ANEMOS TECHNOLOGIES · NOTE MÉTHODOLOGIQUE

Peintures réfléchissantes en toiture

Méthode, hypothèses et résultats du simulateur CoolRoof ROI

Document de travail pour une lecture croisée avec le rapport du CSTB
« Étude d'impact des peintures réfléchissantes… » (DHUP, 25 juin 2024)

Version 1.1 — 1er octobre 2026
Auteur : Philippe Crochat, Anemos Technologies (pcrochat@anemos-technologies.com)
Simulateur : coolroof.anemos-technologies.com (moteur de calcul v3, septembre 2026)

Objet du document

Exposer de façon vérifiable comment le simulateur CoolRoof ROI calcule le bilan d'une peinture réfléchissante en toiture, d'où vient chaque chiffre, ce qu'il reprend du rapport du CSTB et où il s'en écarte. Il répond aussi à deux questions posées lors d'une première relecture : **(1) le traitement de la pollution potentielle des eaux pluviales** et **(2) le positionnement en prix au m² d'une solution saisonnière par rapport au procédé traditionnel (peinture permanente)**.

Statut des chiffres. Chaque valeur est classée : *source* (publiée, avec référence et page), *dérivée* (calculée à partir de sources, calcul donné), *hypothèse* (non encore mesurée) ou *tarif* (prix Anemos). La solution saisonnière Anemos est **en développement** : ses performances et son prix sont des hypothèses et un objectif, pas des résultats mesurés.

Indépendance. Anemos commercialise une solution saisonnière et applique des peintures permanentes. Le moteur est calé sur les simulations publiées du CSTB précisément pour ne pas dépendre de chiffres de fabricants, Anemos compris. Les tableaux couvrent aussi les configurations défavorables. Les hypothèses propres au badigeon saisonnier (réflectance, durée de couverture de l'été, lessivage avant l'hiver) restent **à valider sur le terrain** : leur sensibilité est donnée en § 6.7.

Sommaire

1. Synthèse et réponses aux deux questions
2. Ce que dit le rapport du CSTB (points clés, avec pages)
3. Méthode du simulateur
4. Validation : reproduction des résultats du CSTB
5. Hypothèses et sources
6. Résultats
7. Question 1 — Prix au m² : saisonnier ou permanent
8. Question 2 — Eaux pluviales
9. Écarts avec le CSTB et questions ouvertes
10. Limites et programme de validation
Références

1. Synthèse

Ce que montrent les calculs

- **Le calcul confirme la conclusion économique du CSTB pour la peinture permanente au prix du marché.** Avec les hypothèses économiques du rapport (25 €/m², 8 ans, nettoyage annuel 1 €/m², 0,2047 €/kWh, actualisation 3,51 %, 30 ans), la valeur actuelle nette (VAN) est négative dans **toutes** les configurations simulées, y compris un commerce de 1 000 m² en zone H3, toiture sombre et faiblement isolée (−79 708 €).
- **Le moteur reproduit les VAN du CSTB à 3–4 % près** lorsqu'on adopte ses conventions (pas d'encrassement, froid valorisé comme dans le rapport) : par exemple −60 177 € contre −62 184 € (tableau 26, commerce ancien H3).
- **La pénalité d'hiver est structurante.** Elle annule une grande partie du gain d'été dès que la zone est tempérée ou que le chauffage est électrique direct ou au gaz. C'est le principal angle mort des bilans commerciaux, comme le relève le CSTB (p. 85).
- **Une solution saisonnière** (badigeon de chaux appliqué avant l'été et lessivé par les pluies d'automne) *supprimerait* l'essentiel de cette pénalité, si le lessivage est achevé avant la saison de chauffe, ainsi que l'immobilisation initiale. Pour un commerce de 1 000 m² en H3, toiture sombre et faiblement isolée, elle serait rentable à 0,50 €/m² par saison : 4 808 € de VAN sur 30 ans avec les hypothèses CSTB et un revêtement d'absorption α 0,10, +3 258 € avec une hypothèse plus prudente de α 0,20 pour le badigeon de chaux. Elle est aussi positive en H3 avec une isolation moyenne et une toiture sombre (+586 €), ainsi que sur les toitures non isolées, un cas extrapolé. Elle est négative partout ailleurs. Ces résultats reposent sur trois hypothèses non mesurées : réflectance, durée de couverture de l'été, résidu en hiver.
- **Un point du rapport mérite une vérification conjointe** : dans les tableaux économiques du CSTB, la baisse de consommation de climatisation est du même ordre que la baisse du besoin de froid (rapport de 0,9 à 1,4 selon les points), alors que le chauffage est converti avec un rendement voisin de 3. Le simulateur applique un rendement de climatisation de 3. Il divise ainsi les gains d'été par 2 à 4 par rapport au CSTB, ce qui rend ses résultats **plus pessimistes** (section 9).

Réponse à la question 1 : prix au m²

Par application, une peinture permanente coûte 20 à 35 €/m² HT (CSTB p. 71 ; 20 à 25 €/m² selon les applicateurs), pour 5 à 10 ans. Pour le revêtement saisonnier, la seule référence publique de marché est d'environ 2 €/m² par saison. C'est un **coût de revient de produit, hors main-d'œuvre**, annoncé par Cool Roof France ; il n'est donc pas directement comparable à un prix posé. Le badigeon Anemos est un lait de chaux aérienne et de lait entier. Son prix cible est de **0,50 €/m² par saison, tout compris** : application au printemps par rampe EasyBreeze et visite d'automne de contrôle des évacuations. Le lessivage par les pluies est l'objectif de la formulation ; sa cinétique sera mesurée sur le bâtiment test, avec un rinçage d'automne à basse pression en solution de repli (§ 8.5 et 10). En coût actualisé sur 30 ans (application et entretien, hors énergie), cela donne :

- permanente marché selon le CSTB (25 €/m², 8 ans, nettoyage annuel) : **84,4 €/m²** ;
- permanente marché selon un fabricant (20 €/m², 10 ans, réfection à 60 %, nettoyage tous les 2 ans) : **43,1 €/m²** ;
- saisonnière à 2 €/m² (produit seul) : **38,0 €/m²** ;
- saisonnière Anemos à 0,50 €/m² tout compris : **9,5 €/m²**.

Pour le seul produit, le saisonnier à 2 €/m² coûte sur 30 ans à peu près autant qu'une permanente aux hypothèses fabricant, et deux fois moins qu'aux hypothèses CSTB, mais il faut y ajouter la main-d'œuvre. Sur une toiture isolée ou faiblement isolée, le saisonnier n'a d'intérêt économique net qu'en dessous d'environ 0,75 €/m² par saison, tout compris ; c'est le meilleur cas non extrapolé (section 7). Le prix cible Anemos de 0,50 €/m² se situe sous ce seuil.

Réponse à la question 2 : eaux pluviales

Le badigeon Anemos n'est pas une peinture : c'est un **lait de chaux aérienne éteinte (CL 90) et de lait entier**, dont la caséine sert de liant. Il ne contient **ni pigment, ni dioxyde de titane, ni polymère synthétique, ni biocide**. Les trois familles de polluants examinées par le CSTB (pigments et nanoparticules, microplastiques, biocides ; p. 88–93) en sont donc absentes. Après application, la chaux se carbonate à l'air : ce que les pluies emportent au fil de la saison est du **carbonate de calcium**, c'est-à-dire du calcaire, avec une faible quantité de caséine biodégradable. C'est le badigeon traditionnel, employé depuis l'Antiquité sur les toits et les murs du pourtour méditerranéen. Les seuls points d'attention sont pratiques :

- appliquer par temps sec, sans pluie annoncée dans les 24 à 48 h (comme le CSTB le prévoit pour les peintures, p. 12), afin que la chaux se carbonate avant les premières pluies ;
- ne pas rejeter au réseau les eaux de rinçage du matériel (CSTB p. 11–12) ;
- contrôler et, si besoin, dégager les chéneaux, descentes et bouches d'évacuation, où les fines de carbonate peuvent se déposer : c'est l'objet de la visite d'automne, comprise dans le prix ;
- vérifier avant chantier le cheminement des eaux pluviales du site, comme le recommande le CSTB (p. 97) ;
- repérer les chéneaux et solins en aluminium brut ou en zinc, sensibles à la chaux fraîche, et rincer toute projection.

Le détail figure en section 8 ; l'état de l'art sur l'innocuité de la chaux (membranes, métaux, milieu aquatique, Bermudes) est en § 8.6. Pour répondre à la demande du CSTB de données mesurées (p. 97), le pH et la turbidité des premières eaux de toiture seront relevés sur le bâtiment test.

2. Ce que dit le rapport du CSTB

Référence : Riou B., Reynier L., Bougrain F., Lakel A., Minon A. (approbateur F. Leguillon), *Étude d'impact des peintures réfléchissantes mises en œuvre en toiture de bâtiments tertiaires*, CSTB, rapport DEB/R2EB 2024-105-BeR/EH pour la DHUP, 25/06/2024, 112 p. Le rapport répond à l'article 45 de la loi n° 2023-175 du 10 mars 2023 (p. 7). Les numéros de page renvoient à ce document.

