,2	229,7	- 2,8
	H1c	63	32,8	11,3	136,2	243,3	- 3,5
	H3	42,5	47,7	10,3	136,2	236,7	- 5,9

RAPPORT

Tableau 26 : Valeur actualisée nette de la mise en œuvre de peinture réfléchissante en toiture d'un bâtiment de commerce anciens type

	H2b (montants en euros)	H1C (montants en euros)	H3 (montants en euros)
Coût d'investissement actualisé (cas entrée de gamme)	77 728,38	77 728,38	77 728,38
Coût d'investissement actualisé (cas moyen de gamme)	65 956,2	65 956,2	65 956,2
Coût d'investissement actualisé (cas haut de gamme)	50 190,84	50 190,84	50 190,84
Entretien actualisé	18 158,16	18 158,16	18 158,16
Gain énergie	10 407,53	13 009,41	21 930,15
VAN cas entrée de gamme	- 85 479,01	-82 877,13	-73 956,39
VAN cas moyen de gamme	-73 706,83	-71 104,95	-62 184,21
VAN cas haut de gamme	-57 941,47	-55 339,59	-46 418,85

En dépit de cette situation favorable, la valeur actualisée de la mise en œuvre de peinture réfléchissante, quelles que soient la gamme et la zone climatique concernée, est toujours négative (tableau 26). C'est aussi dans cette configuration que les degrés heures d'inconfort sont moindres. Mais les moments d'inconfort restent parfois très importants (DH calculé à 2698 en zone H2b et 6155,6 en zone H3). Ces externalités limitées mais existantes n'ont pas été chiffrées. Mais elles ne pourraient pas compenser la VAN négative obtenue.

4.4.3. Le commerce ancien avec des hypothèses extrêmes et non plus moyennes

Pour les bâtiments de commerce anciens présentant la configuration la plus favorable, il a été décidé de mener une simulation thermique non plus sur un bâtiment moyen mais sur un bâtiment qui combine plusieurs éléments a priori favorables à la mise en œuvre de la peinture :

- Choix de la zone H3 qui est la plus chaude et pour laquelle les besoins de refroidissement sont les plus élevés
- Revêtements initiaux très sombres (alpha 0,9)
 - o Facteur solaire été sans peinture : 0,0666
 - o Facteur solaire été avec peinture : 0,0074
- Cas le moins vitrée en toiture (suppression des vitrages en toiture) et en façade (descendu à 5 %)
- Niveau d'isolation de toiture très faible - Up de toiture existante à 1 W/(m².K) correspondant à 2 ou 3 cm d'isolant.
- Protections solaires mobiles sur les vitrages.

Dans cette configuration, l'écart estival lié aux consommations dédiées à la climatisation est maximal (tableau 27). Ceci rend le recours à la peinture réfléchissante plus intéressant ; Néanmoins, sur une période de trente ans, les gains énergétiques enregistrés ne compensent toujours pas les coûts d'entretiens et d'investissement (tableau 28).

RAPPORT

Tableau 27 : Consommations électriques d'un bâtiment de commerce ancien en zone climatique H3 en kWh/m².an

Consommation électrique (kWh/m ² .an)							DH (Degrés - heures)
Peinture	Chauffage	Refroidissement	Ventilation	Éclairage	Total	Écart (avec et sans)	
Sans	54,7	63,1	11,4	136,2	265,4	+ 13,80	14 285,3
Avec	59	45,1	11,3	136,2	251,6	- 13,80	7 470,1

Tableau 28 : Valeur actualisée nette de la mise en œuvre de peinture réfléchissante en toiture d'un bâtiment de commerce anciens en zone H3

	Montants en euros
Coût d'investissement actualisé (cas entrée de gamme)	77 728,38
Coût d'investissement actualisé (cas moyen de gamme)	65 956,2
Coût d'investissement actualisé (cas haut de gamme)	50 190,84
Entretien actualisé	18 158,16
Gain énergie	51 294,25
VAN cas entrée de gamme	- 44 592,29
VAN cas moyen de gamme	- 32 820,11
VAN cas haut de gamme	- 17 054,75

4.4.4. Le commerce ancien sans climatisation dans le cas extrême

Pour les bâtiments de commerce anciens présentant la configuration la plus favorable, la VAN a été recalculée en supposant que le gain associé à la peinture lors des périodes de chaleur estivale permet de se passer de climatisation. Cette hypothèse reste très forte et rend le cas très théorique dans la mesure à l'analyse énergétique (tableau 27) a montré que dans ce cas, le recours à une peinture réfléchissante réduit le nombre d'heures d'inconfort (environ 7 000 degrés-heures éliminés grâce à la peinture) mais ne les supprime pas. Au contraire, en raison des longues périodes estivales, c'est dans cette configuration que les besoins de froid et les degrés-heures sont les plus élevés.

L'absence de climatisation s'avère très positive sur le plan économique puisque les consommations d'énergie associées au retrait de cet équipement sont annulées. De même, il n'est plus nécessaire de payer des frais d'entretien annuels (évalués à 6 – 8 €/m² - la fourchette basse a été retenue). Enfin, l'absence d'investissement dans un système de climatisation baisse d'autant le budget du projet.

Comme les bâtiments de commerce sont fréquemment peu cloisonnés, le ratio d'investissement peut s'établir dans une fourchette allant de 180 à 200 €/ m² (la fourchette basse a également été retenue). Par ailleurs, des calculs ont été menés en intégrant des frais d'entretien de la toiture (nettoyage régulier) plus élevés. Une fourchette haute de 5 €/m² a été retenue au lieu de 1 €/m² dans tous les calculs précédents.

RAPPORT

Dans les deux configurations (coûts d'entretien à 1 € ou à 5 €/m²) et pour tous les types de peinture (du bas au haut de gamme), l'équation associant suppression de la climatisation et investissement dans les peintures réfléchissantes conduit à une valeur actualisée nette positive de l'investissement (tableau 28 bis).

Tableau 28 bis : Valeur actualisée nette de la mise en œuvre de peinture réfléchissante en toiture d'un bâtiment de commerce anciens en zone H3 et du retrait de la climatisation

	En euros (coûts d'entretien 1€/m ²)	En euros (coûts d'entretien 5€/m ²)
Coût d'investissement actualisé (cas entrée de gamme)	77 728,38	77 728,38
Coût d'investissement actualisé (cas moyen de gamme)	65 956,2	65 956,2
Coût d'investissement actualisé (cas haut de gamme)	50 190,84	50 190,84
Entretien actualisé	18 158,16	138 154,34
Gain énergie	234 541,10	234 541,10
VAN cas entrée de gamme	+419 503,50	+299 507,32
VAN cas moyen de gamme	+431 275,68	+311 279,50
VAN cas haut de gamme	+447 041,04	+327 044,86

4.5. Les résultats pour les bâtiments d'enseignement

4.5.1. Les bâtiments d'enseignement neufs

Une des spécificités des bâtiments d'enseignement par rapport aux bâtiments de bureaux et de commerce, est d'être très peu climatisés (cf. *Figure 2*). Ces bâtiments ont a priori des besoins plus limités en climatisation puisque lors des vacances estivales, ils sont fermés (malgré tout la RT considère qu'ils sont occupés à 50% en juillet et août). En revanche, ils sont chauffés le plus souvent d'octobre à mars (les vacances de Noël puis de février pouvant constituer une interruption). Comme la période avec des besoins de climatisation est limitée alors que celle avec des besoins de chauffage est relativement longue, la mise en œuvre de la peinture ne s'avère pas du tout pertinente. Les faibles gains énergétiques obtenus sur le poste refroidissement restent quelles que soient les zones climatiques, inférieurs aux surconsommations liées au chauffage (cf. tableau 29). Pour un usage lié à l'enseignement, la peinture thermo-réfléchissante n'apparaît pas comme un choix pertinent.

RAPPORT

Tableau 29 : Consommations électriques d'un établissement d'enseignement primaire neuf type dans trois zones climatiques en kWh/m².an

Consommation électrique (kWh/m ² .an)							Conso en kWh/m ² /an	Écart (avec et sans)	
Peinture	Zone climatique	Refroidissement	ECS	Eclairage	Ventilation	Total	Chauffage gaz	Élec.	Gaz
Sans	H2b	3,8	3,9	3,9	3	14,6	28,8	+ 0,2	- 0,6
	H1c	3,8	3,9	3,6	3	14,3	32,3	0	- 0,6
	H3	4,6	3,8	3,4	3	14,8	18,4	0	- 0,6
Avec	H2b	3,6	3,9	3,9	3	14,4	29,4	- 0,2	+ 0,6
	H1c	3,8	3,9	3,6	3	14,3	32,9	0	+ 0,6
	H3	4,6	3,8	3,4	3	14,8	19	0	+ 0,6

Ces résultats se retrouvent dans le calcul de la valeur actualisée nette qui est constitué de trois éléments de charges : des coûts d'investissements, des coûts d'entretiens et des consommations d'énergie supplémentaires. Les VAN sont toutes négatives (tableau 30) mais elles restent dans tous les cas (du bas au haut de gamme et dans les zones H2b, H1C et H3) plus faibles en montants que dans les cas des bureaux et des commerces en raison d'une surface initiale plus petite.

Tableau 30 : Valeur actualisée nette de la mise en œuvre de peinture réfléchissante en toiture d'un bâtiment d'enseignement primaire neuf type

	H2b (montants en euros)	H1C (montants en euros)	H3 (montants en euros)
Coût d'investissement actualisé (cas entrée de gamme)	36 625,94	36 625,94	36 625,94
Coût d'investissement actualisé (cas moyen de gamme)	31 180,31	31 180,31	31 180,31
Coût d'investissement actualisé (cas haut de gamme)	23 650,13	23 650,13	23 650,13
Entretien actualisé	8 556,2	8 556,2	8 556,2
Gain énergie	- 145,11	- 495,4	-495,4
VAN cas entrée de gamme	- 45 327,25	- 45 677,54	- 45 677,54
VAN cas moyen de gamme	- 39 881,62	- 40 231,91	- 40 231,91
VAN cas haut de gamme	- 32 351,44	- 32 701,73	- 32 701,73

4.5.2. Les bâtiments d'enseignement anciens

Dans les bâtiments d'enseignement anciens, étaler de la peinture thermo-réfléchissante en toiture s'avère encore moins pertinent sur le plan économique que dans le neuf (tableau 31). Ces bâtiments sont moins bien isolés et ils bénéficieront encore moins des apports solaires lors des périodes hivernales. Cette situation conduit de façon mécanique à une VAN encore négative que dans le neuf (tableau 32).

RAPPORT

Tableau 31 : Consommations électriques d'un établissement d'enseignement primaire ancien type dans trois zones climatiques en kWh/m².an

Consommation électrique (kWh/m ² .an)							Conso en kWh/m ² /an	Écart (avec et sans)	
Peinture	Zone climatique	Refroidissement	ECS	Eclairage	Ventilation	Total	Chauffage gaz	Élec.	Gaz
Sans	H2b	3,8	3,9	8,7	3	19,4	52,4	0	- 1,8
	H1c	3,8	3,9	8,1	3	18,8	58,4	0	- 1,7
	H3	4,6	3,7	7,5	3	18,8	35	- 0,1	- 1,1
Avec	H2b	3,8	3,9	8,7	3	19,4	54,2	0	+ 1,8
	H1c	3,8	3,9	8,1	3	18,8	60,1	0	+ 1,7
	H3	4,6	3,8	7,5	3	18,9	36,1	+ 0,1	+ 1,1

Tableau 32 : Valeur actualisée nette de la mise en œuvre de peinture réfléchissante en toiture d'un bâtiment d'enseignement primaire ancien type

	H2b (montants en euros)	H1C (montants en euros)	H3 (montants en euros)
Coût d'investissement actualisé (cas entrée de gamme)	36 625,94	36 625,94	36 625,94
Coût d'investissement actualisé (cas moyen de gamme)	31 180,31	31 180,31	31 180,31
Coût d'investissement actualisé (cas haut de gamme)	23 650,13	23 650,13	23 650,13
Entretien actualisé	8 556,2	8 556,2	8 556,2
Gain énergie	- 1 486,2100	- 1 403,64	- 10 83,39
VAN cas entrée de gamme	- 46 668,35	- 46 585,78	- 46 265,53
VAN cas moyen de gamme	- 41 222,72	- 41 140,15	- 40 819,9
VAN cas haut de gamme	- 33 692,54	- 33 609,97	- 33 289,72

5. LES TOITURES VEGETALISEES

Les simulations thermiques ont été uniquement effectuées sur des bâtiments de commerce neufs. Même si cette situation n'est pas optimale (on peut en effet supposer que les bâtiments de commerce anciens moins bien isolés et situés en zone H3 offraient des perspectives de gains énergétiques supérieurs), le cas met en évidence les limites de ce type de solution sur le plan strictement économique.

L'entretien avec l'ADIVET avait révélé que les coûts de mise en œuvre d'une toiture extensive varient de 40 à 50 euros par m². Pour la maintenance, il convenait de compter sur 4 à 5 euros par m² par an. Pour l'investissement, l'hypothèse de 40€/m² a été retenue. Pour l'entretien, la fourchette haute de 5 €/m² a été retenue.

RAPPORT

Le tableau 33 montre que la mise en œuvre d'une toiture végétalisée réduit l'activation de la climatisation. En revanche, contrairement aux peintures, en période hivernale, la végétalisation de la toiture abaisse très légèrement les consommations de chauffage. Sur ce plan, les toitures végétalisées se distinguent des peintures thermo-réfléchissantes en toiture qui conduisent systématiquement à une hausse des besoins de chauffage (dans toutes les zones et pour tous les types de bâtiments).

Comme les coûts d'entretien d'une toiture végétalisée sont supérieurs à ceux d'une toiture recouverte de peinture, la valeur actualisée nette de ce type d'investissement est fortement négative (tableau 34). Néanmoins, cette analyse basée sur les coûts et les gains monétarisés n'intègre pas les nombreuses externalités mentionnées dans la revue de littérature. Les chercheurs qui se sont penchés sur le sujet mettaient notamment en avant la valorisation immobilière importante du bien qui bénéficiait de cet investissement. Par ailleurs, l'environnement urbain était également amélioré. Pour mieux apprécier ces gains, il conviendrait de procéder à une analyse de cas réels. L'appréciation des externalités et leur valorisation supposent en effet de mieux prendre en compte les éléments de contexte (pression immobilière et contexte urbain).

