



NOTE D'ORIENTATION N° 4

Refroidissement passif des bâtiments publics

Guide à l'intention des praticiens
humanitaires



Table des matières

1	Introduction	10
1.1	Objectif et portée	10
1.2	Comment ressent-on la chaleur ?	13
1.3	Pourquoi les bâtiments se réchauffent-ils ?	14
1.4	Aperçu des stratégies de refroidissement passif	18
1.5	Choisir et mettre en œuvre des stratégies de refroidissement passif.....	19
1.5.1	Comment utiliser ce guide	19
1.5.2	Climats secs.....	21
1.5.3	Climats humides.....	23
1.5.4	Tableau des stratégies	25
2	Stratégies.....	29
2.1	Utilisation de matériaux de construction à haute capacité de stockage thermique.....	29
2.2	Ventilation naturelle – aperçu des différentes approches en matière de ventilation.....	37
2.2.1	Ventilation simple par le vent	46
2.2.2	Ventilation par tirage.....	50
2.2.3	Ventilation stratégique.....	54
2.2.4	Ventilation par cour intérieure.....	58
2.2.5	Murs latéraux.....	62
2.3	Peinture thermique	65
2.4	Protection des toits et barrières radiantes	70

2.5	Végétation.....	77
2.6	Protection des fenêtres et des murs.....	82
2.7	Isolation.....	89
2.8	Forme des bâtiments et zonage	101
2.9	Refroidissement actif et refroidissement par évaporation directe.....	106
3	Annexes.....	116
3.1	Conclusions des études menées sur l'efficacité de stratégies spécifiques...116	
3.1.1	Utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique117	
3.1.2	Ventilation naturelle	118
3.1.3	Peinture thermique.....	119
3.1.4	Protection du toit.....	120
3.1.5	Végétation.....	121
3.1.6	Protection des fenêtres et des murs	123
3.1.7	Isolation	124
3.1.8	Orientation et forme du bâtiment.....	126
3.1.9	Stratégies de refroidissement par évaporation directe dans une étude menée à Djeddah (zone aride).....	127
3.2	Conclusion des études sur les comparaisons et les combinaisons de stratégies.....	128
3.2.1	Étude comparative de différentes stratégies (climat aride).....	128
3.2.2	Étude comparative de l'isolation et du stockage élevé de chaleur (climat méditerranéen).....	130
3.2.3	Étude comparative de plusieurs stratégies (climat aride).....	132
3.2.4	Étude comparative dans trois climats différents.....	134

3.2.5	Étude comparative de l'isolation et de la peinture thermique (climat tropical)	136
3.2.6	Étude comparative de quatre stratégies en Chine (région subtropicale)	137
3.3	Méthodologie	139
4	Glossaire	141
5	Bibliographie	143



Besoin de trouver quelque chose rapidement ?

Pour naviguer dans ce document, cliquez simplement sur la section correspondante indiquée ci-dessus. Vous pouvez également accéder directement aux différentes sections à tout moment en utilisant la barre de navigation située en haut de chaque page.

Liste des encadrés

Encadré 1 : Masse thermique	30
Encadré 2 : Ventilation simple par le vent	46
Encadré 3 : Ventilation par tirage	50
Encadré 4 : Ventilation stratégique	54
Encadré 5 : Ventilation par cour intérieure	58
Encadré 6 : Murs latéraux	62
Encadré 7 : Peinture thermique	65
Encadré 8 : Végétation	77
Encadré 9 : Protection des fenêtres et des murs	82
Encadré 10 : Isolation	89
Encadré 11 : Forme des bâtiments et zonage	101
Encadré 12 : Refroidissement actif	106

Liste des figures

Figure 1 : Conduction, convection et rayonnement	14
Figure 2 : Conduction, convection et rayonnement dans les bâtiments	15
Figure 3 : Catégorisation des stratégies	19

Figure 4 : Utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique	29
Figure 5 : Stockage et libération de chaleur	32
Figure 6 : Ventilation naturelle	37
Figure 7 : Ventilation des établissements de santé	40
Figure 8 : Ventilation par tirage	50
Figure 9 : Exemples de ventilation par tirage	52
Figure 10 : Ventilation par cour intérieure : effet de cheminée (cour 2) et ventilation par le vent (cour 1)	60
Figure 11 : Ventilation naturelle par le vent et par effet de cheminée (tirage) dans un hôpital avec cour (couloir extérieur)	60
Figure 12 : Utilisation de murs latéraux avec plusieurs fenêtres	63
Figure 13 : Ouverture des fenêtres lorsque le vent souffle dans le bâtiment	64
Figure 14 : Peinture thermique	65
Figure 15 : Protection du toit	70
Figure 16 : Protection de toit, plafond, isolation et barrière radiante dans une coupe de toit	72
Figure 17 : Tentes ombragées par des filets d'ombrage	75
Figure 18 : Végétation	77
Figure 19 : Feuillus fournissant de l'ombre en été et assurant des apports solaires en hiver	79
Figure 20 : Protection des fenêtres et des murs	82
Figure 21 : Dispositifs d'ombrage pour fenêtres et murs	83

Figure 22 : Autres dispositifs d'ombrage pour fenêtres et murs	85
Figure 23 : Différents exemples de dispositifs d'ombrage horizontaux	87
Figure 24 : Isolation	89
Figure 25 : Forme des bâtiments et zonage	101
Figure 26 : Systèmes de refroidissement actif	106

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau des stratégies	26
Tableau 2 : Comparaison entre différents types de matériaux à haute capacité de stockage thermique	35
Tableau 3 : Comparaison entre différents types de peintures thermiques	69
Tableau 4 : Comparaison des différents types d'isolation	96
Tableau 5 : Comparaison des dispositions	104
Tableau 6 : Comparaison entre différents types de matériaux utilisés pour les filtres des rafraîchisseurs d'air par évaporation	112
Tableau 7 : Comparaison entre différents types de méthodes de refroidissement par évaporation directe	114
Tableau 8 : Efficacité des matériaux à haute capacité de stockage thermique	117
Tableau 9 : Efficacité de la ventilation naturelle	118
Tableau 10 : Efficacité de la peinture thermique	119
Tableau 11 : Efficacité de la protection du toit	120

Tableau 12 : Efficacité de la végétation	121
Tableau 13 : Efficacité de la protection des fenêtres et des murs	123
Tableau 14 : Efficacité de l'isolation	124
Tableau 15 : Orientation et forme du bâtiment	126
Tableau 16 : Comparaison de différentes stratégies dans un climat aride, Riyad	129
Tableau 17 : Comparaison de différentes stratégies dans un contexte méditerranéen	131
Tableau 18 : Comparaison de différentes stratégies dans un contexte aride, Jordanie	132
Tableau 19 : Comparaison des stratégies dans trois climats différents	134
Tableau 20 : Comparaison des stratégies dans un contexte tropical	136
Tableau 21 : Comparaison de quatre études dans un contexte subtropical	137

Acronymes et abréviations

GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HCR	Haut Commissariat des Nations Unies pour les réfugiés
OMS	Organisation mondiale de la Santé
PSE	Polystyrène expansé
PU	Polyuréthane
XPS	Polystyrène extrudé

Citation

Ishrat, T.Z. et Knox Clarke, P. (2025). Refroidissement passif des bâtiments publics, Oxfam et ADAPT Initiative. Oxford.

Remerciements

Cette note d'orientation fait partie d'une série de 12 notes d'orientation sur les changements climatiques et le secteur humanitaire WASH. Elle a été financée par le ministère fédéral allemand des Affaires étrangères. Nous tenons à remercier Syed Yasir Ahmed, Andy Bastable, Mihir Bhatt, David Coley, Clementine Favier, Bill Flinn, Vivek Gilani, Eric van den Ham, Dher Hayo, Francis Moran, Liz Palmer, Ben Roberts, Martin Tenpierik et Dayan Woldemichael pour leurs précieux conseils et commentaires qui ont contribué à l'élaboration de ce document. Nous remercions également International Medical Corps, et en particulier ses équipes nationales au Mali et en République centrafricaine, qui ont testé ces recommandations sur le terrain et émis des observations extrêmement utiles. Les auteurs assument l'entière responsabilité des erreurs éventuelles.

Avertissement : Les noms ou liens vers les sites web des fabricants ne constituent en aucun cas des recommandations de produits. Ils sont uniquement fournis à titre d'exemple, à des fins d'orientation.