2.1 Aptitude à l'emploi (p. 9–16, 67–68)

- Procédé classé en **technique non courante**, sans couverture assurantielle standard (p. 4). Aucun Avis technique ni DTA n'a été publié. Le résumé indique qu'aucune ATEx n'a été délivrée (p. 4), mais la p. 13 évoque l'existence d'ATEx sur des peintures associées à des revêtements d'étanchéité. Selon la p. 67, une seule ATEx a été déposée, pour une peinture sur membrane bitumineuse.
- Le DTU n'admet la peinture que sur bacs acier, sans référence aux supports d'étanchéité. L'applicateur doit déclarer l'activité à son assureur (p. 67).
- Pente recommandée supérieure à 3 %, pour favoriser le lessivage naturel et éviter l'eau stagnante. Pas d'application sur pente nulle (p. 10).
- La compatibilité avec l'étanchéité existante doit être évaluée produit par produit : adhérence neuf et vieilli, pliage à froid, tenue à la chaleur après 6 mois à 70 °C, UV, eau chaude (p. 15).
- **Encrassement** : principale cause de perte de performance. La réflectance peut perdre 0,15 la première année, surtout au cours des trois premières années ; la réflectance initiale est de 0,75 à 0,95. Il n'existe pas d'essai normalisé de l'encrassement ni de l'efficacité du nettoyage (p. 14).
- Les fabricants annoncent 20 ans ; les experts jugent cette durée irréaliste. Pour les acryliques, « les meilleures tiennent les dix ans » (p. 68).
- Autres risques signalés par l'AQC et la CSFE : intervention de peintres plutôt que d'étancheurs, fumées toxiques en cas de soudure sur membrane peinte, classement au feu modifié (p. 67). Une membrane peinte risque d'être requalifiée en déchet dangereux en fin de vie, notamment avec des PFAS (p. 68).
- Le DTU 43.05 impose une visite d'entretien au moins annuelle dans le neuf. Après 10 ans, l'entretien devient irrégulier (p. 68).

2.2 Impact énergétique (p. 17–61)

- **Méthode.** Les calculs sont faits avec COMETH, le moteur horaire de la RE2020. Trois bâtiments médians de la base OPE ont été retenus : bureau R+1 de 1 540 m², commerce de plain-pied de 900 m², école de 450 m². Chacun est simulé en version récente et en version « ancienne » (isolation des années 1990), en zones H1c, H2b et H3. La toiture standard a une absorption $\alpha = 0,6$; la peinture neuve $\alpha = 0,1$ (p. 25, 31–40).
- **Échelle de la paroi.** La peinture ne modifie quasiment pas le coefficient U. Elle divise le facteur solaire par environ 6. Sous 1 000 W/m², le flux évité est de 6,5 W/m² sur une toiture mal isolée et de 1,05 W/m² sur une toiture isolée (p. 41–42).
- **Seul le dernier étage est affecté** : −5 % de besoin de froid et −14 % de degrés-heures (DH) au dernier étage d'un R+3 (p. 43). Rapporté au bâtiment entier, un gain de 5 % au dernier étage d'un R+3 ne représente qu'environ 1,7 % (p. 61).
- **Besoins de froid** : −12 à −23 %, soit 0,9 à 3,5 kWh/m².an (H2b, p. 45). En H3, le commerce ancien gagne jusqu'à 10,6 kWh/m².an (−21 %, p. 47).
- **Confort d'été** : DH −3,4 à −20 % (p. 46) ; −14 à −20 % sur l'existant, −3 à −16 % sur le neuf (p. 5).
- **Chauffage** : +0,5 % à +6,3 %, soit +0,1 à +3,5 kWh/m².an (p. 47) ; jusqu'à +5 kWh/m².an pour le commerce ancien en H1. En H2b, pour ce même bâtiment, la hausse du chauffage compense la baisse du froid (p. 47).

- **Paramètres favorables** (p. 55, 61) : plain-pied ; faible vitrage ; besoins de froid supérieurs aux besoins de chauffage (zone H3, forts apports internes) ; toiture mal isolée ; toiture très sombre ($\alpha > 0,8$). Les zones froides sont contre-productives.
- Les data centers sont de bons candidats car ils n'ont pas de chauffage, mais le gain relatif est faible : −2 à −3 % de besoin de froid (p. 5, 51). Pour les hôpitaux, les conclusions restent valables (p. 52–54).
- **Peinture vieillie** ($\alpha = 0,4$) : le gain sur les DH est divisé par 2 (tableau 16, p. 59–60). Le photovoltaïque est aussi efficace que la peinture neuve sur les DH (p. 60).
- **Isolation** : sur toiture peu isolée, elle est plus efficace que la peinture car elle réduit aussi les pertes d'hiver. Les deux peuvent se combiner quand l'épaisseur d'isolant est limitée (p. 5, 42, 48–49).
- **Quartier et îlot de chaleur** : approche qualitative. L'étude EPICEA ne montre pas de lien évident entre revêtement de toiture et température de surface (p. 60–61).

2.3 Impact économique (p. 62–85)

- VAN sur 30 ans, actualisation de 3,51 % (taux EY 30 ans), calcul hors inflation, électricité à 0,2047 €/kWh HT (p. 70–72).
- Coûts (article commercial COVALBA) : 20 €/m² pour 5 ans, 25 €/m² pour 8 ans, 35 €/m² pour 20 ans (durée jugée excessive). Entretien 1 €/m² par an, 5 €/m² en variante (p. 71). Surfaces de toiture : bureau 767 m², commerce 955 m², école 450 m² (p. 72).
- **VAN négative dans tous les cas moyens** (tableaux 20 à 32). Commerce ancien H3, milieu de gamme : −62 184 € (tableau 26).
- **Cas extrême** (commerce ancien H3, α 0,9, U = 1, peu vitré) : VAN de −17 055 à −44 592 € (tableau 28). Avec suppression de la climatisation (investissement et entretien évités), la VAN devient positive : +299 507 à +447 041 € (tableau 28 bis). Le CSTB juge ce scénario « très théorique », car 7 470 DH subsistent (p. 77–78).
- Les écoles sont chauffées au gaz et peu climatisées : la peinture n'y est jamais pertinente (p. 78–80).
- La toiture végétalisée extensive a une VAN fortement négative (−126 k€). Le photovoltaïque a une VAN positive dans toutes les zones (+242 à +489 k€, p. 80–84).
- Les retours d'expérience favorables en France « occultent » les surconsommations d'hiver et n'ont « peut-être pas » fait l'objet d'analyses poussées (p. 85).

2.4 Impact sanitaire et environnemental (p. 86–97)

- Les peintures contiennent en moyenne 37 % de polymères. Selon des sources citées par le CSTB, la peinture serait la première source de microplastiques dans les océans (1,9 Mt/an ; « 58 % » avancé, p. 87, 91). Le CSTB souligne que les membranes PVC, EPDM ou bitumineuses relarguent aussi (p. 90).
- Pigments et nanoparticules (TiO_2) : effets génotoxiques, et fabrication au chlorure émettrice de dioxines. Le lessivage accumule des nanoparticules dans les eaux de pluie (p. 88). « En première analyse », on « pourrait préférer » le carbonate de calcium au dioxyde de titane, mais il réfléchit moins bien (p. 88). Le CSTB met en garde contre une évaluation fondée sur la seule formulation déclarée (p. 97).
- Les particules minérales sont peu retenues par le sol (« faible », tableau 38, p. 95).
- Biocides (terbutryne, par exemple) : présence non systématique, souvent apportée par les protocoles d'entretien. Ils sont encadrés par le règlement (UE) 528/2012 (p. 92–93).
- **Cheminement des eaux pluviales** : un rejet direct au milieu est « très rare » pour les toitures, du fait de l'obligation de collecte. Les voies possibles sont la gestion décentralisée (filtration par le sol) ou le réseau unitaire vers la station d'épuration, avec fixation sur les boues (p. 95).
- **Évaluation recommandée** : cinétiques de relargage selon la pluie, l'encrassement et l'abrasion ; analyses MEB-EDX, IRTF, ICP-MS, ATG et granulométrie ; NF EN 16637-1 et -2 ; bio-essais

d'écotoxicité (p. 97).

- **Synthèse du CSTB** : comparer avec les revêtements courants par des essais normalisés ; déclarer les compositions ; reconnaître le cheminement des eaux pluviales avant application ; faire évaluer par une tierce partie l'efficacité et l'innocuité de l'entretien (p. 6, 97).

Conclusion générale du CSTB (p. 6). La généralisation de ces peintures sur le tertiaire « ne semble pas une solution efficace ». Elles peuvent présenter un intérêt dans des cas spécifiques : zone chaude, bâtiments faiblement isolés et peu vitrés (commerces, entrepôts, data centers). Le relargage dans les eaux de pluie est un enjeu à prendre en compte pour leur mise sur le marché.

3. Méthode du simulateur

3.1 Principe : se caler sur les simulations du CSTB

La version initiale du simulateur extrapolait des mesures américaines. Elle surestimait les gains et ignorait la pénalité d'hiver. La version 3 abandonne cette approche : les variations de consommation sont **reprises directement des tableaux du CSTB**, puis étendues aux autres niveaux d'isolation et teintes selon la physique de la paroi.