Tableau 33 : Consommations électriques d'un bâtiment de commerce neuf type recouvert d'une toiture végétalisée extensive dans trois zones climatiques en kWh/m².an

Consommation électrique (kWh/m ² .an)							
Peinture	Zone climatique	Chauffage	Refroidissement	Ventilation	Éclairage	Total	Écart (avec et sans)
Sans	H2b	11,5	31,6	8,2	90,8	142,1	+ 0,70
	H1c	12,7	36,7	8,5	90,8	148,7	+ 0,60
	H3	9,6	48,1	9,2	90,8	157,7	+ 0,80
Avec	H2b	11,3	31,1	8,2	90,8	141,4	- 0,70
	H1c	12,5	36,3	8,5	90,8	148,1	- 0,60
	H3	9,5	47,5	9,1	90,8	156,9	- 0,80

Tableau 34 : Valeur actualisée nette de la mise en œuvre d'une toiture végétalisée sur un bâtiment de commerce neuf type

	H2b (montants en euros)	H1C (montants en euros)	H3 (montants en euros)
Coût d'investissement actualisé (toiture végétalisée extensive)	38 200	38 200	38 200
Entretien actualisé	90 790,78	90 790,78	90 790,78
Gain énergie	2 601,88	2 230,18	2 973,58
VAN cas entrée de gamme	- 126 388,9	- 126 760,6	- 126 017,2

6. LES PANNEAUX PHOTOVOLTAIQUES

Un investissement dans des panneaux photovoltaïques engendre des recettes liées à la vente d'énergie et contribue à fortement réduire la facture énergétique grâce à l'autoconsommation. En cela, un projet photovoltaïque se distingue de la mise en œuvre de peinture réfléchissante qui protègent uniquement les bâtiments des rayons du soleil et réduisent ainsi les besoins de rafraîchissement du bâtiment via de la climatisation.

Les coûts du photovoltaïque comprennent les coûts d'investissement liés à l'installation des panneaux en toiture, les coûts d'entretien et les autres coûts divers (assurance, remplacement de l'onduleur tous les dix ans, visites réglementaires de contrôle). Pour ces coûts deux options ont été calculées : la première basée sur la fourchette basse des coûts ; la seconde sur la fourchette haute.

Les coûts d'investissement (CAPEX) comprennent le matériel (les modules PV, les onduleurs, les liaisons électriques), les frais d'ingénierie (étude de faisabilité, étude structure), les frais de chantier, les coûts de raccordement au réseau. Le rapport portant sur *les Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France (2022)* estime que ces coûts d'investissement sont d'environ 1,08 euros par watt-crête pour des installations couvrant entre 100 et 500 kWc (cf. supra – *Figure 32*). Ces coûts ont chuté en 10 ans puisqu'ils étaient de 4,56 euros en 2011. Même si le rendement des cellules chute régulièrement au fil des ans.

Les coûts de fonctionnement (OPEX) comprennent⁵ :

- Les coûts d'entretien varient de 5 à 8 € HT/kWc pour une installation comprise entre 36 et 500 kWc ;
- La durée de vie de l'onduleur est estimée à dix ans. Pour une durée d'exploitation de trente ans, deux remplacements sont à prévoir. Le budget s'élève pour les installations de grande puissance à 0,1 €/Wc ;
- Les assurances : la cotisation annuelle pour l'assurance responsabilité civile et l'assurance dommages aux biens est de l'ordre de 0,5 à 0,8 % du montant des travaux ;
- Les visites réglementaires : plusieurs visites réglementaires peuvent avoir lieu au cours des trente années d'exploitation. Il s'agit des visites réglementaires "Code du travail" liée aux installations électriques et des visites incendie de type "Q18" exigées par l'assureur. Chaque visite coûte entre 250 et 500 € HT.

Pour la plupart de ces coûts, il existe une fourchette basse et une fourchette haute. Deux calculs seront proposés afin d'intégrer ces deux bornes.

La plupart des hypothèses adoptées lors des précédents calculs de VAN liées à la mise en œuvre de peintures réfléchissantes, sont maintenues. Le taux d'actualisation est de 3,51 %. La surface de toiture du commerce est de 955 m². Un ratio d'emprise surfacique de 80 % a été retenu afin de permettre la maintenance des panneaux. En effet, le personnel qui assure la maintenance et le nettoyage des panneaux doit pouvoir se déplacer sur la toiture. La surface de toiture recouverte de panneaux s'élève ainsi à 764 m². Le rendement des cellules de ces panneaux baisse chaque année de 0,44 %.

Le prix d'achat de l'électricité pour un professionnel est toujours de 0,2047 €/kWh HT. Le tarif de revente photovoltaïque est le prix auquel l'électricité photovoltaïque est vendue à EDF OA (EDF Obligation d'Achat) pendant vingt ans à un tarif fixe et réglementé par la CRE (Commission de Régulation de l'Énergie). Pour les besoins de l'étude qui couvre trente ans, on suppose que ce tarif n'évoluera pas et restera stable entre la vingtième et la trentième année. Cette vente concerne l'électricité produite par les panneaux solaires qui n'aurait pas été consommée instantanément. Cette électricité est alors injectée dans le réseau public et en contrepartie EDF OA vous verse une rémunération. Le tarif qui concerne les installations d'une puissance compris entre 100 kWc et 500 kWc est de 0,1171 €/kWh⁶.

⁵ Les coûts de fonctionnement liés à un investissement photovoltaïque sont issus du site de l'ADEME : [Photovoltaïque - Connaître les coûts et évaluer la rentabilité](https://www.ademe.fr/fr/photovoltaique/connaitre-les-couts-et-evaluer-la-rentabilite)

⁶ Les tarifs de revente sont fixés par trimestre par arrêtés tarifaires. Le tarif de 0,1171€/kWh couvre la période du 01/02/2024 au 30/04/2024. Source : [Tarifs d'achat photovoltaïque du 2ème Trimestre 2024 : c'est officiel ! | Soleriel.fr](https://www.soleriel.fr/fr/tarifs-achat-photovoltaique-du-2eme-trimestre-2024-c-est-officiel)

RAPPORT

Les calculs énergétiques n'ont été réalisés que pour un bâtiment de commerce neuf type. A priori, un bâtiment de commerce ancien présente une configuration plus intéressante (il conduit a priori à davantage d'autoconsommation et le prix de l'énergie autoconsommée est près de deux fois supérieur à celui de l'énergie vendue). Néanmoins, la production photovoltaïque reste la même quel que soit le type de bâtiment puisque cette production dépend de la surface de toiture (qui reste inchangée) et non de la qualité du bâti.

Par ailleurs, dans les cas précédents, les calculs liés aux consommations électriques du commerce ont été effectués sur quatre postes : le chauffage, le refroidissement, la ventilation et l'éclairage. Le poste éclairage était neutre au sens où il n'impactait pas le résultat final (la peinture en toiture ne joue pas sur les consommations électriques). Un autre poste « neutre » n'avait pas été mentionné : celui lié aux consommations mobilières. Ce sont des consommations forfaitaires qui représentent les consommations liées aux objets mobiliers (postes informatiques, électro-ménager, éclairage sur prises électriques ...). Dans ce cas lié à un investissement photovoltaïque, elles sont réintroduites dans la mesure où la production photovoltaïque va conduire en autoconsommation à alimenter en partie ce poste.

Les résultats des simulations énergétiques (tableau 35) indiquent que la production photovoltaïque permet chaque année une production totale comprise entre 193,70 (zone H2b – soit 240,6 – 117,8) et 265,80 kWh/m²/an (zone H3).

C'est en été que la production photovoltaïque est maximum et que les besoins du bâtiment sont les mieux couverts. On voit notamment qu'une grande partie de la consommation électrique dédiée au refroidissement (besoins qui apparaissent lors de la période estivale quand le soleil donne le plus) est couverte par l'autoconsommation. A l'inverse, les consommations de chauffage sont quasiment identiques puisque le chauffage est coupé en été. Les consommations des autres postes (ventilation, éclairage, mobilière) qui a priori restent stables sur l'année sont quasiment diminuées de moitié. Enfin, une importante proportion de la production photovoltaïque est revendue (43% en zone H3).

Tableau 35 : Consommations électriques et vente d'un bâtiment de commerce neuf type recouvert de panneaux photovoltaïques dans trois zones climatiques en kWh/m²/an

Consommation électrique achetée sur le réseau (kWh/m ² .an)							Auto consommation	Vente	
Peinture	Zone climatique	Chauffage	Refroidissement	Ventilation	Eclairage	Mobilière	Total		
Sans	H2b	11,5	31,6	8,2	90,8	98,5	240,6		
	H1c	12,7	36,7	8,5	90,8	98,5	247,2		
	H3	9,6	48,1	9,2	90,8	98,5	256,2		
Avec	H2b	10,8	8	4,2	46,2	48,60	117,8	122,8	70,9
	H1c	12,1	9,8	4,5	46,3	48,70	121,4	125,8	71,6
	H3	9,2	11	4,3	39,4	40,90	104,8	151,4	114,4

Cette situation permet d'obtenir une VAN actualisée positive (tableaux 36 et 37) tant dans le cas optimiste (fourchettes basses pour les coûts d'entretien, les visites réglementaires et les coûts d'assurance) que pessimiste (fourchette haute). La zone climatique H3 qui présente potentiellement le plus d'intérêt pour la mise en œuvre de la solution photovoltaïque, conduit à une VAN actualisée du projet supérieure à 400 000 euros. Un investisseur avisé préférera systématiquement opter pour une solution photovoltaïque que pour une peinture réfléchissante ou une toiture végétalisée si son seul critère est d'ordre économique.

RAPPORT

Tableau 36 : Valeur actualisée nette de la mise en œuvre de panneaux photovoltaïques sur un bâtiment de commerce neuf type (fourchette basse des coûts)

	H2b (montants en euros)	H1C (montants en euros)	H3 (montants en euros)
Coût d'investissement actualisé (panneaux photovoltaïques)	165 024	165 024	165 024
Coût remplacement onduleur	18 486,20	18 486,20	18 486,20
Coût assurance	15 688,65	15 688,65	15 688,65
Coût des visites réglementaires	4 753,44	4 753,44	4 753,44
Coût d'entretien	72 632,63	72 632,63	72 632,63
Gain énergie (autoconsommation)	433 389,92	443 977,63	534 326,01
Gain énergie (vente)	143 141,56	144 554,80	230 964,65
VAN investissement PV	299 946,56	311 947,51	488 705,74

Tableau 37 : Valeur actualisée nette de la mise en œuvre de panneaux photovoltaïques sur un bâtiment de commerce neuf type (fourchette haute des coûts)

	H2b (montants en euros)	H1C (montants en euros)	H3 (montants en euros)
Coût d'investissement actualisé (panneaux photovoltaïques)	165 024	165 024	165 024
Coût remplacement onduleur	18 486,20	18 486,20	18 486,20
Coût assurance	25 101,84	25 101,84	25 101,84
Coût des visites réglementaires	9 506,89	9 506,89	9 506,89
Coût d'entretien	116 212,20	116 212,20	116 212,20
Gain énergie (autoconsommation)	433 389,92	443 977,63	534 326,01
Gain énergie (vente)	143 141,56	144 554,80	230 964,65
VAN investissement PV	242 200,35	254 201,30	430 959,53

7. CONCLUSION

Sur le plan économique l'ajout de peinture réfléchissante en toiture ne s'avère pertinent que dans certaines situations très particulières présentant un ensemble de conditions favorables. En effet, l'analyse économique réalisée a montré que sur des bâtiments présentant des caractéristiques moyennes, les coûts dépassent largement les gains potentiels sur la base d'une VAN⁷ calculée sur 30 ans.

Ces résultats défavorables ont été obtenus avec des hypothèses plutôt favorables (notamment un coût d'entretien très faible à 1 euro par m²).

Ces résultats globalement négatifs peuvent paraître surprenants au regard de ce qui a été avancé dans la littérature et des premiers retours d'expérience menés sur des grandes surfaces du commerce en France. Une des raisons principales pouvant être avancées pour expliquer cette situation est que les projets lancés en France n'ont peut-être pas été menés avec une analyse énergétique et économique très poussée. Les directeurs des grandes surfaces concernées mentionnent souvent le problème de la chaleur estivale. Ils retiennent le gain de confort et les économies réalisées sur cette période mais ils occultent dans leur raisonnement et dans leurs témoignages, les surconsommations que cela peut engendrer en hiver.

L'analyse d'une situation extrême (bâtiment de commerce très mal isolé offrant des gains énergétiques importants, localisé dans une des zones les plus chaudes de France) a été menée et a montré que le bilan économique obtenu sur des bâtiments moyens pouvait être beaucoup plus favorable dans le cas où l'ensemble des caractéristiques du bâtiment propices à l'utilisation des peintures étaient réunies (zone H3, toiture très sombre, niveau d'isolation minimal en toiture, surface vitrée minimale...). Les résultats obtenus sont meilleurs mais l'équilibre économique de l'investissement n'est toujours pas assuré. Les gains énergétiques ne compensent pas complètement l'investissement et l'entretien des toitures peintes.

Le seul cas de figure parmi l'ensemble des cas étudiés conduisant à un bilan économique positif est celui consistant à combiner à la fois les caractéristiques du bâtiment favorables et la suppression des coûts liés à l'entretien et l'installation d'une climatisation. Ce scénario reste cependant très théorique dans la mesure où les gains énergétiques maximaux apportés par la peinture, ne correspondent pas toujours au cas où les degrés-heures sont les plus faibles (cf. [Tableau 27](#)). La même analyse peut être faite pour les toitures végétalisées.

La comparaison avec deux autres solutions alternatives s'est révélée riche d'enseignements :

- La valeur actualisée nette d'un investissement dans des toitures végétalisées extensives ne s'avère pas viable sur le plan économique. Néanmoins, les toitures végétalisées sont multifonctionnelles. Elles apportent d'autres bénéfices potentiels (biodiversité, amélioration de la qualité de l'air, hausse de la valeur patrimoniale d'un bien immobilier) qui n'ont pas été chiffrés dans cette analyse. Seule une analyse plus approfondie à partir d'études de cas réels permettrait de mieux cerner l'ensemble des avantages apportés par ce type de solution.
- La valeur actualisée nette d'un investissement dans des panneaux photovoltaïques posés en toiture est positive quelle que soit la zone concernée et quelle que soit la borne de coûts retenue. Les recettes dégagées par la vente et la diminution de la facture énergétique supportée par le propriétaire occupant / le locataire, compensent sur une période de trente ans les investissements et les coûts d'entretien maintenance. Même si le rendement des cellules diminue, la production reste suffisante au fil du temps pour justifier cet investissement.