Édition : Peta Sandison

Conception : Ibex Ideas

Image de couverture : Mint Images | Envato Elements

1 Introduction

1.1 Objectif et portée

En raison des changements climatiques, les températures élevées constituent une menace croissante pour les communautés de nombreuses régions du monde. D'ici les années 2030, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prévoit que le nombre de vagues de chaleur dans le monde sera multiplié par 8¹ [1]. Ces périodes de chaleur extrême sont très dangereuses et entraînent une augmentation significative de la mortalité [2], [3], en particulier chez les personnes âgées, les personnes souffrant de pathologies préexistantes, les femmes enceintes et les nourrissons [4]. Les effets du climat peuvent être amplifiés lorsque les bâtiments ne sont pas adaptés aux risques liés à la chaleur, en particulier lorsqu'ils sont utilisés par des personnes déjà vulnérables aux effets de la chaleur. Outre leurs effets sur la santé, les environnements intérieurs chauds peuvent entraîner un manque de concentration et avoir un effet négatif sur les performances scolaires des élèves [5].

Ce document fournit des conseils pour aider les acteurs humanitaires à intégrer des éléments de refroidissement à faible coût dans les bâtiments publics utilisés dans le cadre des interventions humanitaires, tels que les centres de santé primaire, les établissements scolaires et les espaces adaptés aux enfants. La plupart des éléments pris en compte relèvent du « refroidissement passif », une méthode qui consiste à refroidir par des moyens naturels sans recourir à des systèmes mécaniques nécessitant de l'énergie. Un petit nombre de méthodes de « refroidissement actif » à faible coût (systèmes mécaniques nécessitant de l'énergie) sont également brièvement abordées.



À qui s'adresse ce document ?

Cette note d'orientation est destinée aux responsables humanitaires chargés de projets impliquant la construction, la conversion ou l'entretien de bâtiments publics, en particulier les centres de santé et les établissements scolaires. Elle ne suppose pas que le lecteur ait des connaissances en architecture ou en ingénierie et est rédigée dans un langage non technique. Elle vise à aider ces responsables à collaborer avec des professionnels techniques (constructeurs et ingénieurs recrutés localement) et à étayer les décisions relatives à la conception des bâtiments et aux budgets. Lorsque cela est nécessaire, des détails techniques et spécifications utiles aux ingénieurs et aux spécialistes de la construction sont mentionnés, et dans la mesure du possible, des liens vers ces documents sont fournis.



Quels types de bâtiments ?

Ce guide couvre les structures temporaires, comme les tentes, et les bâtiments provisoires ou permanents construits à la fois avec des matériaux industriels, tels que des parpaings et des tôles ondulées, et avec des matériaux de construction locaux, tels que des briques d'adobe. L'accent est principalement mis sur les bâtiments permanents, car ceux-ci constituent la majorité des bâtiments publics dans les contextes humanitaires et offrent un plus large éventail de possibilités de refroidissement.

Il porte sur les stratégies de rénovation des bâtiments existants, ainsi que sur les stratégies relatives aux nouveaux bâtiments. Il contient un ensemble de stratégies pour les zones climatiques chaudes (où le refroidissement est plus prioritaire que le chauffage) – zones tropicales (classification de Köppen A) et zones climatiques chaudes et sèches (classification de Köppen BWh et BSh). Bien que ces stratégies puissent également s'appliquer à d'autres zones climatiques, telles que les climats subtropicaux et méditerranéens, elles ne sont pas conçues pour les climats plus froids, tels que les zones tempérées, froides et sèches ou polaires.



Sur quoi ce document est-il fondé ?

Ce document s'appuie sur des publications évaluées par des pairs et des publications non officielles de grande qualité consacrées aux stratégies de refroidissement passif dans les zones climatiques chaudes. Ces recommandations ont été testées sur le terrain par International Medical Corps au Mali et en République centrafricaine.

Il n'existe pas beaucoup d'études consacrées aux stratégies de refroidissement passif pour les centres de santé, c'est pourquoi la littérature relative à d'autres types de bâtiments a également été prise en compte.

Pour plus d'informations sur la manière dont ces recommandations ont été élaborées, consulter la section méthodologique ([annexe 3.3](#)).



Considérations supplémentaires sur la portée

Ce guide adopte une approche multirisque. Dans la mesure du possible, les stratégies tiennent compte des risques supplémentaires liés aux vents violents, aux fortes précipitations et aux inondations en plus de la chaleur extrême (par exemple, une stratégie particulière est-elle pertinente dans des situations où l'on peut s'attendre à des vents violents ?).

Il ne couvre pas toutes les stratégies de refroidissement passif ; par exemple, les stratégies qui peuvent être efficaces mais qui nécessitent un niveau élevé d'expertise technique ou des ressources financières importantes pour être mises en œuvre ne sont pas incluses. Parmi les exemples de stratégies qui ont été exclues car elles ne sont généralement pas applicables dans les contextes humanitaires, on peut citer les toits végétalisés, le refroidissement passif par courant descendant, les tours à vent, le refroidissement par évaporation indirecte, les murs Trombe, le refroidissement par la terre, le refroidissement par rayonnement et les bassins sur les toits. L'étanchéité aux intempéries et l'isolation des fenêtres ont également été laissées de côté, car elles s'appliquent davantage aux bâtiments climatisés qu'aux bâtiments refroidis de manière passive.

Ce guide traite principalement des aspects physiques des bâtiments plutôt que des aspects sociaux, ces derniers dépendant fortement du contexte. Dans certains cas, les approches décrites peuvent ne pas être acceptables sur le plan social ou culturel. Des propositions sont faites pour que l'utilisateur veuille à ce que toutes les caractéristiques prévues soient appropriées sur les plans social et culturel.

Les recommandations fournies dans ce guide doivent être lues en conjonction avec les normes et directives nationales ou sectorielles existantes relatives à la construction des bâtiments publics. Elles sont destinées aux professionnels de l'aide humanitaire, mais sont de nature générale ; elles ne fournissent pas de recommandations spécifiques pour un bâtiment particulier.

1.2 Comment ressent-on la chaleur ?

Le degré de confort ou d'inconfort des personnes à une température donnée (confort thermique) dépend à la fois de facteurs physiologiques qui déterminent la manière dont le corps humain interagit avec son environnement, et des circonstances spécifiques à chaque individu.

En général, le corps humain réagit à une chaleur excessive (thermorégulation) de deux manières. Il utilise le système circulatoire pour apporter de la chaleur à la peau, qui est ensuite diffusée dans l'air. Il utilise également la transpiration, qui s'évapore dans l'air par la peau et la refroidit.

Les facteurs environnementaux, en particulier le flux d'air et l'humidité, ont une influence importante sur l'efficacité avec laquelle ces mécanismes refroidissent le corps. Le flux d'air, sous forme de vent ou de ventilation, peut augmenter l'efficacité du refroidissement car il chasse la poche d'air chaud autour du corps (produite lorsque le corps rayonne de la chaleur) et la remplace par de l'air frais. Cependant, cela ne fonctionne que si le vent est plus frais que l'air autour du corps qu'il remplace. L'humidité de l'air détermine l'efficacité avec laquelle le corps se refroidit par la transpiration. Si l'air est très humide, la transpiration ne s'évapore pas facilement et le corps a beaucoup plus de mal à se refroidir. C'est pourquoi, si la température de l'air est de 35 °C et l'humidité relative de 65 %, la sensation de chaleur est la même que dans un environnement où la température de l'air est de 49 °C et l'humidité relative de 0 % [6]. Cet effet de l'humidité n'est pertinent qu'à des températures supérieures ou égales à 32 °C [7], cité dans [8]. **Cela montre l'importance de l'humidité, ainsi que de la chaleur, comme menaces pour la santé humaine.**

Ces processus physiologiques généraux sont influencés par des circonstances individuelles. Chaque personne a un taux métabolique différent (qui influence la quantité