3.2 Coefficients de référence

Point de référence : toiture U = 0,5 W/m².K, α 0,6 → 0,1, soit x = Δα × U = 0,25. Les variations de consommation finale par m² de toiture sont lues dans les tableaux 25 (commerce ancien) et 21 (bureau ancien R+1, valeurs par m² de plancher multipliées par 2) :

Bâtiment	Zone	Climatisation (kWh/m².an)	Chauffage (kWh/m².an)	Source
Commerce ancien	H3	−7,6 (55,3 → 47,7)	+1,9 (40,6 → 42,5)	Tab. 25, p. 75
Commerce ancien	H1c	−4,9 (37,7 → 32,8)	+1,5 (61,5 → 63,0)	Tab. 25, p. 75
Commerce ancien	H2b	−3,8 (29,3 → 25,5)	+1,1 (56,3 → 57,4)	Tab. 25, p. 75
Bureau ancien R+1	H3	−1,8 (2 × 0,9)	+1,2 (2 × 0,6)	Tab. 21, p. 73
Bureau ancien R+1	H1c	−1,2 (2 × 0,6)	+1,2 (2 × 0,6)	Tab. 21, p. 73
Bureau ancien R+1	H2b	−1,4 (2 × 0,7)	+1,4 (2 × 0,7)	Tab. 21, p. 73
Commerce ancien, cas extrême (α 0,9 ; U = 1 ; x = 0,8)	H3	−18,0 (63,1 → 45,1)	+4,3 (54,7 → 59,0)	Tab. 27, p. 77

3.3 Extension aux autres toitures

À l'échelle de la paroi, le facteur solaire est proportionnel au produit α·U. Les facteurs solaires d'été du CSTB le vérifient : S = 0,074·α·U (tableau 16, p. 59, et p. 76). Le flux évité est donc proportionnel à x = Δα × U. À l'échelle du bâtiment, le gain croît moins vite que x. Entre le cas de base (x = 0,25) et le cas extrême (x = 0,8), le gain de climatisation passe de 7,6 à 18,0 kWh/m² et la pénalité de chauffage de 1,9 à 4,3 kWh/m², pour un x multiplié par 3,2. On en déduit :

$\Delta E = K_{ref} \times (x / 0{,}25)^{n}$, avec n = ln(18,0/7,6)/ln(3,2) = **0,74** pour le froid et n = ln(4,3/1,9)/ln(3,2) = **0,70** pour le chauffage.

Limite importante. Le cas extrême du CSTB ne diffère pas du cas de base par x seulement. Le vitrage de façade y est réduit à 5 %, le vitrage en toiture supprimé et des protections solaires mobiles ajoutées (p. 76). Or ces changements augmentent à eux seuls la part de la toiture dans les apports, et donc l'effet de la peinture (p. 50–51). Les exposants 0,74 et 0,70 mêlent ces effets à celui de x : ils sont **probablement surestimés**. Cela gonfle les résultats des toitures sombres et peu isolées, celles qui portent les VAN positives du revêtement saisonnier.

La loi reproduit les deux points simulés par le CSTB à moins de 0,3 % près. Au-delà de x = 0,8 (toiture non isolée), aucun résultat du CSTB n'existe : le résultat est une extrapolation, signalée à l'écran et marquée d'un astérisque dans les tableaux. Pour la toiture non isolée, U diffère selon le sens du flux : 4,8 W/m².K en été et 7,1 en hiver (résistances superficielles Th-Bat). Les zones H1a et H1b utilisent les coefficients H2b, ce qui est probablement optimiste. L'entrepôt utilise ceux du commerce. Ces deux cas sont signalés comme extrapolés.

3.4 Des consommations du CSTB aux coûts

Le CSTB raisonne sur les besoins pour l'énergie et sur les consommations pour l'économie (p. 35). La comparaison des deux, sur le même commerce ancien en H2b avec α 0,6 → 0,1, donne :

Grandeur (commerce ancien, H2b)	Besoin (tab. 16, p. 59)	Consommation (tab. 25, p. 75)	Rapport besoin / consommation
Froid	15,4 → 11,6 (−3,8)	29,3 → 25,5 (−3,8)	≈ 1,0
Chauffage	115,4 → 119,1 (+3,7)	56,3 → 57,4 (+1,1)	≈ 3,4

Les autres valeurs publiées vont dans le même sens. En H2b, le besoin de chauffage augmente de +3,5 kWh/m² (p. 46–47) pour une consommation de +1,1. En H3, le besoin de froid baisse de −10,6 kWh/m² (p. 47) pour une consommation de −7,6. Le chauffage est donc converti avec un rendement voisin de 3 (pompe à chaleur), mais le froid avec un rendement apparent voisin de 1 (de 0,9 à 1,4 selon les points). Le simulateur procède en deux temps :

- il reconstitue le besoin : besoin de froid = 1 × la variation CSTB ; besoin de chauffage = 3 × la variation CSTB ;
- il applique les équipements choisis par l'utilisateur. Par défaut : climatisation EER = 3 ; pompe à chaleur COP = 3 ; électrique direct rendement 1 ; gaz : chaudière de rendement saisonnier 0,86 sur PCS (minimum du règlement UE 813/2013) au prix SDES de 0,086 €/kWh.

Conséquence : à EER = 3, le gain d'été valorisé par le simulateur est **trois fois plus faible** que dans les VAN du CSTB. Mettre EER = 1 dans les hypothèses avancées reproduit la convention du rapport (section 4). Prendre « besoin = variation CSTB » est une simplification. En H3, la zone la plus favorable, le besoin publié (−10,6 kWh/m²) dépasse de 40 % la variation de consommation (−7,6) : le simulateur y sous-estime le besoin de froid d'environ 28 %. Le tableau 16 vient des cartographies de facteurs solaires et non d'une simulation COMETH complète, ce qui en fait un appui plus fragile.

3.5 Encrassement et entretien

Le CSTB fait ses calculs énergétiques et économiques avec la peinture à l'état neuf (α = 0,1 pendant 30 ans) ; il ne traite l'état vieilli (α = 0,4) qu'en comparaison (tableau 16). Le simulateur ajoute une hausse de α due à l'encrassement :

Entretien	Hausse moyenne de α	Justification
Aucun nettoyage	+0,13 la 1re année, puis +0,15	CSTB p. 14 (jusqu'à −0,15 de réflectance la 1re année) ; Sleiman et al. 2011 (base CRRC, revêtements appliqués sur site : 0,82 → ≈ 0,67 à 3 ans) ; Bretz & Akbari 1997 (70 % de la baisse dans les 2 premiers mois)
Nettoyage annuel (1 €/m²)	+0,10	Nettoyage au printemps, ré-encrassement rapide (Bretz & Akbari 1997, qui jugent le lavage non rentable)
Nettoyage tous les 2 ans	+0,13	Moyenne d'une saison nettoyée et d'une saison non nettoyée ; fréquence recommandée par Enercool
Revêtement saisonnier	+0,10	Neuf à chaque été, même dynamique qu'une peinture nettoyée au printemps (hypothèse)

3.6 Bilan économique

Le bilan est une VAN sur 30 ans, calculée comme au CSTB. Pour la peinture permanente, l'application a lieu en année 0. La réfection est comptée en années n+1, 2n+1… (9, 17 et 25 pour une durée de 8 ans), alors que le CSTB la place en années n, 2n… La convention du simulateur est un peu plus favorable à la peinture permanente. La réfection coûte un pourcentage paramétrable du coût initial ; elle remplace le nettoyage l'année où elle a lieu. Le nettoyage suit la fréquence choisie. Pour le revêtement saisonnier, l'application est payée au début de chaque saison. Le gain de froid est multiplié par la part de l'été couverte (90 %) et la pénalité d'hiver par un résidu (10 %), qui représente un lessivage pas encore achevé au début de la saison de chauffe. Une hausse annuelle du prix de l'énergie est paramétrable : 0 % par défaut, comme au CSTB, et 3 % dans le préréglage fabricant.

4. Validation : reproduction des résultats du CSTB

4.1 Variations d'énergie

Cas	CSTB froid / chauffage	Moteur froid / chauffage	Écart
Commerce ancien H3 (x = 0,25)	−7,6 / +1,9	−7,6 / +1,9	calage
Commerce ancien H1c	−4,9 / +1,5	−4,9 / +1,5	calage
Commerce ancien H2b	−3,8 / +1,1	−3,8 / +1,1	calage
Commerce ancien extrême H3 (x = 0,8)	−18,0 / +4,3	−18,0 / +4,3	< 0,3 %

Ces points ont servi au calage : leur reproduction vérifie le code, pas la loi entre les deux points, qui reste une interpolation.

4.2 Valeurs actuelles nettes

Paramètres du CSTB : 955 m², 25 €/m², 8 ans, nettoyage annuel 1 €/m², électricité 0,2047 €/kWh, 3,51 %, 30 ans, pas d'encrassement, EER = 1.

Cas (milieu de gamme)	VAN CSTB	VAN moteur	Écart
Commerce ancien H3 (tab. 26)	−62 184 €	−60 177 €	+3,2 %
Commerce ancien H1c (tab. 26)	−71 105 €	−68 436 €	+3,8 %
Commerce ancien H2b (tab. 26)	−73 707 €	−70 950 €	+3,7 %
Commerce ancien extrême H3 (tab. 28)	−32 820 €	−31 506 €	+4,0 %

Les écarts restants, de 3 à 4 %, viennent de quatre différences de convention qui se compensent en partie :

- réfection en années 9, 17 et 25 dans le moteur, en années 8, 16 et 24 au CSTB ;
- entretien : 19,0 annuités au CSTB (18 158 € pour 955 m²), 16,7 dans le moteur, qui ne nettoie pas l'année d'une réfection ;
- énergie : 19,0 annuités au CSTB, 18,4 dans le moteur (années 1 à 30) ;
- ventilation : le moteur ne reprend pas la petite variation de ventilation du tableau 25 (en H3, 5,9 kWh/m² au total contre 7,6 − 1,9 = 5,7).

Avec les hypothèses propres au simulateur (EER = 3 et encrassement), le cas extrême passe de −31 506 € à −75 183 €. L'écart vient presque entièrement du rendement de climatisation : −74 533 € sans encrassement.