⁷ Valeur Net Actualisée (cf. § 4.1)

IMPACT SANITAIRE

1. INTRODUCTION

Selon certains spécialistes, la peinture est responsable de plus de la moitié de la pollution plastique des océans. 58 % des microplastiques dans l'océan proviendraient des peintures.

Naturellement, ce flux de pollution ne provient pas uniquement des surfaces des façades ou toitures des bâtiments (mise en œuvre, dégradation dans le temps ...) mais il provient également des ateliers de peinture, des opérations de lavage et de ponçage... C'est ainsi que l'on retrouve des particules dans les eaux pluviales.

Ces microplastiques sont retrouvés dans plus de 700 espèces marines, notamment dans des organismes qui bioconcentrent la pollution (moules, ...), répandant ainsi cette pollution dans toute la chaîne alimentaire.

Charge contaminante des microplastiques

La taille des microplastiques est comprise entre 5 millimètres et quelques centaines de nanomètres. Les plastiques sont composés non seulement de polymères, mais aussi d'un mélange de différents additifs, qui confèrent des propriétés au plastique : souplesse, rigidité, résistance au feu, etc. Ces additifs sont de potentiels contaminants chimiques. De plus, les bactéries qui se fixent à la surface des plastiques peuvent être des contaminants biologiques.

Quelle que soit sa nature (synthétique, à l'eau, naturelle...), une peinture (ou un vernis) est une matière fluide toujours composée de trois ingrédients de base :

- Le **liant** : c'est le composant principal de la peinture. Il sert à lier entre eux les ingrédients de la peinture et à lier la peinture au support. C'est un liquide ou une pâte qui peut être étalé(e) en couches minces, qui se durcit ensuite et acquiert une certaine résistance ;
- Le **solvant** ou diluant : il sert à dissoudre (white-spirit, térébenthine...) ou à diluer (eau – on parle alors de diluant) le liant pour rendre la peinture plus fluide et plus facilement applicable. Il s'évapore pendant la phase de séchage et est ainsi émis dans l'air ambiant. L'eau est le seul solvant d'origine minérale, tous les autres solvants sont des solvants organiques (de synthèse ou naturels) ;
- Le **pigment** : il est constitué de particules solides très fines. Il pigmente, protège des rayons UV et augmente, dans certains cas, la résistance de la peinture à la chaleur et à la corrosion.

Selon l'origine synthétique ou naturelle de ces trois ingrédients, on parlera de peintures synthétiques, à l'eau, naturelles, à la chaux...

Si les peintures naturelles se contentent de ces trois ingrédients de base, les peintures synthétiques à l'huile et les peintures à l'eau contiennent en plus des additifs destinés à améliorer les propriétés du film : plastifiants, émulsifiants, ignifuges, fongicides, insecticides, produits antirouille, anti-ultraviolets, conservateurs (formaldéhyde)... Les additifs sont souvent nuisibles à l'environnement et à la santé.

Les peintures contenant des pigments favorisant la réflectivité (*cool pigment paint*) sont une nouvelle génération de peintures destinées à refroidir les surfaces des bâtiments dans un but d'économie d'énergie (limitation du besoin de refroidissement en période estivale). Ces peintures thermo-réfléchissantes fournissent « un effet isolant » en réfléchissant une grande part du rayonnement solaire incident, réduisant ainsi la température de surface des matériaux peints.

2. LES PRINCIPAUX IMPACTS SANITAIRES

2.1. Les pigments

Les pigments utilisés dans ces revêtements comprennent généralement des pigments colorés inorganiques complexes et des oxydes métalliques mixtes qui réfléchiraient beaucoup plus le rayonnement proche infrarouge que les peintures colorées similaires contenant des pigments conventionnels. On note que la durée pendant laquelle elles conservent ce comportement est un enjeu important comme il est rappelé dans les chapitres « aptitude à l'emploi » et « impact énergétique ».

Des travaux de R&D tentent de modifier les formules des peintures minérales ou biodégradables notamment en optimisant les quantités de pigments utilisées et en réduisant les déversements dans les eaux de nettoyage.

Effet des nanoparticules industrielles sur l'environnement :

Le lessivage des parois peintes aboutit à l'accumulation de nanoparticules dans les eaux de pluie ; ces éléments vont se retrouver dans la biosphère et provoquer chez certaines espèces des phénomènes de bioaccumulation et de toxicité dépendant notamment de leur concentration et de l'état de surface.

Des modifications significatives de la biodiversité peuvent en résulter comme l'altération de la photosynthèse chez les algues, perturbant la dénitrification des nappes. Ces nanoparticules peuvent être à l'origine de résistances multiples chez diverses bactéries pathogènes.

Par ailleurs la dispersion des nanoparticules dans le milieu aboutira à une contamination de la chaîne alimentaire.

La plupart des nanoparticules manufacturées sont enrobées de substances diverses qui en modifient la réactivité de surface et leur confèrent des propriétés de durabilité et d'affinité pour diverses structures biologiques membranaires des cellules vivantes contaminées par ces nanoparticules. On parle ainsi de bio-persistance et d'accumulation à l'échelle cellulaire dans la faune et la flore aquatique notamment

La littérature montre également que les résines alkydes, le dioxyde de titane (TiO₂) et certains liants sont à l'origine de la majorité des effets génotoxiques des peintures. Certains liants sont responsables de la majeure partie de la charge environnementale des peintures. En outre, la fabrication du TiO₂ par le procédé au chlorure produit de grandes quantités de dioxines et de contaminants.

Pour atténuer les inconvénients de l'utilisation de TiO₂, l'utilisation de [charges minérales](#) comme substitut du TiO₂ dans le processus de production de peinture peut entraîner des réductions significatives des impacts environnementaux et améliorer l'aspect esthétique dans la finition de la peinture. Parmi les charges minérales, on peut citer le kaolin, composé de particules de [silicate d'aluminium](#) à grain grossier à fin, semblables à des plaques. Le kaolin est largement utilisé dans les industries de la céramique, du papier, du caoutchouc, de la peinture, du ciment et des [produits pharmaceutiques \[20\]](#).

D'autres pigments sont disponibles dans le commerce tels que le carbonate de calcium (CaCO₃), le sulfate de baryum (BaSO₄) et la silice (SiO₂). Ces pigments ont un indice réfléchissant inférieur dans le spectre solaire, et donc leur réflectance n'est pas aussi élevée que pour le TiO₂.

Pour obtenir une réflectance élevée, il est techniquement possible d'augmenter la concentration en CaCO₃ jusqu'à 60 %. En effet, le carbonate de calcium doit être considéré comme une charge fonctionnelle et non pas comme un diluant minéral pour maintenir la qualité technique de la peinture.

Des développements de peinture acrylique contenant une charge de carbonate de calcium ont été effectués pour atteindre, selon les déclarations des fabricants, une réflexion énergétique de l'ordre de 95% du rayonnement solaire. De plus, des polymères d'oxyde de magnésium (MgO) et de fluorure de polyvinylidène (PVDF) augmenteraient cet effet réfléchissant.

Par ailleurs, pour pouvoir peindre autrement que par la couleur blanche, des revêtements colorés existent. Dans ce cas, la composition peut être adaptée pour absorber différentes longueurs d'onde de la lumière visible afin de révéler la couleur souhaitée. Ce type de compositions générerait néanmoins un effet réfléchissant plus limité. Toutefois, Les peintures réfléchissante avec d'autres couleurs que le blanc sont peu utilisées.

Législation relative aux substances chimiques :

La législation relative aux [substances chimiques](#) s'applique également aux peintures utilitaires dont les composants les plus nocifs pour la santé ou l'environnement sont interdits. C'est le cas, par exemple, du plomb responsable de saturnisme qui est interdit depuis 1976 et est remplacé depuis par le titane qui donne blancheur et intensité aux peintures.

Une réglementation spécifique encadre la mise sur le marché des peintures compte tenu de leur impact sur l'environnement. Elle vise plus particulièrement à limiter dans les peintures leur contenu en composés organiques volatils qui, une fois libérés dans l'air, participent à la formation d'ozone troposphérique ou de particules fines (dites secondaires).

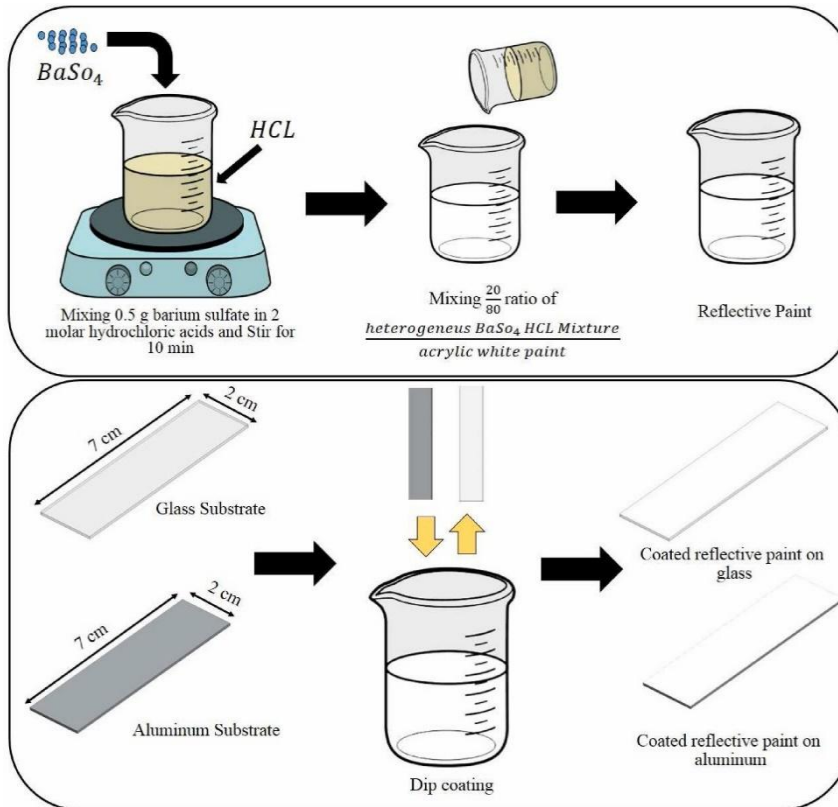
Ainsi, le contenu en composés organiques volatils (COV) des peintures décoratives et de certains produits de carrosserie est limité par la directive 2004/42/CE ([lien](#)). Cette directive ne porte pas sur les peintures réfléchissantes. En revanche, elle peut constituer un cadre de référence non réglementaire sur les risques de relargage notamment pour la mise en œuvre par les travailleurs.

La liste des « substances extrêmement préoccupantes » (SVHC) publiée par l'Agence Européenne des produits Chimiques (ECHA) offre également un cadre réglementaire d'identification et de limitation des concentrations des substances chimiques ([lien](#)).

Le remplacement de l'oxyde de titane par d'autres composés comme du sulfate de baryum ou du téflon (dont la toxicité est plus faible que celle de l'oxyde de titane) permettrait selon certaines études d'augmenter le caractère réfléchissant des peintures. Des associations de ce type de pigment avec des nanoparticules sont également proposées par certains fabricants qui revendiquent une performance supplémentaire d'isolation. Ces éléments sont toutefois à relativiser au regard de la très faible épaisseur de la couche de peinture. Ce type de peinture pourrait atteindre une réflectance solaire ultra-élevée de 97 % et une émissivité élevée de 0,96 à l'état initial. Toujours selon certaines études ou déclaration des fabricants, ces peintures présenteraient une bonne rentabilité, une performance réfléchissante élevée dans une large gamme de longueurs d'onde (200-350 et 400-1300 nm), une grande durabilité contre les rayons UV, l'humidité et les variations thermiques [21].

Dans le cadre d'une étude, la préparation d'une peinture blanche réfléchissante a été décrite. La figure 34 montre le processus suivi.

Figure 34 : Préparation et application sur échantillons de peinture blanche réfléchissante



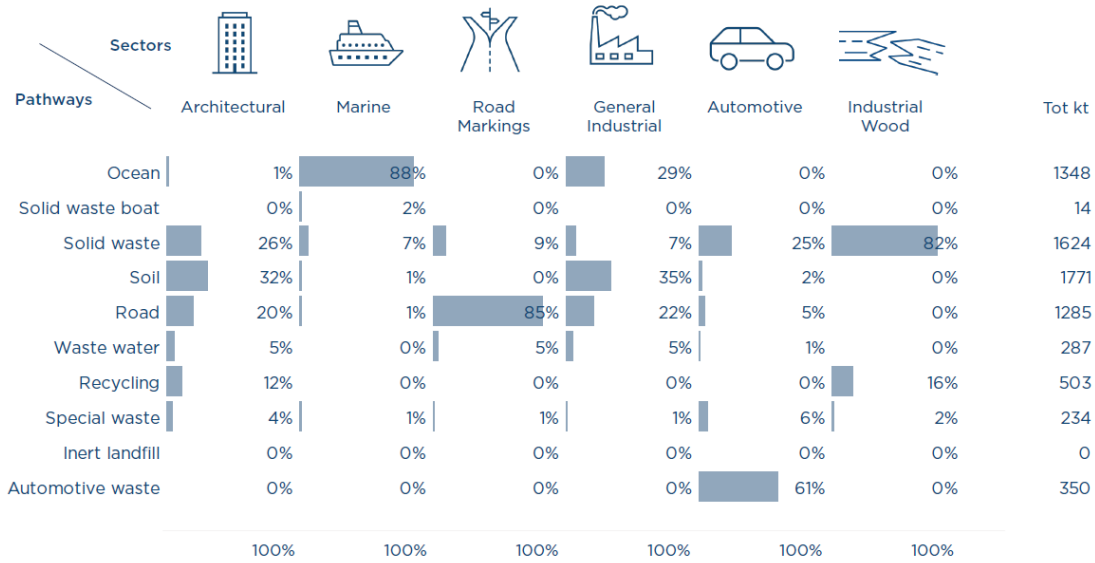
L'exemple de fabrication d'une peinture réfléchissante donné sur la figure 1, consiste à mélanger l'acide chlorhydrique 2 M à 37 % avec 0,5 g de sulfate de baryum extra pur puis agiter pendant 10 minutes. Par la suite mélanger une peinture acrylique blanche commerciale (80 % en poids) à des mélanges hétérogènes de sulfate de baryum (20 % en poids) [21].