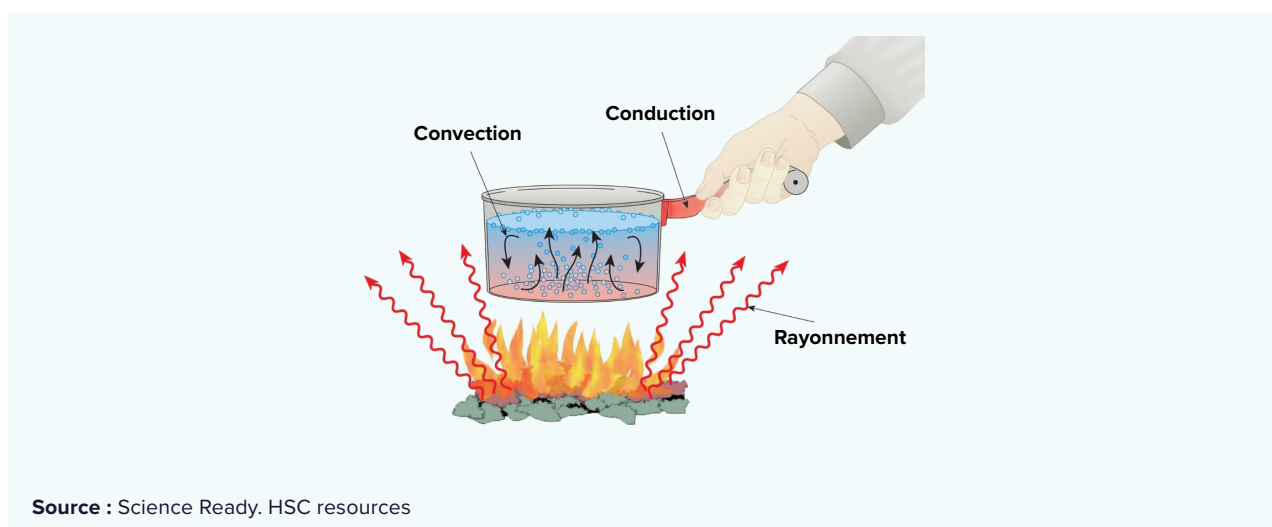
de chaleur produite par son corps). Les personnes qui pratiquent une activité physique ont tendance à avoir plus chaud que celles qui n'en pratiquent pas (dans une étude, par exemple, des infirmières ont ressenti une gêne thermique à une température où les patients se sentaient à l'aise, en raison de leur niveau d'activité plus élevé [9]). Les vêtements portés déterminent également la capacité à se rafraîchir, et certaines personnes ont des systèmes de thermorégulation plus ou moins efficaces. En général, les personnes âgées, les femmes enceintes et les jeunes enfants ont plus de difficultés à évacuer la chaleur. Les personnes atteintes de maladies non transmissibles, telles que les maladies cardiovasculaires, le diabète, les problèmes respiratoires, les maladies rénales et la maladie d'Alzheimer ou de Parkinson, sont également moins aptes à réguler leur température corporelle [9]. Par conséquent, tous les occupants d'un bâtiment n'ont pas les mêmes besoins en matière de confort thermique. Pour plus d'informations, voir la note d'orientation n° 12 : *Réponses programmatiques aux chaleurs extrêmes*.

1.3 Pourquoi les bâtiments se réchauffent-ils ?

Les bâtiments sont affectés par différentes sources de chaleur dans l'environnement. La chaleur provient du rayonnement solaire direct. Mais elle provient également indirectement du rayonnement solaire qui a été « stocké » dans l'environnement : dans le sol, dans d'autres bâtiments ou dans l'air. La chaleur peut également être générée par les personnes présentes dans les bâtiments (processus métaboliques) et par l'utilisation de machines et d'éclairages.

La chaleur est transférée de l'environnement vers un bâtiment de trois manières principales :

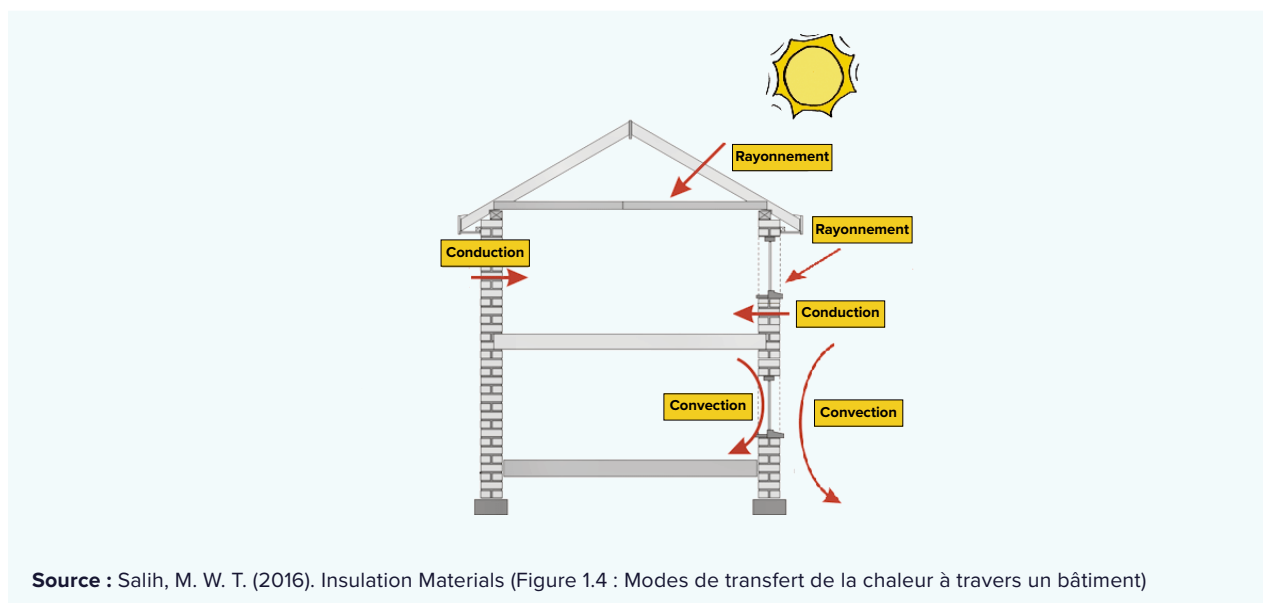
Figure 1 : Conduction, convection et rayonnement



Source : Science Ready. HSC resources

1. **Conduction** : processus par lequel la chaleur se propage à travers des matériaux solides, par exemple lorsqu'une cuillère dans un bol de soupe chaude transfère la chaleur le long de son manche vers votre main. De même, la chaleur stockée dans le sol peut être transférée à un bâtiment par conduction.
2. **Convection** : processus par lequel la chaleur se déplace à travers les liquides et les gaz. La convection provoque la montée de l'air plus chaud et plus léger (créant une zone de basse pression) et la descente de l'air plus froid et plus dense (créant une zone de haute pression). Le vent circule d'une zone de haute pression vers les zones de basse pression. Dans un bâtiment, la chaleur peut être transférée lorsque de l'air chaud extérieur pénètre dans le bâtiment.
3. **Rayonnement** : transmission d'énergie par ondes électromagnétiques (provenant du soleil, par exemple). L'on ressent la chaleur rayonnante lorsque l'on sent la chaleur du soleil ou d'un feu. Elle se propage en ligne droite et réchauffe directement les objets solides. Dans un bâtiment, les murs et les toits absorbent la chaleur rayonnante du soleil. Ils peuvent également absorber la chaleur rayonnée par d'autres bâtiments ou par le sol.

Figure 2 : Conduction, convection et rayonnement dans les bâtiments



Les bâtiments se réchauffent pour trois raisons principales : les conditions extérieures, la conception et la construction du bâtiment, ainsi que le comportement des utilisateurs et l'utilisation du bâtiment [12]. Elles sont abordées plus en détail ci-dessous.

1. Conditions extérieures :

L'emplacement d'un bâtiment est l'un des facteurs déterminants du risque de surchauffe les plus importants. Les conditions climatiques (températures, direction du vent et trajectoire du soleil) varient selon les endroits, de même que les conditions environnementales dans un endroit donné.

- **Absence d'ombrage** : les bâtiments exposés à la lumière directe du soleil sans ombrage provenant de structures ou d'arbres à proximité absorbent plus de chaleur (car ils sont exposés à un rayonnement solaire plus important).
- **Barrières contre le vent** : les protections naturelles (telles que les arbres) ou artificielles (provenant, par exemple, d'autres bâtiments) contre le vent modifient la circulation de l'air, perturbant les effets potentiels de chauffage ou de refroidissement de celle-ci.
- **Orientation** : les bâtiments dont les longues parois sont orientées vers l'est et l'ouest reçoivent un ensoleillement à faible inclinaison, plus difficile à ombrager que celles qui sont orientées vers le nord/sud. Les murs sud (hémisphère nord) ou nord (hémisphère sud) non ombragés sont exposés au soleil toute la journée.