5. Hypothèses et sources

Paramètre	Valeur	Statut	Source
α toiture standard / sombre / claire	0,6 / 0,9 / 0,4	source	CSTB p. 25 et 76 ; EPA Heat Island Compendium ch. 4 ; règles Th-U fasc. 4
α peinture neuve	0,10	source	CSTB p. 25
U toiture : non isolée / faible / moyenne / bonne	4,8 (été) et 7,1 (hiver) / 0,8 / 0,5 / 0,2	dérivé / source	Th-Bat (R_{si}, R_{se}) ; 3CL-DPE 2021 (toitures-terrasses 1975–77) ; CSTB tab. 4–5
Gains de référence	voir § 3.2	source	CSTB tab. 21, 25, 27
Exposants 0,74 / 0,70		dérivé	CSTB tab. 25 et 27
Conversion besoin / consommation	froid ×1 ; chauffage ×3	dérivé	CSTB tab. 16, 25 ; p. 45–47
EER climatisation / COP PAC	3 / 3	hypothèse	Parc existant. Minima d'écoconception : SEER ≈ 4,1–4,8 (UE 2016/2281), SCOP ≈ 2,8–3,5 (UE 813/2013)
Rendement chaudière gaz	0,86 (PCS)	source	Règlement UE 813/2013
Électricité / gaz	0,2047 / 0,086 €/kWh HT	source	CSTB p. 71 ; SDES, 1er semestre 2025
Actualisation / horizon	3,51 % / 30 ans	source	CSTB p. 70–71
Hausse du prix de l'énergie	0 % (3 % fabricant)	source	CSTB (hors inflation) ; Selectra 2015–2025 (+3,2 à +4,3 %/an)
Peinture permanente : prix, durée, réfection	25 €/m², 8 ans, 100 %	source	CSTB p. 71–72 ; AQC, Qualité Construction n° 202
Préréglage fabricant	20 €/m², 10 ans, réfection 60 %, nettoyage tous les 2 ans, +3 %/an	hypothèse	Enercool (2026). Les 60 % sont une valeur d'illustration : Enercool ne chiffre pas la réfection

Paramètre	Valeur	Statut	Source
Nettoyage	1 €/m² par intervention	source	CSTB p. 71 (5 €/m² en variante p. 77)
Encrassement	voir § 3.5	dérivé	CSTB p. 14 ; Sleiman 2011 ; Bretz & Akbari 1997
Saisonnier marché	2 €/m² par saison	source	Cool Roof France (Hellowatt, 2026) : coût de revient, hors main-d'œuvre
Saisonnier Anemos : composition	Chaux aérienne éteinte CL 90, lait entier et eau, appliqués en deux passes croisées (dosages communiqués aux relecteurs sous confidentialité)	formulation	Formulation Anemos, sans pigment, TiO_2, polymère ni biocide ; dosage de caséine à caler sur le bâtiment test
Saisonnier Anemos : prix	0,50 €/m² par saison, tout compris	tarif	Objectif tarifaire d'une solution en développement : application au printemps et visite d'automne des évacuations
Permanente Anemos	12 €/m²	tarif	Tarif Anemos, application par rampe EasyBreeze
Saisonnier : α neuf, couverture de l'été, résidu d'hiver	0,10 (+0,10 d'encrassement), 90 %, 10 %	hypothèse	À mesurer. Un revêtement froid à base de chaux montre une réflectance supérieure d'environ 15 % à un revêtement froid standard (Santamouris et al. 2008) ; les peintures à la chaux mesurées par Werle et al. (2014) vont de 0,56 à 0,83 (α 0,17–0,44) selon le nombre de couches et le support : voir la sensibilité § 6.7
Non chiffré	confort, continuité d'activité, durée de vie de l'étanchéité, îlot de chaleur	—	Comme le CSTB : p. 8 (confort, durabilité de l'étanchéité) ; îlot de chaleur traité qualitativement p. 60–61

6. Résultats

Les VAN sont calculées sur 30 ans pour 1 000 m² de toiture. Les configurations marquées d'un astérisque (*) sont extrapolées (toiture non isolée, hors du domaine du CSTB). Colonnes : **P-mkt** peinture permanente au prix du marché avec nettoyage annuel ; **P-mkt 0** idem sans nettoyage ; **P-Anemos 0** permanente à 12 €/m² sans nettoyage ; **S-mkt** saisonnière à 2 €/m² ; **S-Anemos** saisonnière à 0,50 €/m² (en développement). Sauf mention contraire, le bâtiment est climatisé et chauffé par pompe à chaleur.

6.1 Commerce, toiture sombre (α 0,9) — hypothèses économiques du CSTB

Zone	Isolation (U)	P-mkt	P-mkt 0	P-Anemos 0	S-mkt	S-Anemos	Froid / chauffage an 1 (P-mkt 0)
H3	Aucune*	−77 218	−61 077	−25 828	14 815	43 335	3 434 / 3 058 €
H3	Faible (0,8)	−79 708	−63 322	−28 072	−23 713	4 808	912 / 663 €
H3	Moyenne (0,5)	−81 268	−64 794	−29 544	−27 935	586	644 / 477 €
H3	Bonne (0,2)	−83 004	−66 431	−31 182	−32 922	−4 401	327 / 251 €
H1c	Aucune*	−88 169	−71 446	−36 196	−4 796	23 724	2 214 / 2 414 €
H1c	Faible (0,8)	−83 209	−66 640	−31 391	−28 980	−459	588 / 524 €
H1c	Moyenne (0,5)	−83 705	−67 104	−31 854	−31 651	−3 131	415 / 377 €
H1c	Bonne (0,2)	−84 205	−67 569	−32 320	−34 804	−6 284	211 / 198 €
H2b	Aucune*	−85 405	−68 788	−33 538	−12 064	16 457	1 717 / 1 770 €
H2b	Faible (0,8)	−83 069	−66 499	−31 250	−30 969	−2 449	456 / 384 €
H2b	Moyenne (0,5)	−83 570	−66 971	−31 721	−33 053	−4 532	322 / 276 €
H2b	Bonne (0,2)	−84 100	−67 467	−32 218	−35 512	−6 991	163 / 146 €

6.2 Commerce, toiture standard du CSTB (α 0,6) — hypothèses économiques du CSTB

Zone	Isolation (U)	P-mkt	P-mkt 0	P-Anemos 0	S-mkt	S-Anemos	Froid / chauffage an 1 (P-mkt 0)
H3	Aucune*	−80 535	−64 403	−29 154	−3 189	25 331	2 213 / 2 018 €
H3	Faible (0,8)	−81 502	−65 144	−29 895	−28 585	−65	588 / 438 €
H3	Moyenne (0,5)	−82 481	−66 025	−30 775	−31 370	−2 850	415 / 315 €
H3	Bonne (0,2)	−83 564	−66 999	−31 749	−34 660	−6 139	211 / 166 €
H1c	Aucune*	−87 591	−70 796	−35 546	−16 133	12 388	1 427 / 1 593 €
H1c	Faible (0,8)	−83 777	−67 209	−31 960	−32 063	−3 542	379 / 346 €
H1c	Moyenne (0,5)	−84 063	−67 461	−32 212	−33 824	−5 303	268 / 249 €
H1c	Bonne (0,2)	−84 343	−67 706	−32 456	−35 903	−7 382	136 / 131 €
H2b	Aucune*	−85 581	−68 927	−33 677	−20 918	7 603	1 106 / 1 168 €
H2b	Faible (0,8)	−83 644	−67 080	−31 830	−33 373	−4 853	294 / 253 €
H2b	Moyenne (0,5)	−83 945	−67 348	−32 099	−34 747	−6 227	207 / 182 €
H2b	Bonne (0,2)	−84 259	−67 626	−32 376	−36 369	−7 849	105 / 96 €

Fond vert : VAN positive. Les montants « froid / chauffage » sont le gain de climatisation et le surcoût de chauffage de la première année, en euros.

6.3 Bureau R+1, toiture sombre — hypothèses économiques du CSTB

Zone	Isolation (U)	P-mkt	P-mkt 0	P-Anemos 0	S-mkt	S-Anemos	Froid / chauffage an 1 (P-mkt 0)
H3	Aucune*	−105 598	−87 975	−52 725	−27 799	722	813 / 1 931 €
H3	Faible (0,8)	−88 283	−71 453	−36 204	−35 133	−6 612	216 / 419 €
H3	Moyenne (0,5)	−87 262	−70 478	−35 228	−35 994	−7 473	153 / 301 €
H3	Bonne (0,2)	−85 983	−69 256	−34 007	−37 006	−8 485	77 / 159 €
H1c	Aucune*	−110 741	−92 860	−57 610	−32 428	−3 907	542 / 1 931 €
H1c	Faible (0,8)	−89 649	−72 751	−37 501	−36 362	−7 842	144 / 419 €
H1c	Moyenne (0,5)	−88 226	−71 394	−36 144	−36 862	−8 342	102 / 301 €
H1c	Bonne (0,2)	−86 473	−69 721	−34 472	−37 447	−8 926	52 / 159 €
H2b	Aucune*	−115 124	−97 038	−61 789	−31 494	−2 974	633 / 2 253 €
H2b	Faible (0,8)	−90 516	−73 578	−38 328	−36 085	−7 564	168 / 489 €
H2b	Moyenne (0,5)	−88 857	−71 995	−36 746	−36 668	−8 147	119 / 352 €
H2b	Bonne (0,2)	−86 811	−70 044	−34 794	−37 350	−8 829	60 / 185 €

Pour un bureau, la peinture n'agit que sur le dernier étage (CSTB p. 43) : les gains par m² de toiture sont faibles et la pénalité de chauffage domine.