2.2. Les microplastiques

Les microplastiques peuvent être relargués par tout produit plastique et pas uniquement par les peintures réfléchissantes. A ce titre, il est important de noter en particulier que les membranes d'étanchéité de toitures en PVC, EPDM ou même bitumineuse peuvent également être sujettes à un relargage de plastique au même titre que les peintures. On rappelle dans cette section les enjeux liés au relargage des plastiques et son effet sur l'environnement.

Plusieurs millions de tonnes de plastiques entrent dans les mers et les océans chaque année sous formes de macrodéchets, de microbilles (d'origines industrielle, cosmétique, etc.) et de fibres. Lors de leur séjour dans l'environnement, ces plastiques subissent l'abrasion mécanique des vagues et courants, l'oxydation des UV et se fragmentent en particules.

Figure 35 : Analyse de la destination des plastiques sur 6 secteurs



L'ensemble des fragments de plastiques de taille inférieure à 5 mm sont appelés microplastiques (MP). Les études scientifiques menées récemment autour de la planète montrent que ces microplastiques sont omniprésents dans toutes les régions du globe, des zones côtières les plus peuplées aux zones polaires. Ils sont aussi présents dans les sédiments et dans la plupart des organismes marins étudiés.

Si leurs sources commencent à être bien identifiées, leurs voies de transformation et de disparition et leur interaction avec la vie aquatique sont encore peu connues. La fragmentation des microplastiques en fragments de tailles inférieures au µm, appelés nano-plastiques (NP), est par exemple non évaluée à ce jour et les protocoles analytiques actuels ne permettent pas de vérifier la présence des NP dans l'environnement.

Les peintures (y compris les peintures réfléchissantes) sont en grande partie constituées de polymères plastiques (en moyenne 37 %). Les fuites de peinture vers l'environnement se produisent lors de l'application, de l'usure et de la maintenance (micro-fuite), ou peuvent être associées à la fin de vie de l'objet peint (macro-fuite).

La contribution mondiale en termes de fuites de plastique issues de peinture a été largement négligée jusqu'à présent.

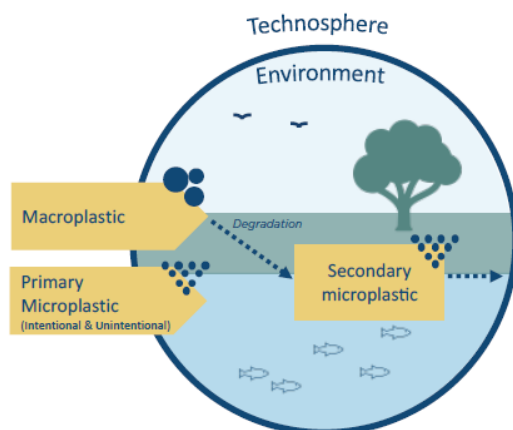
La peinture apparaît comme la plus grande source de fuite de microplastiques dans l'océan et dans les voies navigables (1,9 Mt/an), dépassant toutes les autres sources de fuite de microplastiques (par exemple les fibres textiles et la poussière des pneus).

Le plastique relargué se décompose en macro-plastique et microplastique (figure 36).

Figure 36 : Parts des macro-plastiques et des microplastiques.



Figure 37 : Flux de plastique dans le milieu aquatique

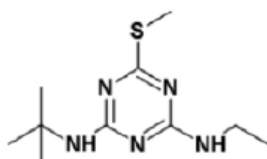


Toutefois, dans le domaine du bâtiment, environ 71 % du plastique contenu dans la peinture est utilisé pour les murs intérieurs. Ces polluants finissent néanmoins par rejoindre le milieu naturel et peuvent se dégrader et se bioaccumuler dans les animaux (figure 37). La généralisation des peintures réfléchissantes sur les parois extérieures pourrait avoir comme conséquence d'augmenter de manière significative la pression anthropique sur les milieux naturels.

2.3. Les biocides

Les produits biocides sont des produits chimiques, ou des mélanges d'une ou plusieurs substances, destinés à la lutte contre les organismes indésirables tels que les animaux, les insectes, les virus, les bactéries et les champignons. Ces biocides ne sont pas spécifiques aux peintures réfléchissantes appliquées en toitures. Ces biocides sont lessivés et quittent leur support selon un procédé dit « lessivage progressif des façades et toitures et finissent leur course dans les cours d'eau.

À titre d'exemple, un biocide est une molécule organique ajoutée dans les peintures : terbutryne (triazine, comme l'atrazine). Ces molécules ne sont pas spécifiques aux peintures réfléchissantes mais leur présence permet de limiter la prolifération du biofilm et donc d'augmenter la durabilité fonctionnelle. Toutefois, les peintures n'intègrent pas systématiquement des biocides dans leur composition. Ceux-ci étant généralement préconisés dans les protocoles d'entretien.



La mise sur le marché et l'utilisation des produits biocides est encadrée au niveau communautaire par le **règlement européen (UE) n° 528/2012** qui a remplacé et abrogé la directive européenne 98/8/CE. ([lien](#)).

L'objectif principal de cette réglementation est d'assurer un niveau de protection élevé de l'homme, des animaux et de l'environnement vis-à-vis de ces produits. Dans ce but, elle limite la mise à disposition sur le marché aux seuls substances actives et produits biocides efficaces et présentant des risques acceptables pour l'homme et l'environnement. Les mesures instaurées visent notamment à prévenir les effets à long terme : effets cancérogènes ou toxiques pour la reproduction, effets des substances toxiques, persistantes et bioaccumulables.

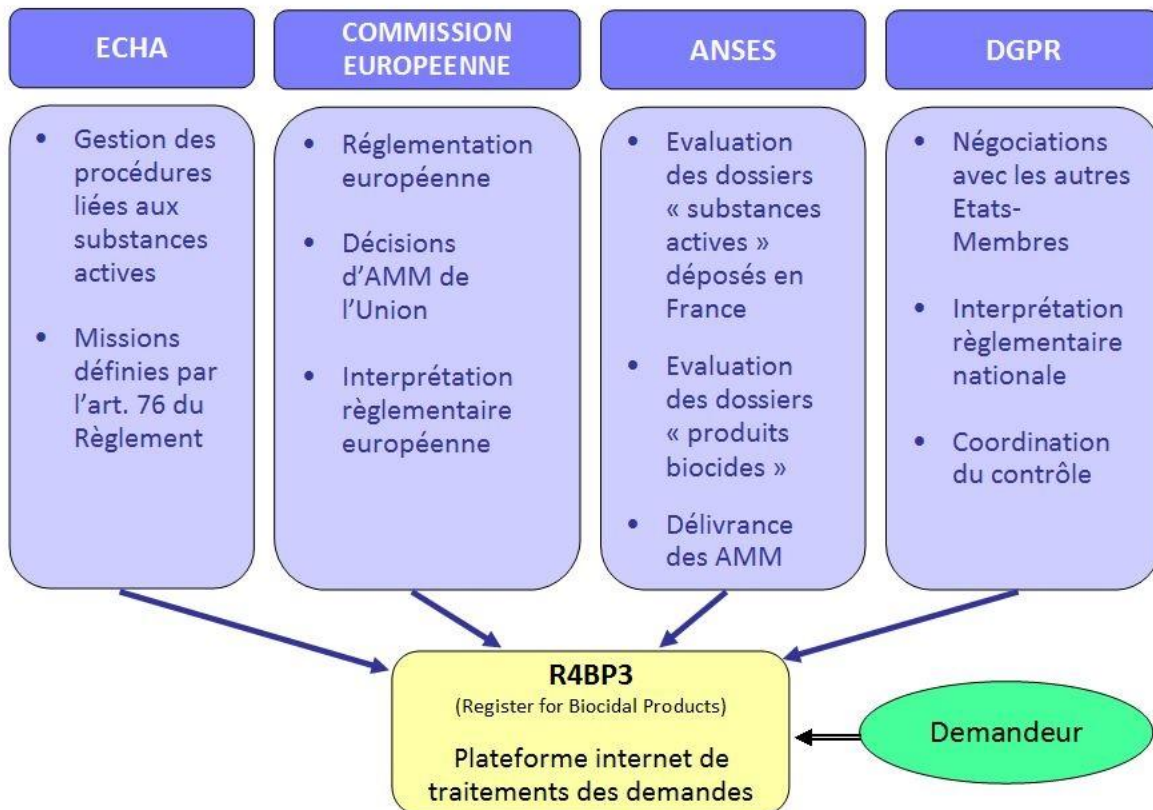
Les procédés de génération *in situ* de produits biocides sont également encadrés par cette réglementation, ainsi que les articles traités incorporant des produits biocides. La figure 38 rappelle le rôle de chaque instance intervenant dans réglementation relative aux produits biocides.

La mise en œuvre réglementaire s’articule en deux étapes :

- **Une évaluation des substances actives biocides** : si les critères réglementaires sont vérifiés au point de vue de l’efficacité et des risques, la substance peut être « approuvée » par la Commission européenne ;
- **Une évaluation des produits** (contenant des substances actives approuvées) qui peut déboucher sur une autorisation nationale (uniquement valable dans le pays qui a délivré cette autorisation) ou de l’Union (valable dans tous les pays de l’Union européenne) de mise à disposition sur le marché, dite "**AMM**".

En France, les AMM sont délivrées par l’Agence nationale de sécurité sanitaire de l’alimentation, de l’environnement et du travail (ANSES) qui procède également à l’évaluation des substances et des produits.

Figure 38 : Rôle des instances pour la réglementation sur les produits biocides



3. RISQUE POUR LE MILIEU NATUREL

3.1. Mécanismes de dégradation et cheminement jusqu'au milieu naturel

3.1.1. Mécanisme de dégradation

La dégradation des peintures (y compris les peintures réfléchissantes et comme tout composé chimique) se traduit par un certain degré de transformation chimique ou biologique (bactéries, algues...), de photo-dégradation via les UV et d'hydrolyse en présence d'eau.

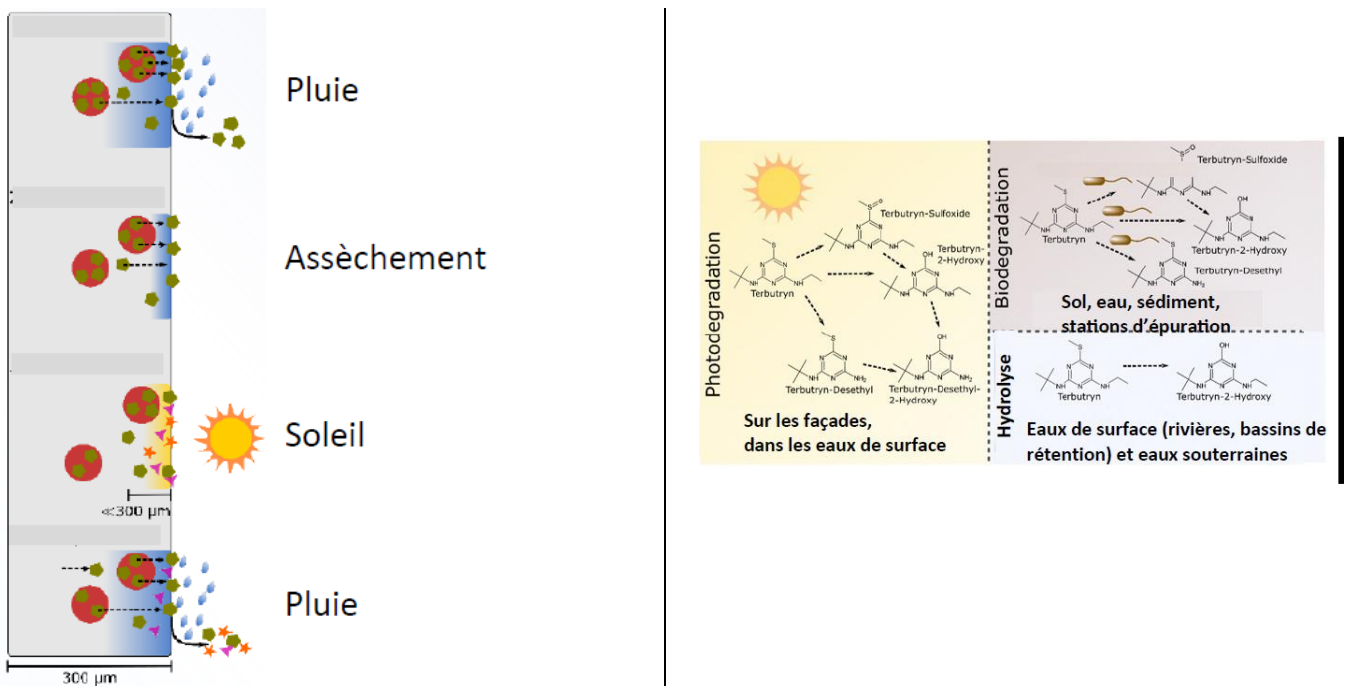
Ces mécanismes peuvent fonctionner de manière synergique et ainsi amplifier la dégradation des peintures et permettre une libération de substances dissoutes ou sous forme de particules plus ou moins grandes.

Les substances peuvent à leur tour subir des transformations chimiques ou biologiques dans les compartiments « aval » ou bien être retenues par certaines barrières (ex. sol).

Le contact de ces substances avec les milieux biologiques peut, à une certaine concentration, altérer la faune et la flore terrestres et aquatiques.

La figure 39 donne les facteurs sollicitant (dans une dynamique cyclique) la dégradation tels que la pluie, l'assèchement des parois, l'effet du rayonnement solaire.

Figure 39 : Facteurs sollicitant la dégradation chimique des peintures



Facteurs sollicitant la dégradation chimique et biologique des peintures.

Exemple de mécanisme pour les biocides : Formation de produits de transformation différents pour un même biocide, souvent inconnus et non analysables.

Toutefois, il est difficile de prédire de manière quantitative les différents mécanismes rencontrés. Cela dépend des conditions du milieu et de la formulation chimique de la peinture considérée.

Précisons que lorsque les polluants sont en contact avec un sol, la pollution particulaire (microplastiques) va être retenue en grande partie par ce sol (filtration mécanique pour les microplastiques de taille allant jusqu'au micromètres), et ainsi limiter le risque pour la faune aquatique. Les molécules sont des perturbateurs endocriniens pour les animaux et modifient également le fonctionnement cellulaire des plantes. Ceci impacte négativement la biodiversité animale et végétale.