2. Conception et construction des bâtiments :

La conception et les matériaux utilisés dans un bâtiment peuvent aggraver la surchauffe :

- **Ouvertures mal conçues** : lors des journées chaudes, les grandes fenêtres et portes non ombragées peuvent laisser entrer un ensoleillement excessif et de l'air chaud qui réchauffent l'intérieur.
- **Matériaux de construction** : les matériaux légers et mal isolés peuvent rapidement absorber la chaleur, rendant le bâtiment plus chaud. Les matériaux de toiture non ombragés ou mal isolés intensifient la chaleur sous la lumière directe du soleil.
- **Ventilation insuffisante** : les bâtiments dotés de systèmes de ventilation inadéquats ralentissent les processus de convection et ne parviennent pas à expulser l'air chaud. Un mauvais emplacement des entrées et sorties d'air réduit la circulation de l'air, emprisonnant la chaleur et rendant l'intérieur inconfortablement chaud.

3. Comportement des utilisateurs et utilisation des bâtiments :

La surchauffe peut également résulter de la manière dont les bâtiments sont utilisés :

- **Ouvertures bloquées** : si les fenêtres ou les points de ventilation sont fermés ou scellés pour empêcher la poussière d'entrer, le flux d'air est réduit et la chaleur s'accumule.
- **Utilisation non prévue** : la conception des bâtiments peut ne pas correspondre à la manière dont les occupants les utilisent, par exemple s'ils ferment les ouvertures pour des raisons d'intimité ou de sécurité, ce qui limite la ventilation et augmente l'accumulation de chaleur.
- **Augmentation de la consommation d'énergie** : l'utilisation accrue d'équipements électroniques, tels que les ordinateurs et l'éclairage, peut entraîner une accumulation de chaleur.

- **Augmentation du nombre d'occupants** : cela signifie que davantage de personnes expirent de l'air humide. Cela augmente l'humidité, ce qui peut causer une sensation d'inconfort. De plus, le corps génère de la chaleur, ce qui signifie qu'une occupation à forte densité entraînera une chaleur supplémentaire.

La conception du bâtiment contribue à son degré de réchauffement. Les éléments de conception peuvent également contribuer au niveau d'humidité interne et à la circulation de l'air, ce qui affecte la température et la façon dont elle est ressentie par les utilisateurs du bâtiment.

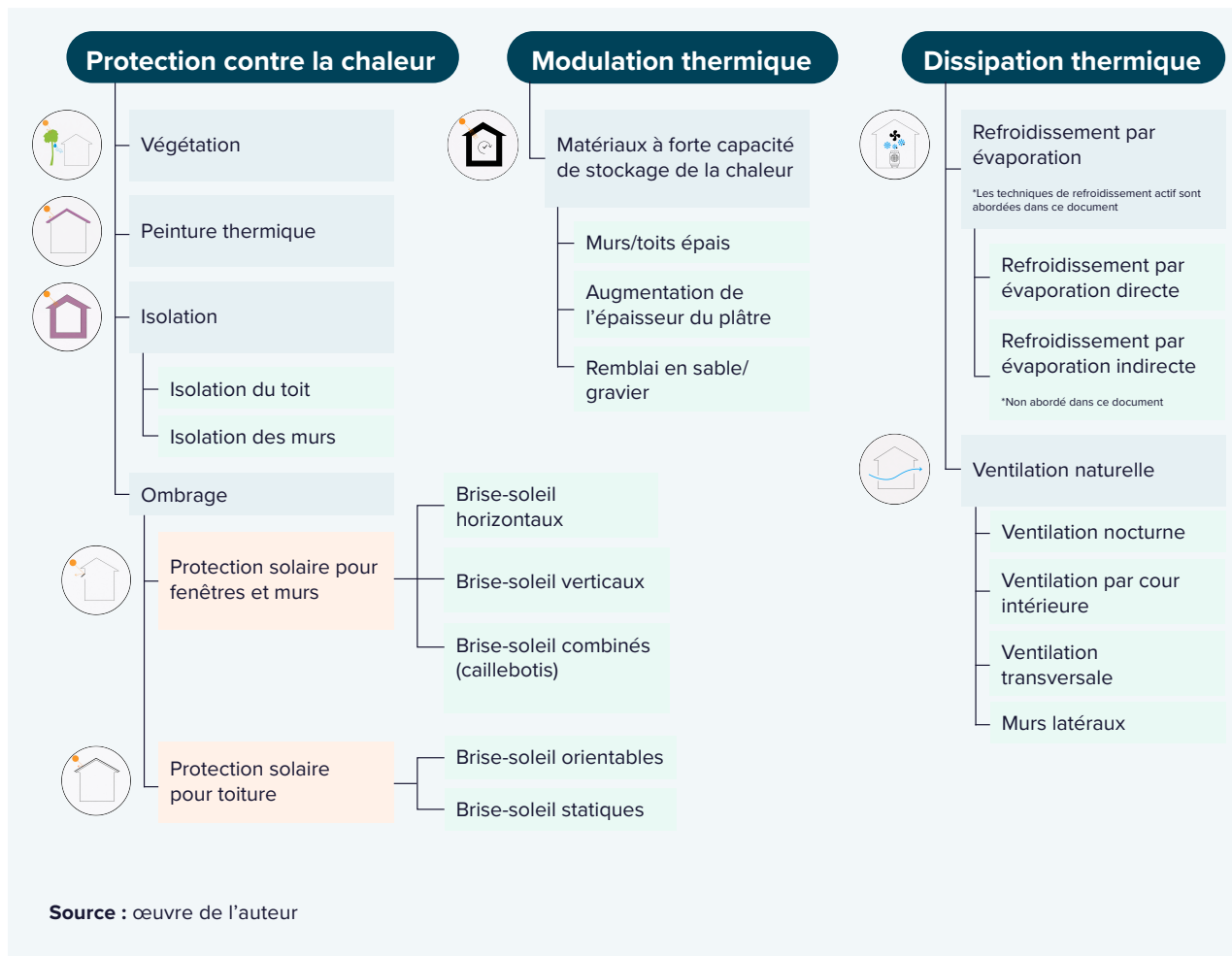
1.4 Aperçu des stratégies de refroidissement passif

Les stratégies de refroidissement passif peuvent être regroupées en trois catégories principales : protection contre la chaleur, modulation de la chaleur et dissipation de la chaleur [13].

- **Protection contre la chaleur** : consiste à protéger le bâtiment contre l'accumulation de chaleur provenant du rayonnement solaire direct. Cela peut se faire soit par une couche protectrice, comme un ombrage ou une couche de peinture thermique, soit en modifiant le microclimat par l'ajout de végétation ou de plans d'eau [14].
- **Modulation thermique** : cette approche convient aux endroits où la différence entre les températures diurnes et nocturnes est importante (souvent dans les climats secs). Elle consiste à concevoir le bâtiment de manière à « égaliser » les fortes fluctuations de température entre le jour et la nuit : stocker la chaleur dans la structure pendant la journée, puis la libérer progressivement pendant la nuit [14]. Les techniques de modulation thermique dans les bâtiments impliquent l'utilisation de matériaux de construction capables de stocker de grandes quantités de chaleur.
- **Dissipation thermique** : englobe des techniques qui évacuent l'excès de chaleur d'un bâtiment vers une zone ou un matériau plus frais, généralement appelé « dissipateur thermique ». Le dissipateur thermique doit être à une température inférieure à celle du bâtiment [14]. L'environnement (air, eau, ciel) peut être utilisé comme dissipateur thermique. Par exemple, si un bâtiment est chaud mais que le ciel nocturne est plus frais, la chaleur du bâtiment peut être évacuée vers le ciel.

La plupart des techniques de dissipation thermique abordées dans ce document d'orientation incluent la ventilation.

Figure 3 : Catégorisation des stratégies



1.5 Choisir et mettre en œuvre des stratégies de refroidissement passif

1.5.1 Comment utiliser ce guide

Ce guide contient des informations sur diverses stratégies de refroidissement passif pouvant être utilisées dans les bâtiments publics dans des contextes humanitaires.

Il est recommandé de suivre les étapes suivantes pour choisir et mettre en œuvre la ou les stratégies les plus appropriées pour un bâtiment donné.

Étape 1 : Identification du contexte

Plus précisément, posez-vous les questions suivantes :

1. S'agit-il d'un bâtiment neuf ou la stratégie nécessite-t-elle la rénovation d'un bâtiment existant ?
2. S'agit-il d'un bâtiment temporaire, permanent ou transitoire ?
3. Est-il possible d'utiliser un système de refroidissement actif à faible coût dans le bâtiment (s'il existe un approvisionnement énergétique fiable) ou seules des techniques de refroidissement passif sont-elles possibles ?
4. Le bâtiment est-il situé dans une région sèche/aride (classification de Köppen BWh et BSh) ou dans une région plus humide (classification de Köppen Am, Af, Aw)².