6.4 Commerce, toiture sombre — hypothèses du fabricant (20 €/m², 10 ans, réfection 60 %, nettoyage tous les 2 ans, énergie +3 %/an)

Zone	Isolation (U)	P-mkt	P-mkt 0	P-Anemos 0	S-mkt	S-Anemos	Froid / chauffage an 1 (P-mkt 0)
H3	Aucune*	−40 602	−24 175	−10 564	39 656	68 177	3 434 / 3 058 €
H3	Faible (0,8)	−44 262	−27 468	−13 857	−16 983	11 537	912 / 663 €
H3	Moyenne (0,5)	−46 555	−29 630	−16 019	−23 190	5 331	644 / 477 €
H3	Bonne (0,2)	−49 107	−32 034	−18 424	−30 521	−2 001	327 / 251 €
H1c	Aucune*	−56 701	−39 402	−25 791	10 825	39 346	2 214 / 2 414 €
H1c	Faible (0,8)	−49 409	−32 341	−18 731	−24 727	3 794	588 / 524 €
H1c	Moyenne (0,5)	−50 138	−33 022	−19 412	−28 654	−133	415 / 377 €
H1c	Bonne (0,2)	−50 873	−33 705	−20 095	−33 289	−4 769	211 / 198 €
H2b	Aucune*	−52 636	−35 497	−21 887	142	28 663	1 717 / 1 770 €
H2b	Faible (0,8)	−49 202	−32 134	−18 524	−27 651	869	456 / 384 €
H2b	Moyenne (0,5)	−49 940	−32 826	−19 216	−30 714	−2 193	322 / 276 €
H2b	Bonne (0,2)	−50 719	−33 556	−19 945	−34 330	−5 809	163 / 146 €

Colonne P-mkt : nettoyage annuel, pour rester comparable aux autres tableaux. Avec le nettoyage tous les 2 ans du préréglage, le cas H3, faible isolation, donne −36 341 €. Dans ce préréglage, la durée de 10 ans et la réfection à 60 % s'appliquent aussi à la permanente Anemos (12 €/m²), au lieu de 8 ans et 100 % ailleurs. Sur un bâtiment non chauffé, elle devient alors positive : +3 718 € (tableau 6.5).

6.5 Influence du système de chauffage — commerce H3, toiture sombre, faiblement isolée

Hypothèses	Chauffage	P-mkt	P-mkt 0	P-Anemos 0	S-mkt	S-Anemos	Pénalité an 1 permanente / saisonnière
CSTB	Pompe à chaleur (COP 3)	−79 708	−63 322	−28 072	−23 713	4 808	663 / 68 €
CSTB	Gaz (rendement 0,86)	−85 557	−68 893	−33 643	−24 298	4 223	972 / 100 €
CSTB	Électrique direct	−104 836	−87 254	−52 005	−26 226	2 295	1 990 / 205 €
CSTB	Non chauffé	−67 144	−51 355	−16 106	−22 456	6 064	0 / 0 €
Fabricant	Pompe à chaleur (COP 3)	−44 262	−27 468	−13 857	−16 983	11 537	663 / 68 €
Fabricant	Gaz (rendement 0,86)	−52 861	−35 650	−22 040	−17 843	10 677	972 / 100 €
Fabricant	Électrique direct	−81 203	−62 618	−49 008	−20 677	7 843	1 990 / 205 €
Fabricant	Non chauffé	−25 791	−9 892	3 718	−15 136	13 384	0 / 0 €

La pénalité de chauffage d'une peinture permanente est environ 1,5 fois plus élevée au gaz qu'avec une pompe à chaleur, et 3 fois plus en électrique direct. Le gaz est moins cher au kWh, mais chaque kWh de besoin en coûte environ 0,10 € (0,086 / 0,86), contre 0,068 € avec une pompe à chaleur (0,2047 / 3). La solution saisonnière est peu sensible au mode de chauffage.

6.6 Sensibilité au rendement de climatisation (EER) — commerce, hypothèses CSTB

Configuration	P-mkt EER 3	P-mkt EER 1	P-Anemos 0 EER 3	P-Anemos 0 EER 1	S-mkt EER 3	S-mkt EER 1	S-Anemos EER 3	S-Anemos EER 1
H3, faible isolation, toiture sombre	−79 708	−45 105	−28 072	4 792	−23 713	7 430	4 808	35 950
H3, isolation moyenne, toiture standard	−82 481	−66 329	−30 775	−16 054	−31 370	−16 834	−2 850	11 687
H2b, isolation moyenne, toiture standard	−83 945	−75 870	−32 099	−24 738	−34 747	−27 479	−6 227	1 042
H1c, isolation moyenne, toiture standard	−84 063	−73 650	−32 212	−22 720	−33 824	−24 452	−5 303	4 069
H3, non isolée*, toiture sombre	−77 218	53 081	−25 828	97 926	14 815	132 084	43 335	160 605

La colonne EER 1 correspond à la convention implicite des tableaux économiques du CSTB. Le choix de ce paramètre change le signe de plusieurs conclusions. C'est le premier point à trancher dans une lecture croisée (section 9).

6.7 Sensibilité aux hypothèses du revêtement saisonnier (S-Anemos, 0,50 €/m², hypothèses CSTB)

Configuration	α 0,10 rés. 10 % cour. 90 %	α 0,10 rés. 10 % cour. 75 %	α 0,10 rés. 30 % cour. 90 %	α 0,10 rés. 30 % cour. 75 %	α 0,20 rés. 10 % cour. 90 %	α 0,20 rés. 10 % cour. 75 %	α 0,20 rés. 30 % cour. 90 %	α 0,20 rés. 30 % cour. 75 %	α 0,30 rés. 10 % cour. 90 %	α 0,30 rés. 10 % cour. 75 %	α 0,30 rés. 30 % cour. 90 %	α 0,30 rés. 30 % cour. 75 %
H3, faible isolation, sombre	4 808	2 213	2 295	−300	3 258	942	1 002	−1 313	1 639	−384	−346	−2 369
H3, non isolée*, sombre	43 335	33 563	31 751	21 978	37 607	28 888	27 207	18 488	31 627	24 009	22 474	14 855
H3, isolation moyenne, standard	−2 850	−4 061	−4 072	−5 283	−4 132	−5 111	−5 131	−6 110	−5 531	−6 257	−6 284	−7 009

α : absorption du revêtement neuf, avant encrassement (+0,10). rés. : part de la pénalité d'hiver qui subsiste. cour. : part de l'été couverte.

Le résultat favorable du saisonnier dans le meilleur cas tient à condition que le revêtement soit très réfléchissant (α ≈ 0,1 à 0,2), posé tôt et éliminé avant l'hiver. Avec une réflectance prise dans le bas de la plage publiée pour la chaux (α 0,3) et un lessivage tardif, il redevient légèrement négatif. Seule la toiture non isolée reste nettement positive, mais c'est un cas extrapolé.

7. Question 1 — Prix au m² : saisonnier ou permanent

7.1 Prix par application

Solution	Prix HT	Durée	Source
Peinture permanente, entrée de gamme	20 €/m²	5 ans	CSTB p. 71 (COVALBA)
Peinture permanente, milieu de gamme	25 €/m²	8 ans	CSTB p. 71
Peinture permanente, haut de gamme	35 €/m²	20 ans annoncés, jugés irréalistes	CSTB p. 71, 68
Peinture permanente, marché constaté	20 à 25 €/m²	10 ans (Enercool) ; 20 ans annoncés, « les meilleures tiennent les dix ans » selon les experts	Prix : AQC n° 202 ; CSTB p. 64 (hypermarché du Loiret). Durée : Enercool 2026 ; CSTB p. 68
Peinture permanente Anemos	12 €/m²	8 ans retenus	Tarif Anemos (rampe EasyBreeze)
Revêtement saisonnier, marché	≈ 2 €/m²	1 saison	Cool Roof France (Hellowatt) : coût de revient, produit seul
Badigeon saisonnier Anemos (chaux aérienne et lait)	0,50 €/m² tout compris (objectif)	1 saison	En développement. Comprend l'application au printemps et la visite d'automne des évacuations ; lessivage par les pluies visé, rinçage d'automne en repli (non inclus)

7.2 Coût actualisé sur 30 ans (application et entretien, hors énergie)

Scénario	Coût actualisé 30 ans	Équivalent annuel	Commentaire
Permanente 25 €/m², 8 ans, nettoyage annuel (CSTB)	84,4 €/m²	4,60 €/m².an	Hypothèses du rapport
Permanente 25 €/m², 8 ans, sans nettoyage	67,8 €/m²	3,69 €/m².an	Performance dégradée (+0,15 sur α)
Permanente 20 €/m², 10 ans, réfection 60 %, nettoyage tous les 2 ans	43,1 €/m²	2,34 €/m².an	Hypothèses du fabricant
Permanente Anemos 12 €/m², 8 ans, sans nettoyage	32,5 €/m²	1,77 €/m².an	Tarif Anemos
Saisonnier 2 €/m² par saison	38,0 €/m²	2,00 €/m².an	Payé en début de saison
Saisonnier 0,50 €/m² par saison	9,5 €/m²	0,50 €/m².an	Objectif Anemos

Actualisation à 3,51 %. Équivalent annuel = coût actualisé ÷ 18,37 (annuité de fin d'année sur 30 ans) pour la permanente ; ÷ 19,01 (paiement en début de saison) pour le saisonnier.

7.3 Prix d'équilibre

Le prix d'équilibre est le prix par application en dessous duquel la VAN sur 30 ans devient positive. Il est calculé pour un commerce climatisé de 1 000 m² chauffé par pompe à chaleur, avec les hypothèses énergétiques par défaut (EER 3).