Tableau 38 : Effets des mécanismes en fonction du type de pollution

	Particules minérales	Particules organiques	Biocides	Microplastiques
Photo-oxydation	Non	Oui	Oui si organique	Oui
Effet du sol filtration	Faible	Variable	Variable	Oui filtration
Hydrolyse	Faible	Oui	Oui	Faible

En ce qui concerne la filtration par le sol, en complément de l'effet filtrant, les bactéries contenues dans le sol vont dégrader ces pollutions avec des vitesses de dégradation dépendant de la taille des polluants et de leur composition chimique.

3.1.2. Cheminement jusqu'au milieu naturel

À partir des surfaces des bâtiments, les différents polluants vont migrer sous l'effet du ruissellement urbain (eau de pluie) et se retrouver dans les eaux de ruissellement qui vont se retrouver :

1. Directement dans le milieu naturel terrestre ou aquatique après un passage sur la voirie. Cas très fréquent pour les écoulements de façade mais a priori très rare pour les écoulements de toitures où une obligation de collecte des eaux de ruissellement existe.
2. Dans les techniques de gestion décentralisées (parcelle, quartier) des eaux pluviales où la pollution va être collecter dans des bassins de retentions avant de rejoindre le sol naturel ou la nappe souterraine (figure 40 a). Les effluents sont gérés localement à l'échelle de la parcelle ce qui permet de bénéficier de l'effet filtrant du sol selon la taille de l'élément polluant (tableau 38).
3. Dans les réseaux unitaires (composés d'eaux usées et d'eaux pluviales) des réseaux d'assainissement passant par la station d'épuration et se retrouver dans le milieu hydraulique à l'aval des stations d'épuration (figure 40 b). Dans ce cas, les éléments chimiques sont susceptibles d'être fixés sur les boues des stations d'épuration. Ces dernières pouvant être ensuite soit incinérées soit revalorisées en milieu agricole. Ce cheminement « contrôlé » semblerait être celui susceptible de limiter l'impact sur l'environnement.

Les techniques de gestion décentralisées sont généralement constituées de noues enherbées d'infiltration, de bassins d'infiltration multifonctions (gestion des eaux pluviales et activités récréatives à l'échelle du quartier). L'exutoire recherché pour l'eau est l'infiltration dans le sous-sol pour limiter le ruissellement urbain et les inondations.

Figure 40 : Migration dans les systèmes de gestion alternative des eaux pluviales et dans réseaux d'eaux usées

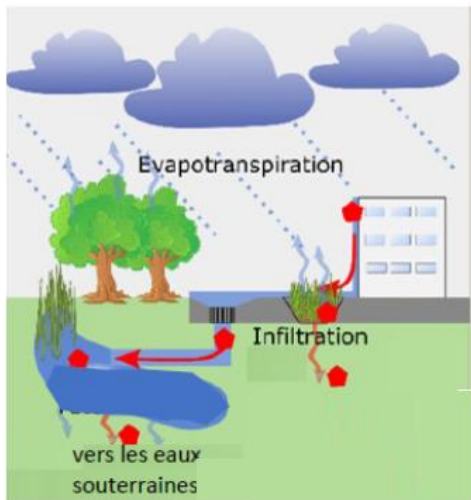


Figure 40 a : Systèmes de gestion alternative des eaux pluviales.

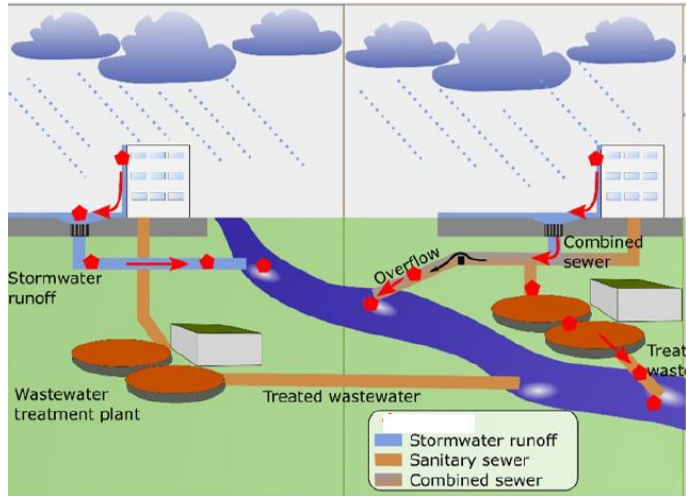
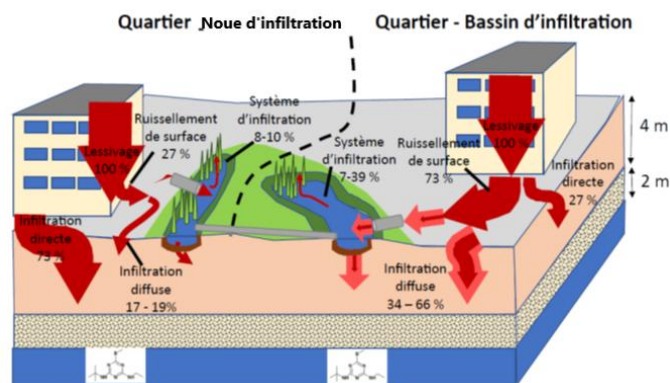


Figure 40 b : Réseaux d'eaux pluviales et réseaux unitaires (eaux usées domestiques et eaux pluviales en mélange).

Il est difficile de prédire le devenir des polluants dans un environnement aussi complexe. On peut, toutefois, mettre en relation les événements pluviométriques avec un éventuel effet sur le milieu naturel pour autant que l'on connaisse le comportement chimique des peintures face à la dégradation. Le comportement chimique et dans une moindre mesure microbiologique (vitesse plus lente) des peintures ne peuvent se déterminer que si l'on détermine de manière expérimentale des constantes de relargage chimique. La figure 41 donne un exemple de répartition de substances.

Figure 41 : Exemple de répartition de flux de pollution dans les techniques de gestion décentralisée des eaux pluviales



Effet de la perforation des peintures réfléchissantes :

L'effet d'une perforation des peintures réfléchissantes est difficilement quantifiable étant donné l'absence d'étude à ce sujet. Cependant au même titre que pour tous types de revêtements, l'abrasion et la perforation des peintures sont susceptibles d'amplifier les phénomènes de relargage.

Dans le cas de composés bicouche (incluant un primaire de fixation), les impacts sanitaires des couches primaires reste globalement les mêmes étant donnée les compositions similaires de ces produits par rapport aux peintures réfléchissantes.

3.2. Méthode d'évaluation

Pour chaque type de produit, il est impératif d'établir des cinétiques de perte de matières (relargages particuliers dans l'eau de ruissellement) dans les conditions :

- De pluviométrie et d'ensoleillement (et de température) ;
- D'encrassement ;
- D'abrasion notamment mécanique.

Les peintures sont caractérisées par les méthodes suivantes :

- Microscopie électronique à balayage (MEB) couplée à une analyse dispersive en énergie (EDX), spectroscopie infrarouge (IRTF) (présence notamment de nanoparticules de TiO₂) ;
- Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) et une analyse thermogravimétrique (ATG) ;
- Une granulométrie laser pour déterminer la taille des particules.

Pour les essais de l'évaluation du relargage de substances dangereuses, on se référera aux essais définis dans les normes NF EN 16 637-1 & 2.

L'évaluation de l'écotoxicité fait appel à l'utilisation de divers bio-essais normalisés ou non. Il concerne les espèces terrestres et aquatiques.

Pour les biocides, ils doivent impérativement respecter les critères sanitaires de mise sur le marché. *Par ailleurs, le CSTB développe une méthode de caractérisation de l'effet des algicides sur les façades.*

4. SYNTHÈSE

En l'état des connaissances scientifiques et des référentiels d'évaluation sanitaire encore trop peu développé que ce soit pour les peintures ou les revêtements plus traditionnels, il est difficile de se prononcer sur l'impact sanitaire relatif des peintures réfléchissantes par rapport à des revêtements courants. En effet, les revêtements courants au même titre que les peintures sont susceptibles de subir des dégradations et de relarguer des composés chimiques... Si on se concentre sur les peintures réfléchissantes, en première analyse, certains additifs sont réputés moins toxiques que d'autres pour le milieu naturel. En particulier, on pourrait préférer les peintures qui ne contiennent pas de dioxyde de titane au profit de celles contenant du carbonate de calcium. Toutefois, il est difficile de se cantonner sur une formulation chimique déclarée par le fabricant. L'approche risque d'être incomplète et il serait préférable de faire un classement à travers des essais de toxicité normalisés et dans une approche comparative avec les peintures traditionnelles pour ne pas pénaliser les peintures réfléchissantes.

Le développement de référentiels d'évaluation apparaît comme une voie nécessaire afin de fournir un cadre de fiabilisation des caractéristiques sanitaires des peintures réfléchissantes. Ce cadre d'évaluation permettrait de rassurer l'ensemble de acteurs quant à l'utilisation des peintures réfléchissantes et accompagner leur mise sur le marché. Au-delà des caractéristiques de réflectivité, ce sont les constantes de relargage des composants chimiques et les compositions (en particulier sur les composants identifiés comme très impactant pour l'environnement) des peintures qui apparaissent comme des caractéristiques importantes à évaluer sur le plan sanitaire.

Par ailleurs, la reconnaissance préalable des dispositifs de cheminement des eaux pluviales vers un milieu naturel avant application apparaît également comme un élément important. Ceci permettra de privilégier les situations les moins impactantes pour l'environnement.

Pour maintenir les performances, l'entretien est un élément clé. Il est donc important de demander aux fabricants d'apporter la preuve de l'efficacité du traitement proposé (réalisme opérationnel, effets non destructurants...) et de son innocuité (concentration en biocides). Ces éléments devraient aussi faire l'objet d'évaluation tiers partie.

RAPPORT

ANNEXE 1 : DONNEES EXTRAITES DE LA BASE OPE

L'annexe 1 détaille les différentes données extraites de la base OPE et à quelles échelles elles sont récupérées. C'est-à-dire, au niveau du bâtiment et au niveau des parois vitrées.

Tableau 39 : Paramètres pertinents à l'échelle du bâtiment

Paramètres	Dénomination sur la base OPE	Unités
Nom des XML	"operations.xml"	-
Zone climatique	"operations.zone_climatique"	-
Altitude du projet	"operations.altitude"	[m]
Usage	"batiments_compl.usage_principal"	-
Catégorie CE1 CE2	"batiments_compl.categorie_ce1_ce2"	-
Surface utile (au sens RT)	"batiments_compl.surt"	[m ²]
Somme des volumes de groupes rattachés à un bâtiment	"batiments_compl.s_volumes_groupes"	[m ³]
Somme des surfaces de planchers hauts	"batiments_compl.surf_tot_toitures"	[m ²]
Somme des surfaces de murs	"batiments_compl.surf_tot_murs"	[m ²]
Somme des surfaces de planchers bas	"batiments_compl.surf_tot_PB"	[m ²]
Besoin bioclimatique	"batiments.bbio_projet"	[point]
Consommation d'énergie primaire	"batiments.cep_projet"	[kWh/m ² .an]

RAPPORT

ANNEXE 2 : RESULTAT D'ECHANTILLONNAGE

Cette annexe décrit la répartition des paramètres influents pour chacun des usages présents dans la base OPE, le but étant de quantifier les valeurs médianes afin de pouvoir sélectionner les cas test moyen pour les usages « Commerce », « Bureau » et « Enseignement ».

Tableau 40 : Statistiques de répartition des paramètres influents selon les usages

Usage	Column	Min	Q1	Médiane	Q3	Max
Restauration	ratio_surf_toiture	0	0,536907	0,602941	0,668259	1
Restauration	ratio_surface_vitree_toiture	0	0	0,004771	0,033678	0,351707
Restauration	ratio_surface_vitree_mur	0	0,353954	0,549204	0,680426	0,887547
Restauration	compacite_s	0,515649	2,611008	2,792281	3,00581	5,417834
Restauration	compacite_v	0,190981	0,708823	0,827865	0,988179	19,91663
Restauration	bâtiments.bbio_projet	9,3	61,1	122,5	193,95	287
Restauration	batiments.cep_projet	-116,4	93,75	215,3	409,5	891
Bureau_ce2	ratio_surf_toiture	0	0,399419	0,491438	0,584697	1
Bureau_ce2	ratio_surface_vitree_toiture	0	0	0	0	0,140056
Bureau_ce2	ratio_surface_vitree_mur	0	0,108486	0,617411	0,740301	0,855517
Bureau_ce2	compacite_s	0,111875	1,531655	2,114383	2,808116	7,578059
Bureau_ce2	compacite_v	0,006283	0,495439	0,717716	1,000055	10,85594
Bureau_ce2	bâtiments.bbio_projet	38,5	96,7	110,5	124,5	453,4
Bureau_ce2	bâtiments.cep_projet	-15170,4	79,3	95	108,8	372,5
Bâtiment hospitaliers	ratio_surf_toiture	0	0,469597	0,547495	0,613115	1
Bâtiment hospitaliers	ratio_surface_vitree_toiture	0	0	0	0	0
Bâtiment hospitaliers	ratio_surface_vitree_mur	0	0	0,176852	0,353896	0,545669
Bâtiment hospitaliers	compacite_s	0,463454	1,894112	2,72614	2,999693	6,620261
Bâtiment hospitaliers	compacite_v	0,007883	0,653701	0,950273	1,125555	5,723881
Bâtiment hospitaliers	bâtiments.bbio_projet	38,9	124,1	151,2	175,8	353,3
Bâtiment hospitaliers	bâtiments.cep_projet	-430,1	111	133,9	159,2	352,2
Hôtels et équivalent	ratio_surf_toiture	0	0,314626	0,41727	0,529351	1
Hôtels et équivalent	ratio_surface_vitree_toiture	0	0	0	0	0,04311
Hôtels et équivalent	ratio_surface_vitree_mur	0	0,359138	0,534524	0,575726	0,611673
Hôtels et équivalent	compacite_s	0,449798	1,256012	1,714777	2,423524	5,772727
Hôtels et équivalent	compacite_v	0,067099	0,458142	0,621274	0,871076	7,727983
Hôtels et équivalent	bâtiments.bbio_projet	20	64,775	81,1	99,8	191,2