Étape 2 : Élaboration d'une liste des stratégies potentielles à partir des informations générales fournies dans cette section.

Grâce à ces informations, vous pouvez réduire les stratégies possibles à celles qui sont les plus appropriées au contexte et lire les conseils applicables (par exemple, pour le refroidissement passif dans les [climats secs](#) ou [humides](#)) afin de vous faire une idée générale des différentes approches adaptées à différents contextes. Consultez ensuite le [tableau des stratégies](#) pour créer une liste des stratégies possibles.

Étape 3 : Sélection des stratégies pertinentes

Pour chaque stratégie de la liste, lisez le résumé situé au début de chaque stratégie dans la [section 2](#). Si nécessaire, chaque stratégie (telle que la ventilation naturelle ou l'ombrage du toit) comporte des détails supplémentaires sur les considérations relatives à la conception, tels que la manière d'appliquer la stratégie, ses inconvénients, les situations dans lesquelles la stratégie ne peut pas être utilisée et des informations sur son efficacité.

Dans la mesure du possible, discutez des stratégies potentielles avec un ingénieur en bâtiment et/ou les constructeurs qui seront chargés de les mettre en œuvre.

Ce guide examine l'efficacité de chaque stratégie en matière de refroidissement d'un bâtiment selon plusieurs études. Comme celles-ci ont été menées dans des contextes différents, elles n'ont pu mesurer l'efficacité que dans ce contexte spécifique. Il est donc extrêmement difficile de faire des généralités sur l'efficacité d'une stratégie particulière dans tous les contextes. Néanmoins, les informations sur l'efficacité contenues dans ce guide ont été synthétisées de façon à éclairer la prise de décision, même si elles ne peuvent être utilisées comme seul critère pour prendre une décision.

Étape 4 : Mise en œuvre

Chaque stratégie comporte une section « Lectures complémentaires » contenant des conseils techniques supplémentaires qui peuvent servir aux constructeurs qui mettent en œuvre les adaptations (par exemple, des conseils sur l'installation d'une isolation).

Les utilisateurs et les gestionnaires des bâtiments doivent être informés des mesures qu'ils doivent prendre pour garantir l'efficacité de la stratégie. L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) [16] et les essais pilotes menés concernant ce guide ont souligné l'importance des éléments suivants :

- *Élaborer un manuel relatif à l'exploitation et à la maintenance* du système de refroidissement passif, même pour les systèmes à faible technologie dans les établissements de santé. Ce manuel devrait fournir des informations sur le fonctionnement du système de refroidissement passif et des conseils sur les mesures à prendre ou à éviter pour en garantir l'efficacité (par exemple, les horaires de ventilation du bâtiment, les éventuelles instructions relatives au fonctionnement des systèmes de refroidissement actif peuvent comprendre des conseils indiquant aux patients de ne pas ouvrir les fenêtres sauf instruction contraire).
- *Inclure ces informations dans les programmes de formation* destinés au personnel et aux utilisateurs du bâtiment. Il peut s'agir d'informations sur la ventilation et l'ouverture/la fermeture des fenêtres en cas de stress thermique dû au chaud/froid, et sur la mise hors tension des appareils électriques afin de réduire la chaleur interne et d'économiser l'énergie [92].

1.5.2 Climats secs

Les climats secs sont souvent associés à de fortes fluctuations entre les températures diurnes et nocturnes et à des niveaux plus élevés de rayonnement solaire direct.

Dans l'ensemble, les stratégies les plus efficaces dans les climats chauds et secs visent à ombrager les surfaces exposées au soleil, à ajouter de l'humidité, à réduire les apports thermiques et à moduler les fortes fluctuations de température. Cela se traduit souvent par des bâtiments aux murs et aux toits épais.

- **Utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique** (voir la [section 2.1](#)) : dans les endroits chauds et secs, les journées peuvent être très chaudes, mais les nuits être froides. Si un bâtiment dispose d'une enveloppe extérieure épaisse (murs et toit) capable de stocker la chaleur (masse thermique élevée), il peut rester frais à l'intérieur pendant les journées chaudes et libérer lentement la chaleur lorsque cela est nécessaire pendant les nuits plus fraîches [15]. Si la chaleur n'est pas nécessaire pendant la nuit (la nuit étant plus fraîche que la journée, mais encore trop chaude), les fenêtres peuvent être ouvertes pour libérer la chaleur (voir la [section 2.2.3](#) pour plus de détails sur la ventilation nocturne).

Il est recommandé d'avoir un toit qui réfléchit bien la chaleur. Un toit peint en blanc uni (ou recouvert d'un autre revêtement réfléchissant) peut être très efficace (voir [Peinture thermique](#)). Dans les régions où les nuits/hivers sont froids, une isolation supplémentaire du toit est souhaitable (voir [Isolation](#)) si une peinture thermique est appliquée sur le toit. Une autre solution consiste à utiliser un pare-soleil amovible (voir [Protection des toits et barrières radiantes](#)), en utilisant une couverture temporaire au lieu d'une couche réfléchissante/pare-soleil permanente. Celui-ci peut être rétracté pour permettre le stockage de la chaleur lorsqu'il fait froid, et déployé pour bloquer la chaleur du soleil pendant les journées chaudes.

Dans les climats chauds et secs, lorsqu'il fait très chaud à l'extérieur, il est recommandé de réduire au minimum la ventilation pendant la journée (voir la [section 2.2.3](#)) ; la ventilation doit être suffisante uniquement pour maintenir la qualité de l'air intérieur. La ventilation nocturne est importante pour permettre à l'air chaud de quitter le bâtiment pendant la nuit.

- Dans les climats chauds et secs, **l'isolation** sera souvent constituée d'un matériau à faible conductivité thermique avec une couche extérieure réfléchissante (afin de réduire l'impact du rayonnement solaire). Il convient de faire preuve de prudence avec la stratégie des matériaux à haute capacité de stockage thermique (ci-dessus), car la ventilation peut interférer avec la circulation de la chaleur pendant la nuit.
- **Refroidissement par évaporation directe** : lorsqu'elle s'évapore, l'eau peut avoir un effet rafraîchissant dans les climats chauds et secs. Cependant, il faut veiller à ne pas saturer l'air, car cela peut entraîner la formation de moisissures, particulièrement dangereuses dans les cliniques [16]. Une stratégie passive efficace de refroidissement par évaporation directe consiste à suspendre des tissus humides devant les fenêtres. Sinon, si les ressources sont disponibles, des méthodes de refroidissement direct actives peuvent être utilisées, telles que les rafraîchisseurs d'air par évaporation, bien que l'humidité doive être contrôlée (voir la [section 2.9](#)).

Dans les climats chauds et secs, le chauffage en hiver peut également être important. Vérifier les températures moyennes mensuelles pendant les mois d'hiver pour l'emplacement concerné. Le chauffage en hiver peut être souhaitable, c'est pourquoi les protections solaires pour fenêtres et murs doivent être conçues de manière à laisser entrer le soleil en hiver, mais à bloquer le soleil en été. Cela est possible grâce à des stores réglables, tels que des volets roulants, ou à des avant-toits de taille appropriée sur les façades orientées vers l'équateur. Voir la [section « Protection des fenêtres et des murs »](#) et la [section 3.1](#) pour plus de détails. L'utilisation de feuillus est encouragée pour la même raison : ombrager en été tout en permettant le chauffage en hiver.

1.5.3 Climats humides

L'humidité augmente la perception et l'effet des températures. Les environnements très humides peuvent entraîner des problèmes de santé à des températures plus basses que dans les environnements secs (voir [Comment ressent-on la chaleur ?](#)). Dans l'ensemble, dans les climats chauds et humides, l'objectif est d'éliminer la chaleur et l'humidité dans la mesure du possible (par exemple, par la ventilation), d'ombrager les surfaces et de réduire les apports thermiques. Une enveloppe légère, respirante et ombragée (murs et toit légers) est recommandée.

La différence entre les températures diurnes et nocturnes tend à être plus faible dans les climats humides, de sorte que les stratégies qui reposent sur le principe de la réduction des fluctuations entre les températures diurnes et nocturnes (telles que l'utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique) sont moins efficaces (voir la [section 2.1](#)). Par conséquent, à moins que l'emplacement ne connaisse des fluctuations importantes, d'autres stratégies peuvent s'avérer plus efficaces.

Si le bâtiment est activement refroidi, la condensation à l'intérieur de la construction peut constituer un risque (voir la [section 2.9](#) pour plus de détails).