Configuration	Saisonnier — hyp. CSTB	Saisonnier — hyp. fabricant	Permanente sans nettoyage — hyp. CSTB	Permanente sans nettoyage — hyp. fabricant
H3, faible isolation, toiture sombre	0,75 €/m² par saison	1,11 €/m² par saison	1,65 €/m² tous les 8 ans	3,86 €/m² tous les 10 ans
H3, non isolée*, toiture sombre	2,78 €/m² par saison	4,09 €/m² par saison	2,48 €/m² tous les 8 ans	5,79 €/m² tous les 10 ans
H3, isolation moyenne, toiture standard	0,35 €/m² par saison	0,51 €/m² par saison	—	—
H1c, faible isolation, toiture sombre	0,48 €/m² par saison	0,70 €/m² par saison	—	—
H2b, isolation moyenne, toiture standard	0,17 €/m² par saison	0,25 €/m² par saison	—	—

Lecture. Avec les rendements d'équipement retenus, une peinture permanente ne s'équilibre qu'à quelques €/m², soit une fraction des prix du marché (20 à 35 €/m²). Le revêtement saisonnier s'équilibre entre 0,2 et 1,1 €/m² par saison sur les toitures isolées ou faiblement isolées. Il ne dépasse ces niveaux que sur les toitures non isolées, un cas extrapolé. Le prix cible de 0,50 €/m² ne convient donc qu'aux configurations favorables. En convention CSTB (EER = 1), le prix d'équilibre du saisonnier dans le cas H3 faiblement isolé passe de 0,75 à environ 2,4 €/m² par saison.

8. Question 2 — Eaux pluviales

8.1 Ce que dit le CSTB

Le rapport demande de conditionner l'emploi en toiture à « une vérification des installations de collecte et de traitements des eaux pluviales » (p. 6). Il recommande de reconnaître le cheminement des eaux avant application (p. 97). Il demande des constantes de relargage, mesurées selon un protocole normalisé, et une déclaration des compositions (p. 6, 97). Il ne chiffre aucun relargage, faute de données publiées.

8.2 Ce que contient le badigeon Anemos

Constituant	Rôle	Devenir sur la toiture et dans les eaux
Chaux aérienne éteinte CL 90 (hydroxyde de calcium)	Charge blanche et réfléchissante	Se carbonate à l'air en carbonate de calcium (calcaire), constituant naturel des roches calcaires et des amendements calciques agricoles
Lait entier (caséine)	Liant : la caséine forme avec la chaux un caséinate de calcium	Protéine d'origine alimentaire, biodégradable, en faible proportion
Eau	Véhicule	Évaporée au séchage
Absents	—	Pigments, dioxyde de titane, nanoparticules, polymères synthétiques (acryliques), biocides, solvants, décapants

C'est la recette du badigeon traditionnel, utilisé depuis l'Antiquité sur les murs et les toits méditerranéens. Une peinture permanente relargue lentement, sur toute sa durée de vie, une partie de ses 37 % de polymères en moyenne, de ses pigments et parfois de ses biocides (CSTB p. 88–93). Le badigeon, lui, est emporté progressivement par les pluies au fil de la saison, sous forme de carbonate de calcium et d'une faible quantité de caséine :

- **pH** : le lait de chaux frais est basique (pH d'environ 12,5 pour une solution saturée d'hydroxyde de calcium ; NIST, SRM 2193a), mais la couche se carbonate à l'air en quelques jours. L'application se fait donc par temps sec, sans pluie annoncée dans les 24 à 48 h, comme le CSTB le prévoit déjà pour les peintures (p. 12). Les pluies de l'été et de l'automne emportent ensuite du calcaire ;
- **quantité** : la couche appliquée chaque printemps est emportée progressivement sur plusieurs mois de pluies. Il s'agit de calcaire, sans substance classée ;
- **fines dans les évacuations** : le carbonate peut se déposer dans les chéneaux, descentes et bouches. C'est l'objet de la seconde intervention d'Anemos, à l'automne : contrôle et, si besoin, dégagement des évacuations.

8.3 Pourquoi le précédent des blancs de serre commerciaux ne s'applique pas

Les blancs d'ombrage commerciaux pour serres sont des formulations propriétaires dont la composition n'est pas publiée (FDS ReduSol). Leur liant est conçu pour tenir, si bien qu'il faut un **décapant** pour les retirer (HortiDaily) ; le décapant ReduClean contient de la soude (pH 13, classé « nettement dangereux pour l'eau »). Ce sont ces eaux de décapage, blanchies et très alcalines, que le gestionnaire de l'eau néerlandais Delfland interdit de rejeter dans les fossés (RODI, 14/10/2025). Le badigeon Anemos n'utilise **ni formulation chimique propriétaire ni décapant** : il n'y a pas d'eau de décapage. Le lessivage par la pluie est visé ; s'il est incomplet, le repli est un rinçage à l'eau claire, sans produit.

8.4 Cadre réglementaire en France

- **Code civil, art. 640–641** : le propriétaire qui aggrave l'écoulement naturel vers le fonds inférieur lui doit une indemnité.
- **CGCT, art. L2224-10** : le zonage pluvial communal peut imposer la collecte et le traitement des eaux pluviales lorsque leur pollution risque de nuire au milieu aquatique.
- **Code de la santé publique, art. L1331-10** : il soumet à autorisation les déversements d'eaux usées non domestiques. Le badigeon ne produit pas d'eau de lavage ni de décapage : les eaux de toiture restent des eaux pluviales. Seules les eaux de rinçage du matériel sont récupérées et ne

sont pas rejetées au réseau (CSTB p. 11–12).

- **Code de l'environnement, art. R214-1, rubrique 2.1.5.0** : le rejet d'eaux pluviales au milieu naturel est soumis à déclaration au-delà de 1 ha de surface de projet (bassin intercepté compris) et à autorisation au-delà de 20 ha.
- **Règlements de service des collectivités** : ils interdisent couramment de rejeter au réseau pluvial des liants hydrauliques, des boues ou des produits toxiques (exemple : règlement du service des eaux pluviales de la CARF, 2026).

8.5 Protocole d'intervention Anemos

Sujet	Engagement	Méthode / référence
Composition	Composition déclarée : chaux aérienne CL 90, lait entier, eau. Aucun pigment, TiO_2, polymère synthétique, biocide ni décapant	Recommandation CSTB p. 6, 97
Application	Par temps sec, sans pluie annoncée dans les 24 à 48 h, pour laisser la chaux se carbonater ; rinçage du matériel sans rejet au réseau	CSTB p. 11–12
Lessivage	Objectif : lessivage progressif par les pluies d'été et d'automne, sans intervention. Cinétique à mesurer : un lait de chaux bien carbonaté peut tenir 1 à 5 ans sur un mur. Repli : rinçage à l'eau à basse pression lors de la visite d'automne si la toiture reste blanche (coût non inclus dans les 0,50 €/m² ; chaque 0,10 €/m² ajouté réduit la VAN d'environ 1 900 € pour 1 000 m²)	Minerva Conservation ; NPS/NCPTT 2007 ; Puglisi et al. 2021 ; Cajamar
Visite d'automne	Contrôle et, si besoin, dégagement des chéneaux, descentes et bouches d'évacuation ; comprise dans le prix de 0,50 €/m²	—
Diagnostic du site	Repérage avant chantier de l'exutoire des eaux pluviales (séparatif, unitaire, infiltration)	CSTB p. 95–97
Données mesurées	Sur le bâtiment test : pH et turbidité des premières eaux de toiture après application, suivi photographique tous les 15 jours avec la pluviométrie cumulée	Demande du CSTB p. 97
Étanchéité	Compatibilité avec les membranes bitumineuses anciennes et neuves (couche sacrificielle diluée sur bitume neuf) ; demande de non-objection écrite à un fabricant de membranes	CSTB p. 15 ; § 8.6
Métaux	Repérage des chéneaux et solins en aluminium brut ou en zinc et des bacs rayés ; masquage ou rinçage à l'eau claire des projections	§ 8.6 (Reynaers, Rheinzink, VMZinc)
Qualité de la chaux	Analyse des impuretés en métaux traces demandée au fournisseur ; chaux de qualité eau potable (EN 12518) de préférence	Fraunhofer IBP 2023 ; EN 12518
Sécurité des opérateurs	Lunettes étanches, gants, lave-œil sur chantier	FDS chaux (H318, H315, H335)

8.6 Innocuité de la chaux : état de l'art et retours d'expérience

Une revue des sources disponibles (fiches techniques de fabricants, dossiers réglementaires, pratiques historiques) donne le bilan suivant. Elle distingue la chaux **fraîche** (hydroxyde de calcium, pH ≈ 12,5), présente pendant quelques heures à quelques jours après l'application, et la chaux **carbonatée** (carbonate de calcium), qui constitue l'essentiel de ce que les pluies emportent.

Support ou milieu	Verdict	Ce que disent les sources
Bitume oxydé, SBS, APP, autoprotégé	Compatible	Bitume réputé inerte face aux alcalis (Baunetz Wissen). La chaux hydratée est un additif courant des enrobés routiers, où elle ralentit le vieillissement oxydatif du bitume (National Lime Association). Aucun cas documenté de fragilisation ou de cloquage. Seul effet connu : jaunissement possible du blanc par les résidus bruns du bitume sous forte chaleur (ARMA), faible sur membranes anciennes
PVC, TPO, EPDM	Compatible	Hydroxyde de calcium classé « excellent » dans les tableaux de résistance chimique ; membrane thermoplastique stable même à la soude à 10 et 50 % (RENOLIT Alkortec). Nettoyer avant toute soudure de réparation
Bac acier prélaqué	Précautions	La laque résiste ; les coupes, rives et rayures où le zinc est à nu sont sensibles aux produits fortement alcalins (NZ Steel, Lysaght)
Aluminium brut (chéneaux, solins)	Risque à gérer	Couche d'oxyde stable seulement entre pH ≈ 4 et 8,5 ; la chaux et le ciment frais sont exclus des garanties (Reynaers) ; rincer immédiatement les projections (Portland Cement Association)
Zinc titane	Précautions	Sensible à la chaux fraîche humide (Rheinzink, NedZink) ; le ruissellement issu d'un support calcaire est en revanche jugé acceptable (VMZinc), ce qui correspond au badigeon carbonaté
Acier galvanisé, cuivre, PVC	Compatible	Léger décapage du galvanisé pendant la prise, qui cesse ensuite (Galvanizers Association) ; cuivre très résistant aux mortiers (Copper Development Association)