RAPPORT

Hôtels et équivalent	bâtiments.cep_projet	-186,6	87,2	112,7	140,3	421,2
Enseignement	ratio_surf_toiture	0	0,484714	0,563218	0,630178	1
Enseignement	ratio_surface_vitree_toiture	0	0,004373	0,009543	0,02136	0,621497
Enseignement	ratio_surface_vitree_mur	0	0,184886	0,246388	0,321941	0,93792
Enseignement	compacite_s	0,328941	1,981204	2,682973	2,962788	5,035552
Enseignement	compacite_v	0,036188	0,62576	0,860524	1,071086	13,55028
Enseignement	bâtiments.bbïo_projet	14,8	47,8	63,2	82,2	445,3
Enseignement	bâtiments.cep_projet	-211,3	52,2	70,4	89,25	463,6
Commerce	ratio_surf_toiture	0	0,51289	0,598103	0,666955	1
Commerce	ratio_surface_vitree_toiture	0	0	0	0	0
Commerce	ratio_surface_vitree_mur	0	0	0	0	0,345388
Commerce	compacite_s	0,487184	2,464397	2,683863	2,991172	7,618605
Commerce	compacite_v	0,031795	0,451386	0,573059	0,818515	7,339029
Commerce	bâtiments.bbïo_projet	2,5	134,4	178,8	214,025	446,2
Commerce	bâtiments.cep_projet	-1026,7	225,4	293,6	382,85	812,7
Autres	ratio_surf_toiture	0	0,456182	0,537746	0,619843	1
Autres	ratio_surface_vitree_toiture	0	0	0	0	0
Autres	ratio_surface_vitree_mur	0	0	0	0	0,504149
Autres	compacite_s	0,295667	2,333137	2,67013	3,034539	10,69866
Autres	compacite_v	0,006832	0,436318	0,604033	0,982501	47,11617
Autres	bâtiments.bbïo_projet	4	77,7	87,8	102,4	368,4
Autres	bâtiments.cep_projet	-3771,1	75,8	97,5	124,8	454,4
Bureau_ce1	ratio_surf_toiture	0	0,422649	0,518225	0,597475	1
Bureau_ce1	ratio_surface_vitree_toiture	0	0	0	0	0,040541
Bureau_ce1	ratio_surface_vitree_mur	0	0	0,232129	0,430624	0,781398
Bureau_ce1	compacite_s	0,178687	1,884337	2,555545	2,970502	8,755274
Bureau_ce1	compacite_v	0,014447	0,637912	0,877853	1,095505	7,720933
Bureau_ce1	bâtiments.bbïo_projet	2,7	63,7	70,7	76,8	493,7
Bureau_ce1	bâtiments.cep_projet	-2431,7	58,8	70	82,3	401,5
Établissements sportifs	ratio_surf_toiture	0	0,494735	0,561222	0,624294	1
Établissements sportifs	ratio_surface_vitrée_toiture	0	0	0	0,010366	0,533246
Établissements sportifs	ratio_surface_vitrée_mur	0	0,351958	0,488206	0,649741	0,874037
Établissements sportifs	compacite_s	0,508531	2,502454	2,824719	3,074825	5,964446

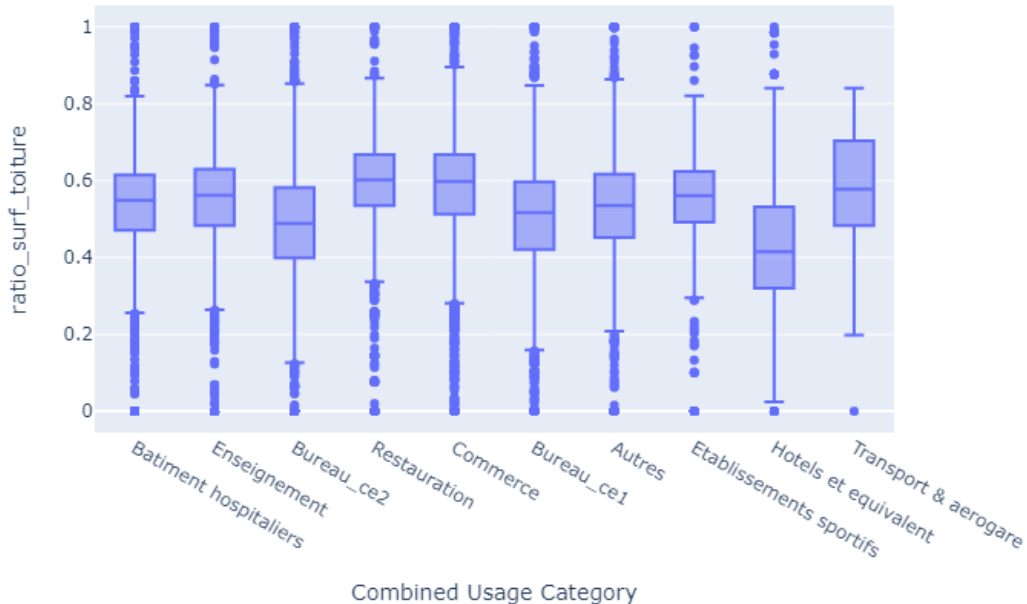
RAPPORT

Établissements sportifs	compacite_v	0,176033	0,454684	0,710741	1,020929	4,718787
Établissements sportifs	bâtiments.bb10_projet	18,1	85,9	108,1	131,8	226,5
Établissements sportifs	bâtiments.cep_projet	-176,1	98,4	138,5	200,8	605,3
Transport & aérogare	ratio_surf_toiture	0	0,486513	0,581394	0,703472	0,841153
Transport & aérogare	ratio_surface_vitrée_toiture	0	0	0	0	0
Transport & aérogare	ratio_surface_vitrée_mur					
Transport & aérogare	compacite_s	1,377251	1,89129	2,391751	2,892825	4,305
Transport & aérogare	compacite_v	0,167903	0,353407	0,635089	1,012836	1,435
Transport & aérogare	bâtiments.bb10_projet	117,9	171,625	208,4	226,9	282,9
Transport & aérogare	bâtiments.cep_projet	84,3	134,7	202,6	251,5	305,1

Des boîtes à moustaches ont été créées pour visualiser la répartition, dans la figure suivante, il y a la répartition du ratio de surface en toiture en fonction des usages.

Répartition de l'indicateur : *ratio_surf_toiture*

Distribution of ratio_surf_toiture by Combined Usage



Commentaire :

Le ratio de surface en toiture représente en moyenne entre 40 % à 60 % de la surface de parois (murs et toitures) des bâtiments. Pour les usages de « Commerces » et « Enseignement », ce ratio est plus élevé et avoisine les 60 % contrairement au bureau où la surface de toiture est moins élevée. Cela peut s'expliquer du fait que les bureaux ont plus d'étages que ces autres usages. En effet, dans le tableau suivant, la proportion de bureau ayant plus de 4 étages est plus importante, ce qui conforte les valeurs du ratio de la boîte à moustache.

RAPPORT

Bureau_ce1	Plus de 4 étages	285	5,43 %
Bureau_ce2	Plus de 4 étages	1398	15,37 %
Commerce	Plus de 4 étages	60	0,97 %
Enseignement	Plus de 4 étages	277	6,08 %

Extrait du tableau suivant :

Tableau 41 : Répartition du nombre de niveau en fonction de l'usage

Usage	Nombre de niveau	Count	%
Autres	1 à 3 étages	3529	73,03 %
Autres	Plain-pied	1162	24,05 %
Autres	Plus de 4 étages	141	2,92 %
Bâtiment hospitaliers	1 à 3 étages	2081	48,40 %
Bâtiment hospitaliers	Plain-pied	1955	45,47 %
Bâtiment hospitaliers	Plus de 4 étages	264	6,14 %
Bureau_ce1	1 à 3 étages	2819	53,71 %
Bureau_ce1	Plain-pied	2145	40,86 %
Bureau_ce1	Plus de 4 étages	285	5,43 %
Bureau_ce2	1 à 3 étages	5027	55,27 %
Bureau_ce2	Plain-pied	2670	29,36 %
Bureau_ce2	Plus de 4 étages	1398	15,37 %
Commerce	1 à 3 étages	5078	82,18 %
Commerce	Plain-pied	1041	16,85 %
Commerce	Plus de 4 étages	60	0,97 %
Enseignement	1 à 3 étages	2602	57,12 %
Enseignement	Plain-pied	1676	36,79 %
Enseignement	Plus de 4 étages	277	6,08 %
Établissements sportifs	1 à 3 étages	816	69,09 %
Établissements sportifs	Plain-pied	308	26,08 %
Établissements sportifs	Plus de 4 étages	57	4,83 %
Hôtels et équivalent	1 à 3 étages	731	52,86 %
Hôtels et équivalent	Plain-pied	372	26,90 %
Hôtels et équivalent	Plus de 4 étages	280	20,25 %

RAPPORT

Restauration	1 à 3 étages	1593	75,64 %
Restauration	Plain-pied	503	23,88 %
Restauration	plus de 4 étages	10	0,47 %
Transport & aérogare	1 à 3 étages	30	66,67 %
Transport & aérogare	Plain-pied	6	13,33 %
Transport & aérogare	Plus de 4 étages	9	20,00 %

Paramètres	Dénomination sur la base OPE	Unités
Nom des XML	"operations.xml"	-
Zone climatique	"opérations. zone climatique"	-
Altitude du projet	"opérations. altitude"	[m]
Usage	"batiments_compl. usage_principal"	-
Catégorie CE1 CE2	"batiments_compl. categorie_ce1_ce2"	-
Surface utile (au sens RT)	"batiments_compl. surt"	[m ²]
Somme des volumes de groupes rattachés à un bâtiment	"bâtiments_compl. s_volumes_groupes"	[m ³]
Somme des surfaces de planchers hauts	"bâtiments_compl. surf_tot_toitures"	[m ²]
Somme des surfaces de murs	"bâtiments_compl. surf_tot_murs"	[m ²]
Somme des surfaces de planchers bas	"bâtiments_compl. surf_tot_PB"	[m ²]
Besoin bioclimatique	"bâtiments. bbio_projet"	[point]
Consommation d'énergie primaire	"bâtiments. cep_projet"	[kWh/m ² .an]

Données au niveau des parois vitrées (toiture et murs)

Tableau 42 : Paramètres pertinents à l'échelle de la paroi vitrée

Définition	Dénomination sur la base OPE	Unités
Type de paroi vitrée	"parois_vitrees.type_pari_vitree"	-
Surface de la paroi vitrée	"parois_vitrees.surface_totale_pv"	[m ²]

Conditions :

- La surface de paroi vitrée en toiture est égale à la somme des surfaces de parois vitrées quand le type de paroi vitrée est égal à Fenêtre de toit (7) et Lanterneaux de toiture (10).
- La surface de paroi vitrée en toiture est égale à la somme des surfaces de parois vitrées quand le type de paroi vitrée est égal à Fenêtre (1), Porte fenêtre (2), Porte d'entrée vitrée (3), Façade rideau vitrée (4), Châssis fixe (5), Bloc baie (6), Brique de verre (8), Vitrine (9).

RAPPORT

ANNEXE 3 : INDICATEURS A L'ECHELLE BATIMENT

Bureau récent

Dernier Etage													
sf_ek													
0,5													
0,25													254,5
0,125										70,3	145,3		272,6
0,075	16,7	17,2	18,4	19,6	21,9	24,6	27,3	34,2	41,9	75,3	152,1		281,5
0,05	17,9	18,5	19,7	20,8	23,6	26,2	29,0	36,4	44,0	78,2	156,2		286,4
0,03	18,9	19,4	20,6	22,1	24,7	27,6	30,4	37,9	45,7	80,7	159,4		290,4
0,02	19,4	20,0	21,5	22,8	25,6	28,3	31,2	38,8	46,8	82,1	161,8		292,8
0,015	19,7	20,4	21,7	23,1	26,0	28,8	31,6	39,4	47,2	83,0	162,7		293,8
0,01	20,0	20,8	22,1	23,5	26,3	29,1	31,9	39,8	47,7	83,6	163,6		294,9
0,005	20,4	21,1	22,4	23,8	26,6	29,5	32,5	40,2	48,2	84,3	164,5		296,0
0,002	20,7	21,4	22,6	24,2	26,9	29,7	32,8	40,5	48,5	84,8	165,0		296,7
0	20,8	21,5	22,8	24,3	27,0	29,8	32,9	40,7	48,6	85,0	165,3		297,1
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk
Besoins de chauffage (kWh/m².an)													
Dernier Etage													
sf_ek													
0,5													
0,25													34,0
0,125										19,1	13,1		11,3
0,075	20,7	20,5	20,1	19,1	18,3	17,5	16,8	15,1	13,8	10,0	6,6		4,7
0,05	14,2	14,0	13,7	13,4	12,6	12,1	11,1	10,0	9,2	6,7	2,8		2,5
0,03	10,4	9,8	9,6	9,3	8,9	8,5	8,2	7,4	6,6	3,7	1,9		1,7
0,02	8,2	8,0	7,8	7,7	7,3	6,9	6,6	6,0	4,3	2,3	1,5		1,4
0,015	7,5	7,4	7,1	6,9	6,6	6,3	6,0	4,3	3,8	2,1	1,3		1,3
0,01	6,7	6,6	6,5	6,3	6,0	5,7	4,6	3,8	3,4	1,8	1,2		1,1
0,005	6,1	6,0	5,9	5,7	4,7	4,3	3,8	3,4	2,4	1,6	1,0		1,0
0,002	5,7	4,9	4,8	4,6	4,2	3,7	3,6	3,2	2,2	1,5	0,9		0,9
0	4,8	4,7	4,6	4,5	4,0	3,6	3,4	3,0	2,1	1,4	0,9		0,9
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk
Besoins de froid (kWh/m².an)													
Dernier Etage													
sf_ek													
0,5													
0,25													2287,0
0,125										1772,2	1345,3		1131,5
0,075	2020,1	1999,0	1958,2	1919,6	1850,1	1785,5	1726,7	1598,6	1488,1	1186,4	891,9		756,9
0,05	1582,7	1566,8	1537,0	1508,1	1452,7	1402,5	1357,5	1255,6	1169,6	925,8	686,8		594,3
0,03	1268,9	1256,4	1232,6	1208,9	1166,1	1126,9	1089,8	1004,7	933,5	731,2	541,1		474,2
0,02	1122,2	1110,4	1089,5	1070,0	1032,2	996,1	961,0	885,9	820,3	641,8	470,2		417,5
0,015	1051,0	1040,7	1021,7	1003,0	966,3	931,2	899,2	827,7	766,6	597,9	436,9		391,5
0,01	982,7	973,3	954,9	936,6	901,9	868,7	838,4	770,8	713,3	554,1	403,3		368,4
0,005	915,6	906,5	888,7	871,6	838,0	807,5	779,2	716,8	663,9	514,6	369,9		396,1
0,002	875,6	866,9	849,7	833,1	801,0	772,0	744,6	685,9	635,4	490,2	353,0		390,4
0	849,4	840,8	823,9	807,9	777,1	748,7	722,6	665,3	616,6	474,2	488,6		387,5
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk
DH (degrés-heures)													