Les murs doivent être légers et respirants afin d'évacuer l'humidité de l'intérieur [15]. La pose d'une couverture non respirante sur les parois, par exemple une bâche pour protéger de la pluie, emprisonnera l'humidité à l'intérieur, ce qui causera un inconfort thermique.

- La **ventilation naturelle** est la principale méthode de refroidissement passif dans de nombreux environnements humides. La présence d'une brise peut notamment améliorer le niveau de confort. Si l'orientation du bâtiment ou des fenêtres n'est pas alignée sur la direction dominante du vent, des murs latéraux peuvent être utilisés pour diriger le flux d'air à l'intérieur du bâtiment (voir [Murs latéraux](#)). En plus d'évacuer la chaleur, la ventilation naturelle est très importante pour éliminer l'humidité de l'air intérieur (ce qui diminue la température apparente pour les utilisateurs du bâtiment et réduit les risques de moisissure, un aspect particulièrement important dans les établissements de santé [16]). L'élimination de l'humidité dépend toutefois d'un taux d'humidité extérieur inférieur à celui de l'intérieur [20].
- La **ventilation nocturne** est moins efficace dans les climats humides que dans les climats chauds et secs, mais elle permet néanmoins d'évacuer une partie de la chaleur d'un bâtiment. Une stratégie plus flexible (par exemple, ouvrir les fenêtres à tout moment lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure) fonctionne mieux qu'une stratégie fixe, en particulier dans les zones à forte densité comme les salles d'hôpital. Il convient toutefois de faire preuve de prudence, car de l'air humide peut être aspiré à l'intérieur. De plus, pendant la journée, l'humidité s'accumule à l'intérieur en raison de l'occupation et de l'utilisation du bâtiment.

Les solutions passives de contrôle de l'humidité sont difficiles à mettre en œuvre lorsque l'humidité extérieure et intérieure est élevée. Dans ces environnements, si les ressources sont disponibles, il est recommandé d'utiliser des déshumidificateurs pour éliminer l'humidité, car ils consomment relativement peu d'énergie [21].

- En général, l'**isolation** est une méthode de refroidissement passif beaucoup moins efficace dans les climats chauds et humides que dans les climats chauds et secs [17]. Si elle est utilisée, elle doit être choisie sur la base d'une gestion à la fois de la chaleur et de l'humidité [18]. Des matériaux tels que le plâtre de gypse peuvent être utilisés à l'intérieur pour réguler l'humidité [19].
- Le **refroidissement par évaporation directe** est également généralement moins efficace dans les environnements extrêmement humides, car l'évaporation ne se produit pas efficacement lorsque l'air est déjà humide. Un déshumidificateur peut être recommandé si les ressources sont suffisantes.
- **Ombrage** (voir [Protection des toits et barrières radiantes](#) et [Protection des fenêtres et des murs](#)) : ces solutions fonctionnent bien dans les bâtiments exposés à la lumière directe du soleil et doivent être utilisées en complément d'une ventilation naturelle [20].
- Pour les régions où les précipitations sont modérées à élevées, il est recommandé d'opter pour un toit en pente afin d'assurer un bon écoulement de l'eau. La surface supérieure doit être recouverte d'une **couche réfléchissante** ou la surface inférieure d'une **couche à faible émission** [15] (voir [Protection des toits et barrières radiantes](#)).

1.5.4 Tableau des stratégies

Le tableau 1 fournit des informations de base sur toutes les stratégies de refroidissement décrites dans la section suivante, afin de faciliter le choix des stratégies adaptées à un contexte particulier.

Il indique :

- **Colonne jaune** : si la stratégie peut être utilisée pour la « rénovation » d'un bâtiment existant, et/ou si elle n'est possible que dans les nouveaux bâtiments.
- **Colonne verte** : si la stratégie peut être utilisée dans des bâtiments permanents et des bâtiments transitoires à ossature en bambou/bois ou en briques d'adobe et/ou dans des abris temporaires.
- **Colonne bleue** : si la stratégie est efficace dans les climats secs (classification de Köppen BWh et BSh) et/ou dans les climats humides (classification de Köppen Am, Af, Aw).
- **Colonne orange** :
 - › Le coût probable de l'utilisation de la stratégie dans un contexte humanitaire (\$ signifie un coût faible, \$\$\$ signifie un coût élevé).
 - › Le niveau de compétences techniques requis pour utiliser la stratégie (x signifie des compétences en construction/ingénierie généralement disponibles dans une communauté rurale ; xx signifie des compétences plus spécialisées en construction/ingénierie souvent disponibles dans une ville de taille plus importante ; xxx signifie des compétences spécialisées en construction/ingénierie qui ne sont disponibles que dans les grandes villes).
 - › Le niveau d'intrants spécialisés requis pour mettre en œuvre la stratégie (x signifie intrants couramment disponibles dans un contexte humanitaire ; xx signifie intrants plus spécialisés ; xxx signifie intrants qui ne sont disponibles que dans les grandes villes ou qui doivent être importés dans le pays).
- **Colonne grise** : efficacité des différentes stratégies.

Tableau 1 : Tableau des stratégies

Stratégie	Bâtiment nouveau ou existant (rénovation) ?		Bâtiment permanent/transitoire ³ ou temporaire ?		Climat sec ou humide ?		Coût et exigences techniques			Efficacité
	Nouveau	Existant	Perm./Trans.	Temp.	Sec	Humide	Coût	Compétences techniques requises	Intrants spécialisés ?	
Isolation	x	x	x		x		\$\$	xx	xx	xxx ⁴
Stockage thermique élevé – sacs de sable		x	x	x	x		\$ ⁵	x	x	xxx ⁶
Stockage thermique élevé – parois épaisses	x		x		x		\$\$	xx	x	xxx ⁷
Stockage thermique élevé – plâtre	x	x	x		x		\$	xx	x	x
Ventilation par le vent	x	x	x	x	x	x	\$	x	x	xx
Ventilation par empilement	x	x	x		x	x	\$\$	xx	x	xx

Stratégie	Bâtiment nouveau ou existant (rénovation) ?		Bâtiment permanent/transitoire ³ ou temporaire ?		Climat sec ou humide ?		Coût et exigences techniques			Efficacité
	Nouveau	Existant	Perm./Trans.	Temp.	Sec	Humide	Coût	Compétences techniques requises	Intrants spécialisés ?	
Ventilation stratégique	x	x	x	x	x	?	\$	x	x	xxx
Ventilation par cour intérieure	x		x		x	x	\$\$\$	xx	x	xx
Murs latéraux	x		x		x	x	\$\$	xxx	xx	x
Peinture thermique (peinture blanche)	x	x	x	x	x	x	\$	x	x	x
Peinture thermique (peinture réfléchissante)	x	x	x	x	x	x	\$\$\$	x	xxx	xx
Protection du toit	x	x	x	x	x	x	\$\$	xx	xx	xx
Végétation	x	x	x	x	x	x	\$	x	x	xx
Protection des fenêtres/murs	x	x	x	x	x	x	\$\$	xx	xx	xx

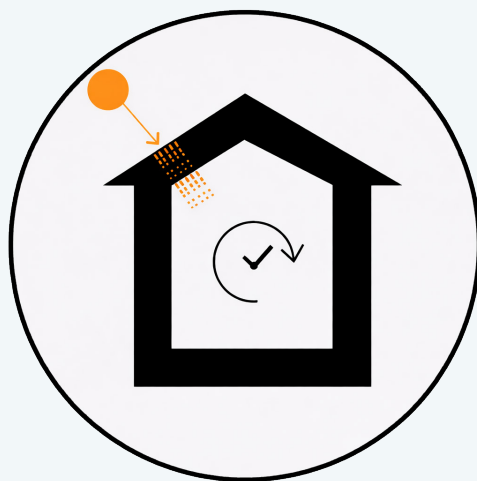
Stratégie	Bâtiment nouveau ou existant (rénovation) ?		Bâtiment permanent/transitoire ³ ou temporaire ?		Climat sec ou humide ?		Coût et exigences techniques			Efficacité
	Nouveau	Existant	Perm./Trans.	Temp.	Sec	Humide	Coût	Compétences techniques requises	Intrants spécialisés ?	
Forme des bâtiments et zonage	x		x	x	x	x	\$\$\$	xxx	xxx	xxx
Refroidissement actif à faible coût	x	x	x	xx	x	x	\$\$	xxx	xxx	xxx ⁸

À noter que ce tableau fournit des indications générales à titre d'illustration et qu'il ne sera pas exact dans tous les contextes. Il a été élaboré à partir d'une analyse documentaire et des contributions des utilisateurs lors d'essais sur le terrain. Les coûts, la disponibilité des matériaux et, surtout, l'efficacité varient considérablement en fonction du contexte.