Support ou milieu	Verdict	Ce que disent les sources
Milieu aquatique	Faible risque une fois carbonaté	Hydroxyde de calcium non classé dangereux pour l'environnement ; l'évaluation REACH porte sur le seul effet du pH (limite de 9 dans les eaux de surface), atténué par le pouvoir tampon des eaux. Carbonate de calcium non classé. La laitance fraîche (pH > 12) est en revanche nocive : pas de rejet des eaux de rinçage
Lait (caséine)	Faible	Matière organique biodégradable mais très chargée en DBO ; aux faibles doses utilisées, charge de l'ordre de quelques kg de DBO par saison pour 1 000 m², étalée sur des mois de pluie
Opérateurs	Précautions	Chaux classée lésions oculaires graves (H318), irritante pour la peau et les voies respiratoires

Ce que montrent les usages et retours d'expérience

- **Bermudes** : les toits étaient traditionnellement enduits de chaux et l'eau de pluie qui en ruisselait était recueillie en citerne pour la boisson. La chaux y a depuis été remplacée par des peintures agréées ; le risque sanitaire documenté dans ces citernes est bactérien, pas chimique (ministère de la Santé des Bermudes, 2017).
- **Usages délibérés de la chaux dans l'eau** : traitement de l'eau potable (EN 12518), chaulage des lacs suédois depuis les années 1980 pour remonter leur pH, chaulage agricole des sols.
- **Toitures fraîches à la chaux** : technique traditionnelle en Inde, reprise dans le plan canicule d'Ahmedabad (NRDC) ; chaulage de serres au $Ca(OH)_2$ éliminé par les pluies d'automne, sans dégradation signalée du support (Puglisi et al. 2021).
- **Bénéfice probable pour l'étanchéité** : un revêtement réfléchissant abaisse la température de surface d'une toiture noire de 28 à 39 °C, ce qui ralentit le vieillissement du bitume (argument de la profession, sans chiffre indépendant) ; le CSTB note aussi ce bénéfice potentiel, non évalué (p. 8).

Lacunes

Aucune mesure publiée du pH ou des matières en suspension dans l'eau qui ruisselle d'un toit badigeonné n'a été trouvée ; aucun fabricant de membranes ni texte CSTB ou DTU ne traite nommément de la chaux ; aucun retour documenté sur les chéneaux en aluminium des serres blanchies chaque année. Le relevé de pH en sortie de descente lors des premières pluies sur le bâtiment test et une non-objection écrite d'un fabricant de membranes combleront l'essentiel de ces lacunes.

9. Écarts avec le CSTB et questions ouvertes

Point	CSTB	Simulateur	Effet sur les résultats
Valorisation du froid évité	Consommation ≈ besoin (rendement apparent 0,9 à 1,4 ; tab. 16 et 25 ; p. 45–47)	Besoin ÷ EER 3 (paramétrable)	Gains d'été 3 fois plus faibles : plus pessimiste que le CSTB
Valorisation du chauffage	Consommation ≈ besoin ÷ 3	Besoin ÷ COP 3 (PAC), ÷ 0,86 (gaz) ou ÷ 1 (électrique direct)	Identique pour une PAC ; plus défavorable au gaz et en électrique direct
Encrassement	Non intégré au bilan (peinture neuve pendant 30 ans) ; état vieilli α 0,4 étudié à part (tab. 16)	+0,10 à +0,15 sur α selon l'entretien	Plus pessimiste, surtout sans nettoyage
Isolation hors domaine	U ≤ 1 (cas extrême)	Toiture non isolée extrapolée (x jusqu'à 3,8)	Incertitude forte, signalée
Zones H1a/H1b, entrepôts	Non simulés	Coefficients H2b et commerce	Probablement optimiste, signalé
Revêtement saisonnier	Non étudié	Couverture 90 %, résidu d'hiver 10 %, α identique à la permanente	Hypothèses à valider sur le bâtiment test (§ 6.7)
Exposants de la loi en x	Cas extrême : x plus élevé, mais aussi moins de vitrage et des protections solaires (p. 76)	Effet total attribué à x	Probablement optimiste pour les toitures sombres et peu isolées
Bureau : surface de référence	Variations par m² de plancher appliquées aux 767 m² de toiture (tab. 22)	Variations par m² de plancher × 2, soit par m² de toiture	Gains et pertes par m² de toiture doublés par rapport au calcul économique du CSTB
Commerce : surface de référence	Variations par m² de plancher (900 m²) appliquées aux 955 m² de toiture	Même convention	Gains surestimés d'environ 6 %
Date des réfections	Années 8, 16, 24	Années 9, 17, 25	Légèrement favorable à la permanente
Prix de l'énergie	Figé, hors inflation	Figé par défaut ; +3 %/an en option	Neutre par défaut

Questions proposées pour la lecture croisée

- **Rendement de climatisation dans les tableaux économiques.** Dans les tableaux 23 à 27, les variations de consommation de froid sont du même ordre que les variations de besoin, et en valeur absolue la consommation dépasse le besoin : 29,3 kWh/m² consommés pour 15,4 kWh/m² de besoin en H2b, commerce ancien. Est-ce un rendement saisonnier très bas dans COMETH, ou l'inclusion d'auxiliaires ? La réponse change le signe de plusieurs résultats (tableau 6.6).
- **Bilan en H2b.** En besoins, le commerce ancien est à l'équilibre en H2b (p. 47). En consommations, il gagne 2,8 kWh/m² (tab. 25). Le résumé (p. 4) évoque un « bilan négatif » dans ce cas. Quelle grandeur faut-il retenir pour un maître d'ouvrage ?
- **Encrassement dans la VAN.** Confirmer que les tableaux 20 à 28 supposent une peinture à l'état neuf pendant 30 ans, et non une réflectance dégradée entre deux nettoyages.
- **ATEx.** La p. 13 mentionne des ATEx sur des peintures associées à des revêtements d'étanchéité ; le résumé (p. 4) indique qu'aucune n'a été délivrée. Quel est l'état actuel ?
- **Saisonnier.** Le CSTB ne traite pas cette option. Peut-on utiliser les cartographies de l'annexe 3 en pondérant le facteur solaire par saison (S d'été avec revêtement, S d'hiver sans revêtement) pour vérifier les gains revendiqués ici ?
- **Eaux pluviales.** Pour un badigeon de chaux et de lait, sans pigment, polymère ni biocide, le CSTB juge-t-il suffisants la déclaration de composition et un relevé de pH et de turbidité sur bâtiment test, ou attend-il un essai de lixiviation normalisé (EN 16637-2) comme pour les peintures ?

10. Limites et programme de validation

- Le moteur repose sur **sept points de simulation du CSTB** : deux bâtiments, trois zones et un cas extrême. Les résultats sont des interpolations, sauf en ces points. À notre connaissance, aucune campagne de mesures indépendante et publiée n'existe pour la France ; le CSTB en recommande (p. 8).
- Les mesures américaines (Akbari, Parker, Konopacki, Hildebrandt…) montrent des baisses de climatisation de 2 à 80 %. Elles ne servent plus au calcul, car elles ont été obtenues sous d'autres

climats et souvent sur des maisons.

- Pas de prise en compte du confort, de la productivité, de la continuité d'activité pendant les canicules, de la durée de vie de l'étanchéité (le CSTB l'évoque p. 8) ni de l'îlot de chaleur.
- **Badigeon saisonnier** : le badigeon de chaux est un revêtement froid connu (Santamouris et al. 2008 ; Werle et al. 2014, réflectance de 0,56 à 0,83 et émissivité d'environ 0,97 selon le nombre de couches et le support). L'hypothèse retenue (0,90 à l'état neuf) est en haut de cette plage. Restent à caler sur le terrain : le grammage, la tenue sur l'été selon le dosage de caséine et la date d'achèvement du lessivage avant la saison de chauffe.
- **Lessivage saisonnier : non démontré à ce stade.** Sur les murs, un lait de chaux bien carbonaté dure couramment 1 à 5 ans (guides de conservation ; NPS/NCPTT 2007), et la caséine est ajoutée pour en améliorer la tenue. Les serres méditerranéennes comptent sur les pluies d'automne (Puglisi et al. 2021), mais le blanchiment y est souvent lavé activement (Cajamar). Une toiture plate, frappée de plein fouet par la pluie, devrait s'éroder plus vite qu'un mur, sans donnée chiffrée. Le résidu d'hiver de 10 % retenu dans le simulateur peut donc être optimiste. La vitesse de lessivage se règle par le liant (dose de lait), le grammage ; elle sera mesurée mensuellement sur le bâtiment test (réflectance ou température de surface, pluie cumulée), avec pour critère une toiture revenue à sa teinte d'origine au 1er novembre.
- **Programme proposé** : un bâtiment test disponible, avec quatre zones de 3 × 3 m à des dosages de liant croissants, et une zone témoin. Suivi photographique tous les 15 jours avec la pluviométrie cumulée ; réflectance (ASTM C1549 ou équivalent), températures de surface et sous la toiture, pH et turbidité des premières eaux. Protocole à partager avec les relecteurs avant le démarrage.

Références

[1] Riou B., Reynier L., Bougrain F., Lakel A., Minon A. (2024). *Étude d'impact des peintures réfléchissantes mises en œuvre en toiture de bâtiments tertiaires*. CSTB pour la DHUP, rapport DEB/R2EB 2024-105-BeR/EH, 25/06/2024. https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_-_impact_des_peintures_reflechissantes_en_toiture_de_batiments_tertiaires.pdf

[2] Pouget Consultants pour la CSFE, l'UPMF et l'UMGCCP (FFB) (2024). *Impact réel des procédés réflectifs (cool roof) en toiture*. https://www.ffbatiment.fr/actualites-batiment/actualite-bam/cool-roofing-ce-qu-il-faut-savoir

[3] Ploye F. (2024). « Cool roofing : une technique séduisante à manier avec précaution ». *Qualité Construction* (AQC), n° 202.