RAPPORT

Bureau ancien

Dernier Etage													
sf_ek													
0,5													
0,25													275,4
0,125							42,1	49,4	57,2	90,4	166,1	292,7	
0,075	33,4	34,0	35,5	36,8	39,6	42,5	45,4	52,9	60,9	95,6	173,0	301,2	
0,05	35,0	35,7	37,0	38,4	41,4	44,3	47,3	55,2	63,3	98,4	176,7	305,9	
0,03	36,2	37,0	38,5	39,9	42,8	45,8	48,8	56,8	65,1	100,7	179,8	309,6	
0,02	37,1	37,9	39,3	40,7	43,7	46,7	49,7	57,8	66,2	102,1	181,7	311,8	
0,015	37,5	38,2	39,7	41,1	44,1	47,1	50,1	58,2	66,7	102,7	182,5	312,8	
0,01	37,9	38,6	40,0	41,4	44,5	47,5	50,5	58,8	67,4	103,3	183,3	313,8	
0,005	38,2	38,9	40,4	41,8	44,9	47,9	51,2	59,4	67,9	103,9	184,1	314,8	
0,002	38,5	39,2	40,6	42,2	45,1	48,2	51,5	59,7	68,2	104,3	184,7	315,5	
0	38,6	39,3	40,7	42,3	45,3	48,3	51,7	59,8	68,4	104,6	185,0	315,9	
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk
Besoins de chauffage (kWh/m².an)													
Dernier Etage													
sf_ek													
0,5													
0,25													37,3
0,125							30,4	28,6	27,2	21,5	16,3	13,7	
0,075	20,9	20,7	20,4	20,1	19,4	18,8	18,0	16,8	15,7	11,6	8,7	7,4	
0,05	15,4	15,0	14,7	14,4	13,9	13,5	12,5	11,5	10,8	8,5	5,6	4,4	
0,03	11,1	11,0	10,8	10,6	10,2	9,9	9,6	8,9	8,3	5,9	2,8	2,6	
0,02	9,4	9,3	9,2	9,0	8,7	8,4	8,2	7,2	7,0	4,1	2,3	2,1	
0,015	8,8	8,7	8,5	8,4	8,1	7,9	7,6	6,4	6,2	3,0	2,1	1,9	
0,01	8,1	8,1	7,9	7,8	7,5	7,1	6,7	6,5	5,5	2,7	1,9	1,8	
0,005	7,6	7,5	7,3	7,2	6,8	6,1	5,9	5,7	5,0	2,5	1,7	1,6	
0,002	7,2	7,1	7,0	6,6	6,3	5,8	5,6	5,3	4,0	2,3	1,6	1,5	
0	7,0	6,9	6,8	6,3	5,8	5,6	5,4	4,2	3,6	2,2	1,6	1,5	
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk
Besoins de froid (kWh/m².an)													
Dernier Etage													
sf_ek													
0,5													
0,25													2322,6
0,125							2281,7	2158,4	2049,0	1726,2	1383,8	1196,2	
0,075	1783,8	1771,6	1746,5	1723,3	1678,9	1636,1	1595,4	1504,5	1428,9	1194,8	950,5	829,6	
0,05	1439,2	1429,5	1409,0	1389,4	1352,9	1319,2	1286,7	1213,0	1149,4	955,8	754,0	665,1	
0,03	1185,9	1178,0	1162,0	1146,1	1114,7	1085,3	1057,7	995,1	941,1	776,5	610,2	549,8	
0,02	1066,3	1058,6	1043,2	1029,0	999,6	973,5	948,8	892,1	842,1	691,7	544,5	495,3	
0,015	1007,2	1000,0	986,1	971,5	944,1	919,2	895,6	841,3	794,2	651,4	513,0	467,0	
0,01	949,7	943,7	928,9	914,7	890,2	866,4	842,9	791,4	746,9	611,7	481,9	441,8	
0,005	893,4	886,3	872,7	860,5	836,4	813,5	791,0	743,0	700,8	573,3	450,8	415,8	
0,002	859,7	853,1	840,3	828,3	805,2	782,2	760,5	714,5	674,3	550,4	432,3	402,2	
0	837,4	830,9	818,9	806,8	784,0	761,6	740,6	696,5	657,1	536,6	420,5	392,9	
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk
DH (degrés-heures)													

RAPPORT

Commerce récent

sf_ek													uk			
0,5																
0,25													485,0			
0,125													51,8	117,4	269,9	514,9
0,075	10,4	11,3	13,0	15,2	19,5	23,8	28,7	42,5	57,4	125,7	281,3	529,7				
0,05	11,6	12,6	14,7	17,0	21,2	26,0	31,5	45,6	60,9	130,8	288,0	538,0				
0,03	12,6	13,9	16,3	18,3	23,0	28,3	33,6	48,2	64,0	134,8	293,4	544,6				
0,02	13,7	15,0	17,0	19,2	24,3	29,6	35,0	49,7	65,9	137,3	296,7	548,7				
0,015	14,1	15,3	17,4	19,6	24,9	30,1	35,6	50,4	66,7	138,5	298,2	550,4				
0,01	14,6	15,6	17,8	20,0	25,4	30,6	36,2	51,1	67,5	139,9	299,7	552,2				
0,005	15,0	16,0	18,2	20,6	25,8	31,1	36,8	51,8	68,4	141,1	301,2	554,0				
0,002	15,2	16,2	18,4	20,9	26,2	31,7	37,2	52,3	69,0	141,9	302,3	555,2				
0	15,3	16,4	18,6	21,0	26,3	31,9	37,4	52,8	69,3	142,3	302,8	555,8				
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk			
Besoins de chauffage (kWh/m².an)																

sf_ek													uk			
0,5																
0,25													56,2			
0,125													54,9	39,9	28,6	22,7
0,075	52,9	51,8	49,6	47,9	44,2	41,2	38,8	35,3	32,1	23,5	16,6	13,4				
0,05	38,0	37,2	35,6	33,8	31,6	29,6	28,7	25,9	23,5	17,0	11,4	9,3				
0,03	28,6	27,9	26,5	25,6	23,9	23,1	21,9	19,5	18,0	12,4	8,0	7,2				
0,02	23,7	23,1	22,2	21,5	20,6	19,6	17,9	16,2	14,5	10,3	6,7	6,0				
0,015	21,6	21,3	20,6	19,6	19,2	17,8	16,7	15,1	13,6	9,1	6,2	5,6				
0,01	20,1	19,7	18,7	18,3	17,4	16,6	15,5	13,7	12,7	8,4	5,4	4,9				
0,005	18,2	18,0	17,5	17,0	16,2	15,0	14,1	12,7	11,5	7,7	5,0	4,6				
0,002	17,3	17,1	16,7	15,9	15,1	14,3	13,4	12,0	10,9	7,2	4,8	4,5				
0	16,9	16,7	15,9	15,5	14,7	13,7	13,0	11,5	10,5	7,0	4,6	4,4				
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk			
Besoins de froid (kWh/m².an)																

sf_ek													uk			
0,5																
0,25													6067,4			
0,125													8789,7	6038,4	4016,8	2916,8
0,075	10398,2	10200,6	9819,1	9453,4	8773,3	8161,8	7613,4	6503,3	5692,0	3921,4	2599,5	1938,3				
0,05	8048,7	7877,6	7548,6	7239,7	6679,7	6188,6	5765,2	4931,0	4336,1	3004,7	1996,8	1536,4				
0,03	6216,2	6075,0	5809,0	5563,3	5122,7	4751,3	4430,2	3806,2	3374,9	2352,5	1576,6	1267,1				
0,02	5351,2	5227,6	4995,0	4782,3	4409,7	4097,1	3827,0	3306,1	2937,9	2048,1	1393,6	1148,4				
0,015	4934,9	4820,7	4606,6	4414,2	4077,2	3791,2	3544,4	3073,7	2733,2	1904,8	1309,1	1093,1				
0,01	4532,4	4428,3	4235,1	4063,3	3759,1	3498,8	3277,9	2857,8	2532,8	1766,7	1228,8	1040,4				
0,005	4149,4	4057,0	3890,9	3732,5	3457,1	3223,4	3022,7	2642,4	2336,2	1635,9	1152,0	990,0				
0,002	3932,6	3848,8	3687,6	3541,1	3282,4	3061,7	2877,3	2517,0	2224,1	1561,1	1108,0	960,8				
0	3794,3	3712,2	3559,4	3416,6	3170,9	2959,4	2781,1	2432,7	2149,9	1513,7	1080,4	942,0				
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk			
DH (degrés-heures)																

RAPPORT

Commerce ancien

sf_ek													
0,5													
0,25													584,3
0,125	71,1	72,8	75,9	79,1	85,4	91,9	98,6	115,9	133,7	208,7	366,5	615,5	
0,075	77,1	78,7	82,0	85,3	91,9	98,9	105,8	123,7	141,8	218,3	378,6	630,5	
0,05	80,8	82,4	85,7	89,1	96,1	103,0	110,1	128,2	146,6	224,0	385,6	638,9	
0,03	83,8	85,5	89,0	92,5	99,4	106,4	113,8	131,9	151,0	228,5	391,3	645,6	
0,02	85,8	87,5	91,0	94,4	101,4	108,5	115,9	134,2	153,4	231,3	394,7	649,7	
0,015	86,7	88,4	91,9	95,3	102,3	109,5	116,8	135,2	154,4	232,5	396,3	651,5	
0,01	87,5	89,2	92,7	96,2	103,3	110,4	117,8	136,2	155,5	233,8	397,8	653,3	
0,005	88,4	90,1	93,6	97,1	104,2	111,4	118,8	137,3	156,6	235,1	399,4	655,1	
0,002	89,0	90,7	94,2	97,8	104,8	112,0	119,5	138,0	157,4	236,0	400,4	656,3	
0	89,3	91,1	94,6	98,1	105,2	112,3	119,8	138,3	157,8	236,5	401,0	656,9	
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk
Besoins de chauffage (kWh/m².an)													
sf_ek													
0,5													
0,25													57,4
0,125	57,2	57,2	56,3	55,9	54,2	52,4	50,8	47,1	44,5	37,3	29,3	24,7	
0,075	35,6	35,2	34,3	33,7	32,7	31,6	30,7	28,9	27,5	22,6	18,3	15,3	
0,05	26,5	26,2	25,8	25,1	24,2	23,3	22,8	21,3	20,2	16,8	13,0	11,0	
0,03	20,3	20,1	19,7	19,4	18,8	18,3	17,8	16,7	15,6	12,6	9,6	8,8	
0,02	17,5	17,3	17,0	16,8	16,0	15,1	14,7	14,0	13,3	10,6	8,1	7,7	
0,015	16,4	16,2	15,7	15,4	14,5	14,1	13,8	12,8	12,2	9,2	7,5	7,0	
0,01	14,6	14,5	14,2	14,0	13,6	13,2	12,9	12,0	11,3	8,6	7,0	6,6	
0,005	13,6	13,5	13,3	13,1	12,5	12,1	11,9	11,0	10,4	7,9	6,6	6,3	
0,002	13,0	12,9	12,7	12,2	11,9	11,6	11,3	10,4	9,4	7,5	6,0	6,0	
0	12,7	12,6	12,1	11,9	11,6	11,3	10,9	10,2	9,1	7,3	5,8	5,9	
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk
Besoins de froid (kWh/m².an)													
sf_ek													
0,5													
0,25													6167,0
0,125	9337,3	9246,4	9073,0	8917,4	8600,9	8314,9	8049,4	7468,5	6986,6	5626,3	4218,3	3183,2	
0,075	6550,2	6486,7	6357,0	6235,1	6010,3	5806,5	5614,7	5195,6	4843,0	3874,0	2897,0	2228,4	
0,05	5246,6	5192,4	5092,5	4994,4	4813,4	4647,7	4490,8	4148,2	3872,9	3094,2	2320,0	1816,9	
0,03	4272,3	4228,2	4144,2	4067,6	3923,0	3786,6	3658,6	3388,0	3163,6	2525,8	1905,5	1531,6	
0,02	3816,4	3779,3	3707,9	3639,6	3507,5	3384,3	3268,0	3032,4	2827,5	2258,4	1715,0	1402,2	
0,015	3599,7	3565,0	3498,0	3432,5	3307,1	3189,0	3083,9	2862,1	2666,8	2128,5	1625,5	1341,3	
0,01	3388,8	3356,4	3292,6	3229,7	3110,6	3000,4	2905,6	2695,9	2513,6	2003,0	1539,5	1283,0	
0,005	3183,8	3152,7	3091,6	3032,0	2920,6	2820,1	2732,1	2533,4	2362,6	1884,1	1457,5	1227,1	
0,002	3062,9	3033,1	2974,3	2916,8	2811,1	2715,1	2630,2	2439,0	2273,9	1814,0	1410,4	1195,1	
0	2983,7	2955,2	2896,9	2841,1	2738,3	2645,3	2562,6	2376,8	2214,6	1768,3	1379,5	1174,3	
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk
DH (degrés-heures)													