2 Stratégies

2.1 Utilisation de matériaux de construction à haute capacité de stockage thermique

Figure 4 : Utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique



Source : œuvre de l'auteur (inspiré par Bill Flinn)



Nouveaux bâtiments ET rénovations (plâtre, sacs de sable uniquement)



Dispositifs permanents ET temporaires (sacs de sable uniquement)



Climats secs

A. De quoi s'agit-il ?

Cette stratégie consiste à construire avec des matériaux lourds tels que la pierre, la brique, la terre et le béton, qui ont une masse thermique élevée. Plus le matériau est épais et dense, plus sa masse thermique est élevée et, par conséquent, plus sa capacité de stockage de chaleur est importante. Voir l'[encadré 1 : Masse thermique](#). Lors de la rénovation de bâtiments, cela suppose d'ajouter des matériaux à masse thermique élevée au bâtiment.



Encadré 1 : Masse thermique

Le stockage de chaleur (masse thermique) désigne la capacité d'un matériau à absorber, retenir et libérer la chaleur. Les matériaux de construction lourds tels que la pierre, la brique, la terre et le béton ont généralement une masse thermique élevée. Plus le matériau est dense et épais, plus sa masse thermique, et donc sa capacité à stocker la chaleur, est importante.

La chaleur s'accumule dans ces matériaux pendant les périodes chaudes et est libérée progressivement dans l'air lorsqu'il se refroidit. Cela permet d'empêcher la chaleur de pénétrer dans l'atmosphère à l'intérieur du bâtiment pendant la journée et de libérer la chaleur stockée la nuit ou en hiver pour maintenir la chaleur à l'intérieur. Dans les climats où les différences de température entre le jour et la nuit sont importantes, cette méthode permet de stabiliser les températures intérieures en dessous des températures extérieures les plus élevées.

Cette approche nécessite de la main-d'œuvre, mais n'est pas techniquement complexe. Elle peut être appliquée de plusieurs façons, par exemple en utilisant des sacs de sable, du remblai de sable, des couches épaisses de plâtre ou des murs épais constitués de matériaux à masse thermique élevée. Les sacs de sable, bien qu'utiles, sont lourds, nécessitent beaucoup de main-d'œuvre, prennent de la place et peuvent créer des obstacles dans les zones densément peuplées.

L'efficacité de la masse thermique est considérablement réduite dans les climats où la différence entre les températures diurnes et nocturnes est faible. Comme il n'y a pas de grandes fluctuations de température dans ces climats, la chaleur du bâtiment ne se dissipe pas pendant la nuit.

Une stratégie de masse thermique élevée nécessite une ventilation efficace pendant la nuit afin de garantir que l'air chaud quitte le bâtiment (voir [Ventilation stratégique](#)).

B. Comment ça marche ?

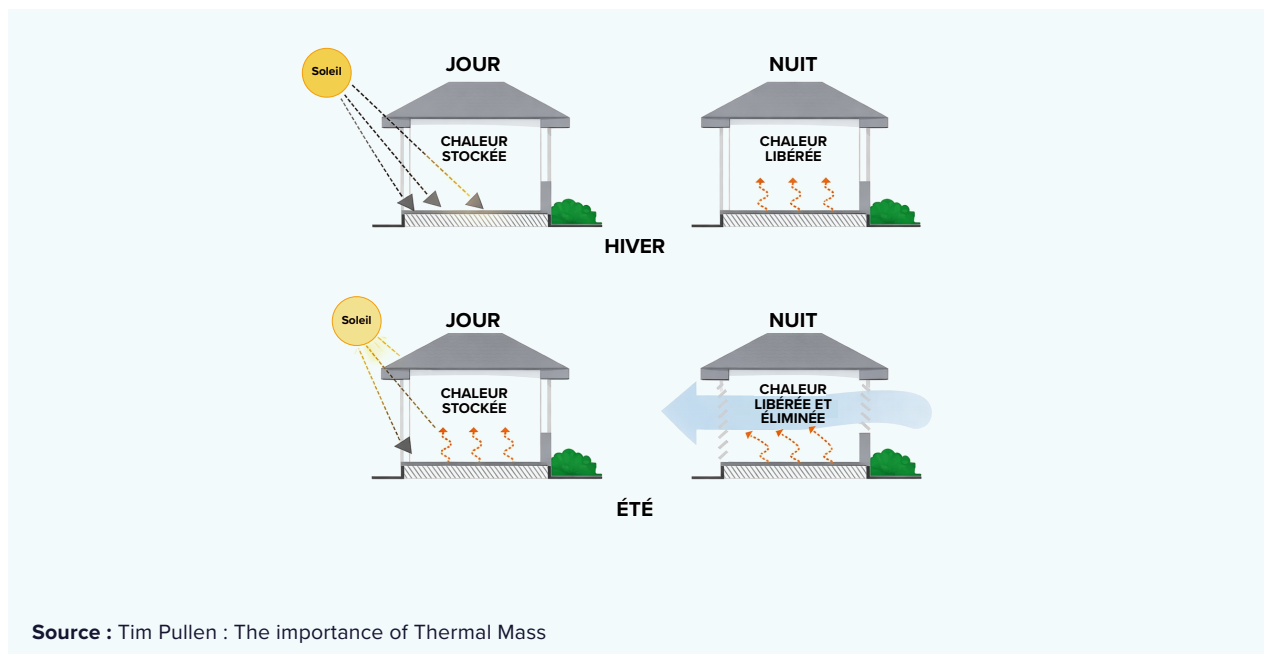
En utilisant des matériaux à haute masse thermique pour la construction des éléments du bâtiment (parois et toiture), celui-ci accumule et stocke lentement la chaleur lorsqu'il fait chaud à l'extérieur (souvent pendant la journée). L'enveloppe du bâtiment se réchauffe lentement et stocke une grande partie de la chaleur, ce qui empêche cette dernière d'être transférée à l'intérieur du bâtiment. Ensuite, lorsqu'il fait froid (la nuit ou en hiver), la chaleur stockée est libérée dans l'environnement et à l'intérieur du bâtiment. Dans les climats où il fait froid la nuit, cette chaleur permet de garder les occupants au chaud. Dans les climats où il fait toujours chaud (bien que moins qu'en journée), la ventilation nocturne doit être utilisée pour contrer l'accumulation de chaleur pendant la nuit due à la chaleur libérée, en évacuant la chaleur pour garder les occupants au frais (voir la [figure 5](#)).

Cette méthode peut être très efficace dans les climats où la différence entre les températures diurnes et nocturnes est importante. Les fluctuations des températures extérieures entre le jour et la nuit sont stabilisées à l'intérieur du bâtiment. La chaleur est transférée à travers le matériau par **conduction**, puis dans l'air intérieur par **rayonnement** et **convection**. Voir la [section 1.3](#) pour consulter les différents mécanismes de transfert de chaleur.

Il est recommandé de construire un mur exposé au soleil (qui reçoit plus de chaleur par rayonnement) avec des matériaux à masse thermique élevée afin de réduire le réchauffement des espaces intérieurs situés derrière ce mur.

La quantité de chaleur qu'un matériau peut stocker dépend de sa capacité de stockage thermique. Plus la capacité de stockage thermique est élevée, plus la capacité à stocker la chaleur est importante. L'augmentation de l'épaisseur du matériau augmente la capacité de stockage thermique. Voir le [tableau 2 de la section 2.1f](#) pour consulter les capacités de stockage thermique des matériaux pertinents à haute capacité.

Figure 5 : Stockage et libération de chaleur



Pendant les étés chauds, le refroidissement nocturne s'effectue en ouvrant les fenêtres/trous d'aération pendant la nuit. Pendant les hivers froids, la fermeture des fenêtres/trous d'aération permet à la masse thermique de réchauffer l'intérieur.

C. Facilité d'application / remarques sur l'application

Cette méthode nécessite de la main-d'œuvre, mais n'est pas techniquement difficile. Elle peut être mise en œuvre de différentes manières.

- **Murs et toit épais** : pour les nouvelles constructions, construire des murs épais et des dalles de toit en matériaux à masse thermique élevée tels que la brique, la pierre, les blocs de terre stabilisée et compressée épais, l'adobe, le torchis, la brique, la terre battue, etc.
- **Enduit** : pour les structures existantes, une couche épaisse d'enduit à forte masse thermique peut être ajoutée, comme du plâtre de gypse [19], de l'enduit à la boue ou de l'enduit à base de bouse de vache (plâtre védique) [22]. Cela dépend des matériaux de construction disponibles ainsi que des matériaux utilisés pour la construction du bâtiment existant.