[4] Enercool (2026). « Cool roofing : ce que le rapport du CSTB… » https://enercool.substack.com/p/cool-roofing-ce-que-le-rapport-du ; « Impact des peintures réfléchissantes en toiture – l'étude du CSTB » https://www.enercool.fr/blogs/news/impact-des-peintures-reflechissantes-en-toiture-l-etude-du-cstb

[5] Bretz S.E., Akbari H. (1997). Long-term performance of high-albedo roof coatings. *Energy and Buildings* 25(2):159–167. https://eta.lbl.gov/publications/long-term-performance-high-albedo

[6] Sleiman M. et al. (2011). Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance — Part I. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95:3385–3399. https://escholarship.org/content/qt4n18r135/qt4n18r135.pdf

[7] Roodvoets D., Miller W., Desjarlais A. (2004). *Saving Energy by Cleaning Reflective Thermoplastic Low-Slope Roofs*. ORNL/SPRI. https://coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/05/Saving-Energy-by-Cleaning-Reflective-Thermoplastic-Low-Slope-Roofs.pdf

[8] Berdahl P., Bretz S. (1997). Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. *Energy and Buildings* 25(2):149–158. doi:10.1016/S0378-7788(96)01004-3

[9] Werle A.P., Loh K., John V.M. (2014). Pintura à base de cal como alternativa de revestimento frio. *Ambiente Construído* 14(3):149–157. https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/41343

[10] Akbari H., Bretz S., Kurn D.M., Hanford J. (1997). Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. *Energy and Buildings* 25:117–126.

[11] Parker D.S., Barkaszi S.F. (1997). Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from Florida. *Energy and Buildings* 25:105–115.

[12] Konopacki S.J., Gartland L.M., Akbari H., Rainer L.I. (1998). *Demonstration of energy savings of cool roofs*. LBNL-40673.

[13] Akbari H., Levinson R., Rainer L. (2005). Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings. *Energy and Buildings* 37:1007–1016.

[14] Hildebrandt E.W., Bos W., Moore R. (1998). Assessing the impacts of white roofs on building energy loads. *ASHRAE Transactions* 104.

[15] Règlement (UE) 2016/2281 (écoconception des climatiseurs et refroidisseurs) ; Règlement (UE) 813/2013 (dispositifs de chauffage des locaux). https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/2281/oj ; https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2013/813/oj

[16] SDES (2025). Prix du gaz et de l'électricité au premier semestre 2025. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/prix-du-gaz-et-de-lelectricite-au-premier-semestre-2025

[17] Règles Th-Bat et Th-U, fascicule 4 (parois opaques). https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr ; méthode 3CL-DPE 2021, annexe 1 de l'arrêté du 31/03/2021.

[18] Hellowatt (2026). Interview de Julien Martin-Cocher (Cool Roof France). https://www.hellowatt.fr/blog/julien-martin-cocher-cool-roof/

[19] Lumiforte EMEA B.V. Fiches de données de sécurité ReduSol (v1.0) et ReduClean. https://norgro.no/wp-content/uploads/2020/07/ReduSol_SDS_EU_NO-NO_1.0-1komp.pdf ; https://res.cloudinary.com/baywa-ag-p/raw/upload/f_auto/MSDS_20195488.pdf

[20] HortiDaily. « Use the right cleaning agent to remove coating » ; « How to remove coatings from the greenhouse roof ». https://www.hortidaily.com/article/9236737/ ; https://www.hortidaily.com/article/6019560/

[21] Santamouris M., Synnefa A., Kolokotsa D., Dimitriou V., Apostolakis K. (2008). Passive cooling of the built environment – use of innovative reflective materials to fight heat islands and decrease cooling needs. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 3(2):71–82. https://academic.oup.com/ijlct/article/3/2/71/693634

[22] RODI Westland (14/10/2025). « Telers verantwoordelijk voor afvoer krijtwater uit kassen ». https://www.rodi.nl/westland/nieuws/15305/telers-verantwoordelijk-voor-afvoer-krijtwater-uit-kassen

[23] NIST. Standard Reference Material 2193a, solution saturée d'hydroxyde de calcium (pH 12,469 à 25 °C). https://tsapps.nist.gov/srmext/certificates/archives/2193a.pdf

[24] EN 16637-2:2023. Produits de construction — Évaluation de l'émission de substances dangereuses — Partie 2 : essai horizontal de lixiviation dynamique des surfaces. EN 16637-1 : guide pour la détermination des essais de lixiviation.

[25] Code civil, art. 640–641 ; CGCT, art. L2224-10 ; Code de la santé publique, art. L1331-10 ; Code de l'environnement, art. L211-1 et R214-1 (rubrique 2.1.5.0). https://www.legifrance.gouv.fr

[26] Communauté d'agglomération de la Riviera française (2026). Règlement du service public de gestion des eaux pluviales urbaines. https://www.riviera-francaise.fr/wp-content/uploads/2026/02/11-2026-REPC.pdf

[27] Règlement (UE) n° 528/2012 concernant la mise à disposition sur le marché et l'utilisation des produits biocides.

[28] National Lime Association. Hydrated lime in asphalt. https://www.lime.org/wp-content/uploads/fact-asphalt.pdf ; Baunetz Wissen, propriétés du bitume. https://www.baunetzwissen.de/flachdach/fachwissen/bitumendachbahnen/bitumeneigenschaften-und-zusammensetzung-156019

[29] ARMA. Water-soluble residue from asphalt roofing products. https://www.asphaltroofing.org/water-soluble-residue-from-asphalt-roofing-products-tobacco-juicing/

[30] RENOLIT Alkortec, résistance chimique. https://live.renolit.com/fileadmin/renolit/waterproofing_roofing/Documents/ALKORTEC/EN_tec-chem-best-eng-12-11-2012-def-nw.pdf

[31] NZ Steel, guide technique COLORSTEEL. https://nzsteel.co.nz/technical-resources/new-download-item-5 ; Lysaght, PAB02 compatibilité des métaux. https://cdn.dcs.lysaght.com/download/lysaght-product-advisory-bulletin-pab02-design-metal-and-timber-compatibility

[32] Reynaers, conditions de garantie 2023. https://reynaers.com/sites/default/files/public/2023-03/REYNAERS-guarantee%202023-EN%20%281%29.pdf ; Portland Cement Association, aluminium et maçonnerie. https://www.cement.org/materials-applications/masonry/masonry-construction/aluminum-frames-in-masonry-walls

[33] Rheinzink, Design and application. https://www.rheinzink.com/fileadmin/redaktion/RHEINZINK_TR/Downloads/Technical-Documents/Planning_Application/design-application-104568-v012-en.pdf ; VMZinc, compatibilités. https://www.vmzinc.com/en-in/technical-support/basic-principles/compatibility

[34] Galvanizers Association. https://galvanizing.org.uk/corrosion-performance-in-other-environments/ ; Copper Development Association. https://copper.org/applications/architecture/arch_dhb/arch-details/flashings_copings

[35] Nordkalk, FDS lait de chaux et scénarios d'exposition REACH $Ca(OH)_2$. https://www.nordkalk.com/wp-content/uploads/2023/01/Nordkalk-Milk-of-Lime-SDS-22.12.2022.pdf

[36] Ministère de la Santé des Bermudes (2017). Safe Water. https://www.gov.bm/sites/default/files/Safe%20Water%20-%202017.pdf ; Gouvernement des Bermudes, entretien des citernes. https://planning.gov.bm/index.php/proper-maintenance-of-tank-water-systems/

[37] EN 12518, chaux pour le traitement de l'eau destinée à la consommation humaine ; Länsstyrelsen Kalmar, chaulage des eaux acidifiées. https://www.lansstyrelsen.se/kalmar/miljo-och-vatten/atgarder-och-verksamheter-i-vatten/kalkning-av-forsurade-vatten.html

[38] Fraunhofer IBP (2023). Lessivage des façades par la pluie. https://fraunhofer.de/en/press/research-news/2023/october-2023/mathematical-model-predicts-what-is-leached-out-of-building-facades-by-the-rain.html

[39] Puglisi et al. (2021). Lime shading of greenhouses. https://iris.unibas.it/bitstream/11563/146976/1/Puglisi%20et%20al.%2c%20ATAE%202021.pdf ; NRDC, Ahmedabad cool roofs. https://www.nrdc.org/experts/nehmat-kaur/ahmedabad-cool-roofs-initiative-5th-heat-action-plan

[40] Building Limes Forum, application du badigeon. https://lime.org.uk/knowledge-base/limewash---application---application-of-limewash- ; la caséine dans le badigeon. https://lime.org.uk/knowledge-base/limewash---design---what-is-casein-and-why-is-it-added-to-limewash-

[41] Minerva Conservation, lait de chaux. https://www.minervaconservation.com/articles/lime-wash ; NPS/NCPTT (2007), essais de laits de chaux. https://www.nps.gov/subjects/ncptt/upload/2007-18.pdf

[42] Cajamar, effet de deux doses de blanchiment (Almería). https://publicacionescajamar.es/wp-content/uploads/2023/03/efecto-de-dos-dosis-de-blanqueo-sobre-1.pdf

Les sources web ont été consultées entre le 30 septembre et le 1er octobre 2026. Les calculs peuvent être reproduits dans le simulateur en ligne, dont les hypothèses avancées sont modifiables (EER, COP, prix, durées, préréglages CSTB et fabricant).