RAPPORT

Enseignement récent

sf_ek													uk			
0,5																
0,25													106,7	210,7		
0,125													29,3	57,2	121,4	227,9
0,075	10,8	11,9	13,1	15,3	17,8	20,2	26,5	33,2	62,4	128,8	236,0					
0,05	11,5	12,1	13,3	14,4	17,0	19,4	21,9	28,5	35,4	65,7	133,1	240,5				
0,03	12,6	13,2	14,5	15,7	18,2	20,8	23,5	30,2	37,2	68,6	136,3	244,0				
0,02	13,3	14,0	15,2	16,5	19,0	21,7	24,4	31,3	38,3	70,2	138,3	246,2				
0,015	13,7	14,3	15,5	16,8	19,3	22,1	24,7	31,7	38,8	70,9	139,2	247,1				
0,01	14,0	14,6	15,9	17,1	19,8	22,5	25,1	32,2	39,3	71,9	140,1	248,0				
0,005	14,3	14,9	16,2	17,5	20,3	22,9	25,5	32,6	39,8	72,6	141,0	249,0				
0,002	14,5	15,2	16,4	17,7	20,5	23,2	25,8	32,9	40,2	73,1	141,6	249,6				
0	14,6	15,3	16,5	17,8	20,6	23,3	26,0	33,1	40,4	73,5	141,9	250,0				
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk			
Besoins de chauffage (kWh/m².an)																
sf_ek													uk			
0,5																
0,25													36,3	24,4		
0,125													30,7	19,6	9,1	4,7
0,075	33,9	32,6	31,0	27,8	25,5	23,8	19,8	17,0	9,3	2,4	1,6					
0,05	24,0	23,0	22,1	21,2	19,7	18,2	16,6	13,9	11,5	6,2	1,4	0,9				
0,03	17,8	17,5	16,7	15,7	14,5	13,4	12,3	9,6	8,2	2,1	0,8	0,6				
0,02	14,6	14,3	13,6	13,0	11,9	10,6	9,5	8,0	6,2	1,6	0,6	0,4				
0,015	13,4	13,1	12,5	12,0	10,6	9,7	8,7	6,9	5,4	1,4	0,5	0,3				
0,01	12,3	12,0	11,5	10,6	9,7	8,6	7,9	6,2	3,6	1,2	0,4	0,3				
0,005	11,2	10,9	10,1	9,6	8,6	7,8	7,1	4,2	2,9	1,0	0,4	0,2				
0,002	10,1	9,9	9,5	9,0	8,0	7,2	6,4	3,9	2,3	0,9	0,3	0,2				
0	9,8	9,6	9,2	8,7	7,7	7,0	6,1	3,7	1,9	0,9	0,3	0,2				
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk			
Besoins de froid (kWh/m².an)																
sf_ek													uk			
0,5																
0,25													2120,4	1469,0		
0,125													2612,0	1634,7	943,7	654,4
0,075	2963,5	2836,0	2719,7	2508,5	2324,8	2159,1	1822,3	1575,2	1020,5	582,6	415,1					
0,05	2179,7	2132,2	2043,2	1959,8	1809,4	1679,3	1562,2	1332,2	1162,3	760,3	433,3	318,4				
0,03	1595,0	1561,7	1499,6	1439,5	1332,7	1242,3	1164,0	1002,5	880,0	574,1	335,2	255,6				
0,02	1339,6	1312,2	1260,0	1211,5	1127,9	1055,8	990,6	855,9	753,5	492,2	292,1	226,8				
0,015	1220,9	1196,1	1150,5	1109,4	1035,3	968,4	907,2	786,0	692,4	453,9	271,1	211,9				
0,01	1110,3	1089,5	1049,8	1012,9	944,8	882,9	829,9	719,0	632,9	416,8	250,2	197,6				
0,005	1009,0	989,7	953,4	919,8	856,9	801,8	755,7	654,3	576,2	381,3	230,9	183,2				
0,002	948,7	930,7	897,1	864,8	806,6	756,9	711,0	617,0	544,4	359,3	219,6	175,4				
0	909,6	892,5	860,0	829,3	773,5	727,1	683,7	592,3	524,1	346,9	212,8	170,6				
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk			
DH (degrés-heures)																

RAPPORT

Enseignement ancien

sf_ek																	
0,5																	
0,25													226,5				
0,125													35,2	41,5	70,3	135,6	242,7
0,075	21,6	22,2	23,3	24,6	27,1	29,5	32,2	38,6	45,4	75,4	142,5	250,2					
0,05	23,2	23,8	25,1	26,3	28,8	31,5	34,0	40,7	47,6	78,6	146,2	254,3					
0,03	24,5	25,1	26,4	27,6	30,1	32,9	35,4	42,4	49,3	81,0	149,2	257,6					
0,02	25,3	25,9	27,1	28,4	31,2	33,7	36,5	43,4	50,7	83,0	151,1	259,6					
0,015	25,6	26,2	27,5	28,7	31,5	34,1	36,9	43,8	51,3	83,6	151,9	260,4					
0,01	25,9	26,6	27,8	29,1	31,9	34,6	37,3	44,2	52,0	84,3	152,6	261,3					
0,005	26,3	26,9	28,2	29,7	32,3	35,0	37,7	44,7	52,5	84,9	153,4	262,2					
0,002	26,5	27,2	28,4	29,9	32,5	35,2	38,0	45,0	52,9	85,4	154,0	262,7					
0	26,6	27,3	28,5	30,1	32,6	35,4	38,2	45,2	53,2	85,6	154,2	263,0					
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk				
Besoins de chauffage (kWh/m².an)																	
sf_ek																	
0,5																	
0,25													31,0				
0,125													38,0	34,5	23,9	13,5	7,0
0,075	34,2	33,7	32,8	31,4	29,8	28,2	26,8	23,2	20,7	13,4	5,1	2,8					
0,05	25,8	25,4	24,6	23,9	22,5	20,9	19,7	17,3	14,5	8,9	2,5	1,8					
0,03	20,1	19,7	19,1	18,5	17,4	16,4	15,5	12,9	11,3	6,3	1,7	1,2					
0,02	17,3	17,0	16,5	16,0	15,0	13,6	12,7	11,0	9,0	4,7	1,4	1,0					
0,015	16,2	15,9	15,4	14,9	13,6	12,6	11,9	10,0	8,5	2,7	1,2	0,9					
0,01	15,2	14,9	14,4	13,5	12,5	11,8	11,1	9,3	7,5	2,4	1,1	0,8					
0,005	14,2	13,9	13,0	12,6	11,7	11,0	10,3	8,3	6,8	2,1	1,0	0,7					
0,002	13,0	12,8	12,4	11,9	11,1	10,5	9,6	7,9	6,5	2,0	0,9	0,7					
0	12,7	12,5	11,9	11,6	10,9	10,2	9,3	7,7	6,0	1,9	0,8	0,6					
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk				
Besoins de froid (kWh/m².an)																	
sf_ek																	
0,5																	
0,25													1592,3				
0,125													2749,8	2432,6	1672,7	1048,7	764,6
0,075	2640,0	2596,2	2512,0	2432,4	2286,2	2153,6	2034,9	1789,7	1597,0	1116,7	689,9	509,8					
0,05	2018,4	1985,4	1923,0	1863,7	1755,8	1658,8	1572,6	1390,0	1250,9	872,0	537,4	403,8					
0,03	1584,8	1560,0	1512,6	1468,8	1387,2	1313,8	1248,2	1113,4	999,0	694,8	429,1	329,9					
0,02	1389,1	1368,0	1328,4	1290,3	1220,9	1157,9	1100,8	983,8	880,8	612,8	382,1	297,3					
0,015	1297,7	1278,5	1241,8	1207,3	1142,4	1084,0	1031,0	920,2	825,4	573,1	359,6	281,8					
0,01	1210,2	1192,5	1158,9	1126,2	1066,1	1011,7	965,5	859,8	771,2	535,7	337,5	267,5					
0,005	1126,3	1109,8	1078,0	1048,0	992,6	944,6	902,1	800,1	718,3	499,4	317,3	253,1					
0,002	1076,7	1061,0	1030,9	1002,1	949,4	903,1	862,2	765,6	687,6	478,6	306,2	244,9					
0	1044,6	1029,4	999,9	972,8	922,3	876,3	836,3	743,1	668,0	465,2	298,8	239,4					
	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	4	7	uk				
DH (degrés-heures)																	

ANNEXE 4 : DETAIL DE LA METHODE D'INTERPOLATION BI-LINEAIRE

Les cartographies à l'échelle bâtiment sont des tableaux à double-entrées. Il est possible d'interpoler bi-linéairement entre les valeurs calculées dans le tableau.

En considérant que la cartographie est une fonction a deux variables d'entrées (le coefficient U et le facteur solaire S) et une sortie (par exemple le DH), on peut écrire cela sous la forme d'une fonction f tel que $DH = f(U, S)$.

Pour simplifier généraliser la notation, on souhaite connaitre la valeur de la fonction f évaluée en x_1 et x_2 (U et S ici).

Le tableau nous donne des valeurs discrètes et on peut identifier que :

- x_1 est compris entre x_{1a} et x_{1b}
- x_2 est compris x_{2a} et x_{2b}

En évaluant f en chacune de ces combinaisons de point (connus dans le tableau, on peut interpoler et obtenir la valeur inconnue à évaluer en (x_1, x_2) .

Il faut calculer les poids w_i :

- $w_1 = (x_{1b} - x_1) (x_{2b} - x_2)$
- $w_2 = (x_1 - x_{1a}) (x_{2b} - x_2)$
- $w_3 = (x_{1b} - x_1) (x_2 - x_{2a})$
- $w_4 = (x_1 - x_{1a}) (x_2 - x_{2a})$

La valeur inconnue à évaluer se calcule comme :

$$f(x_1, x_2) = \frac{w_1 \cdot f(x_{1a}, x_{2a}) + w_2 \cdot f(x_{1b}, x_{2a}) + w_3 \cdot f(x_{1a}, x_{2b}) + w_4 \cdot f(x_{1b}, x_{2b})}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4}$$

Pour des interpolations linéaires simples suivant une seule des entrées, par exemple x_1 (x_2 étant fixé sur une valeur déjà existante du tableau) :

$$f(x_1, x_{2_{fixé}}) = f(x_{1a}, x_{2_{fixé}}) + [f(x_{1b}, x_{2_{fixé}}) - f(x_{1a}, x_{2_{fixé}})] \cdot \frac{x_1 - x_{1a}}{x_{1b} - x_{1a}}$$

• APTITUDE À L'EMPLOI

[0] : Dongdong Tian, Jianshun Zhang, Zhi Gao « The advancement of research in cool roof : Super cool roof, temperature-adaptive roof and crucial issues of application in cities », 15 juillet 2023.

• IMPACT ÉNERGÉTIQUE

[1] Données sur les consommations d'énergie du secteur tertiaire / Quelques précisions sur l'élaboration des données - ceren – décembre 2020

[2] Climat Air et Energie – Chiffres-clés– ADEME - édition 2018

[3] BDNB La Base de Données Nationale des Bâtiments – CSTB - [La Base de Données Nationale des Bâtiments \(bdnb.eu\)](http://bdnb.eu)

[4] Méthode de calcul Th-BCE pour la RT2012 – CSTB – Annexe à l'arrêté du 30 Avril 2013 portant approbation de la méthode calcul RT2012.

[5] Typologie des immeubles de bureaux – rapport CSTB – 1994

[6] Cahier du CSTB n°2284 - exemples de solutions pour faciliter l'application du règlement relatif aux équipements et aux caractéristiques thermiques dans les bâtiments autres que d'habitation : Isolation thermique – CSTB/ADEME – octobre 1988

• IMPACT ÉCONOMIQUE

[7] Chen J., Lu. L, Gong Q., Lau W. Y. et K. H. Cheung, 2021, « Techno-economic and environmental performance assessment of radiative sky cooling-based super-cool roof applications in China”, *Energy Conversion and Management*, 245.

[8] Rawat M. et R. N. Singh, 2022, « Techno-economic analysis of cool roof materials in a composite climatic zone”, *Materials Today: Proceedings*, 52, 1406 – 1410.

[9] Abdalazeem M., Hassan H., Asawa T. et H. Mahmoud, 2024, “Enhancing energy efficiency in hot climate buildings through integrated photovoltaic panels and green roofs : an experimental study”, *Solar Energy*, vol.270, 17 pages.
ADEME, CODA Stratégies, 2021, *La climatisation de confort dans les bâtiments résidentiels et tertiaires – état des lieux 2020 – Synthèse*, 13 pages.

[10] Roudier-Valaud C, 2023, “La température intérieure a baissé de 6 à 8°C : ces entreprises loirétaines qui peignent leur toit en blanc contre les fortes chaleurs », *La République du Centre*, 7 août 2023.

[11] Ploye F., 2024, “Cool roofing : une technique séduisante à manier avec précaution », *Qualité Construction*, Janvier – Février 2024, n°202.

[12] Arnaud B., Parrouffe J.-M., Louillat S., Haeusler L., Toe S. et C. Elmoujarrade, 2022, *Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France*, Edition 2022, ADEME, 140 pages.

[13] Ziogou I., Michopoulos A., Voulgari V. et T. Zachariadis, 2017, “Energy, environmental and economic assessment of electricity savings from the operation of green roofs in urban office buildings of a warm Mediterranean region”, *Journal of Cleaner Production*, 168, 346 – 356.

[14] Dehnhardt A., Grothmann T. et J. Wagner, 2022, “Cost-benefit analysis: What limits its use in policy making and how to make it more usable? A case study on climate change adaptation in Germany.”, *Environmental Science and Policy*, vol. 137, 53 – 60.

[15] Teotonio I., Matos Silva C. et C. Oliveira Cruz, 2018, « Eco-solutions for urban environments regeneration : the economic value of green roofs”, *Journal of Cleaner Production*, vol.199, 121 – 135.

[16] Hekrlé M., Liberalesso T., Mach J. et C. Matos Silva, 2023, “The economic value of green roofs : A case study using different cost–benefit analysis approaches”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 413, 10 pages.

[17] Lang T., Amman D. et B. Girod, 2016, « Profitability in absence of subsidies : a techno-economic analysis of rooftop photovoltaicself-consumption in residential and commercial buildings”, *Renewable Energy*, vol. 87, 77 – 87.

[18] Cucchiella F., Rotilio M., Capannolo L. et P. De Berardinis, 2023, « Technical, economic and environmental assessment towards the sustainable goals of photovoltaic systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 188, 20 pages.

[19] Saez R., Boer D., Shobo A. B. et M. Vallès, 2023, « Techno-economic analysis of residential rooftop photovoltaics in Spain”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 188, 16 pages.

• IMPACT SANITAIRE

[20] Kasumba A. Buyondo, Hillary KaseddeJohn B. Kirabira « A comprehensive review on kaolin as pigment for paint and coating: Recent trends of chemical-based paints, their environmental impacts and regulation », Decembre 2022.

[21] Ensieh Poshtkoughian Bavi, Soodabeh Nouri Jouybari, Farimah Mousavi « A rapid method for producing highly diffuse reflective white paint as the back surface reflector in dye-sensitized solar cell», 4 juillet 2022.