Le plâtre de gypse peut également réguler l'humidité intérieure dans les environnements humides et doit être utilisé en combinaison avec une isolation [19].

- **Remplissage des cavités murales avec du sable et du gravier** : les bâtiments dont la structure murale comporte des cavités peuvent être remplis de sable et de gravier [42].

- **Sacs de sable** : les parois des bâtiments peuvent également être recouvertes de sacs de sable [42] ; il peut être préférable de le faire à l'extérieur afin de ne pas réduire la surface utile à l'intérieur du bâtiment. Cette stratégie peut également servir dans les zones inondables pour empêcher l'eau de pénétrer à l'intérieur.

D. Quels en sont les inconvénients ?

Le changement de température est lent : la température intérieure ne change pas rapidement en réponse aux changements de température extérieure. En d'autres termes, si les jours et les nuits se succèdent avec peu de différence de température (trop chaud ou trop froid), le bâtiment restera chaud ou froid pendant de longues périodes, rendant l'environnement intérieur inconfortable. Cela signifie également que les techniques de refroidissement actif seront moins efficaces si le bâtiment a déjà accumulé beaucoup de chaleur.

- **Inconfort thermique la nuit** : dans les environnements chauds, la libération de chaleur par les murs pendant la nuit peut rendre l'intérieur du bâtiment inconfortablement chaud. Si tel est le cas, utiliser une masse thermique avec une ventilation nocturne.
- **Sacs de sable – lourds, encombrants et peu efficaces en termes d'espace** : les sacs de sable peuvent occuper beaucoup d'espace, devenir des obstacles dans les zones densément peuplées et faire trébucher les gens. Ils sont lourds et nécessitent beaucoup de matériaux et de main-d'œuvre.
- **Le plâtre de gypse n'est pas imperméable** : le plâtre de gypse est plus cher que le plâtre de ciment et ne peut pas être utilisé sur la surface extérieure des murs, car l'eau l'endommagerait. Dans les environnements sujets aux tempêtes et aux fortes pluies, évaluer si les murs à l'intérieur du bâtiment peuvent être maintenus au sec avant d'utiliser du plâtre de gypse.

E. Dans quelles circonstances ne pas utiliser cette méthode ?

L'efficacité de la masse thermique est considérablement réduite dans les climats où la différence entre les températures diurnes et nocturnes est faible. En l'absence de fluctuations importantes de température, il n'y a que peu ou pas de changement.

F. Efficacité

Une étude a comparé la masse thermique en tant que technique de refroidissement passif dans une région tropicale et dans une région aride. Elle a révélé que l'effet de refroidissement était beaucoup plus important dans la région aride : la différence moyenne entre la température extérieure et la température intérieure était de 6 à 8 °C à Sde Boqer (région aride), contre 2 à 3 °C à Maracaibo (climat tropical) [81].

Dans une autre étude menée au Ghana (climat tropical), une réduction maximale de la température de 4,3 °C a été observée grâce à l'utilisation combinée de matériaux à haute capacité de stockage thermique et d'une ventilation nocturne [82].

Combinaison et comparaison avec d'autres stratégies :

- Une étude comparant l'efficacité de différentes stratégies⁹ menée dans une école de deux étages à Riyad (climat aride) a montré que l'utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique associée à une ventilation nocturne (voir [Ventilation stratégique](#)) s'est avérée être l'une des stratégies les plus efficaces pour le refroidissement estival, avec une réduction de la température de 1,6 °C [53]. Dans la même étude, il a été constaté que dans les climats chauds et secs, la ventilation nocturne est très importante pour que les matériaux à haute capacité de stockage thermique soient efficaces pour le refroidissement. Sinon, la chaleur accumulée pendant la journée par les surfaces vitrées et autres moyens peut rester emprisonnée à l'intérieur. Voir l'[annexe 3.2](#) pour plus de détails sur l'étude.
- Une étude menée dans des abris préfabriqués du Haut Commissariat des Nations Unies pour les réfugiés (HCR) en Jordanie (climat aride) a révélé que la stratégie de refroidissement passif la plus efficace consistait à utiliser des matériaux à fort stockage thermique, ce qui a permis de réduire la température moyenne de 1,3 °C et la température maximale de 4,7 °C¹⁰ [42]. L'efficacité de l'ajout de matériaux supplémentaires diminuait au-delà d'un certain point : alors que 3 000 kg (de sable et de gravier remplissant l'espace vide d'un mur) entraînaient une réduction maximale de la température de 3,7 °C, l'ajout de 11 000 kg supplémentaires (sous forme de sacs de sable placés contre les murs) ne permettait d'obtenir qu'une réduction supplémentaire de 1 °C [42], ce qui n'est pas très significatif compte tenu de la quantité importante de matériaux supplémentaires utilisés.
- L'efficacité de différentes stratégies a été testée dans trois climats différents dans le cadre d'une étude. Les résultats ont montré que l'utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique est la stratégie la plus efficace à Porto (climat méditerranéen), mais qu'elle était moins efficace que d'autres stratégies à Mumbai (climat tropical/humide) et au Kenya (climat subtropical) [19]. Grâce à la capacité de ces matériaux à stocker la chaleur, les fortes fluctuations diurnes et nocturnes ont été stabilisées¹¹. Des conclusions similaires peuvent être tirées pour d'autres endroits où les températures nocturnes et diurnes varient fortement.
- Pour les climats chauds et secs, il est recommandé d'utiliser des matériaux à haute capacité de stockage thermique à l'intérieur et une isolation thermique à l'extérieur. Cependant, l'isolation extérieure soulève des questions pratiques et de faisabilité (voir [Isolation](#) pour plus de détails).

Tableau 2 : Comparaison entre différents types de matériaux à haute capacité de stockage thermique

	Type de masse thermique	Avantages	Inconvénients	Capacité de stockage thermique / $\text{kJ}/(\text{m}^2.\text{K})^{12}$
i)	Augmentation de l'épaisseur du plâtre	<p>Peut être facilement appliqué sur des bâtiments existants</p> <p>Le plâtre de gypse permet de réguler l'humidité dans les climats humides</p> <p>Modifie de manière négligeable la surface utile des pièces</p>	<p>Moins efficace que d'autres mesures nécessitant davantage de matériaux</p>	<p>Ces valeurs correspondent à un enduit de 20 mm d'épaisseur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plâtre de gypse = 20 [83] • Plâtre de gypse avec agrégat de sable = 28 [83] • Plâtre de ciment = 30 [83] • Plâtre de ciment avec agrégat de sable = 32 [83]
ii)	Sacs de sable	<p>Peuvent être utilisés sur des bâtiments existants</p> <p>Bonnes performances en matière de régulation des températures lors de cycles de chaleur/froid extrêmes</p> <p>Applicables dans les structures temporaires</p>	<p>Prend beaucoup de place</p> <p>Peut constituer un obstacle et présenter un risque de trébuchement</p> <p>Matériaux et main-d'œuvre coûteux et lourds</p>	<p>Cette valeur correspond à un sac de sable classique de 150 mm d'épaisseur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sable sec = 225 [84]

	Type de masse thermique	Avantages	Inconvénients	Capacité de stockage thermique / $\text{kJ}/(\text{m}^2.\text{K})^{12}$
		<p>Potentiel pour les bâtiments permanents</p> <p>Potentiel pour le contrôle des inondations</p>		
iii)	Murs épais	<p>Intégration parfaite au bâtiment</p> <p>Bonnes performances en matière de régulation des températures lors de cycles de chaleur/froid extrêmes</p>	<p>Ne peut être appliqué qu'aux bâtiments neufs – peut ne pas être pratique pour la rénovation dans la plupart des cas.</p>	<p>Ces valeurs s'appliquent à des murs de 300 mm d'épaisseur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bloc de béton = 180 – 690 [83] • Adobe = 330 [85] • Grès = 480 [83]
iv)	Remplissage des cavités murales	<p>Ne prend pas d'espace supplémentaire</p>	<p>Peu susceptible d'être applicable dans les bâtiments permanents. Convient mieux aux structures préfabriquées avec des profilés creux.</p>	<p>Ces valeurs correspondent à des cavités de 60 mm d'épaisseur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gravier = 96 [83] • Sable sec = 90 [84] • Gravillons = 108 [83]

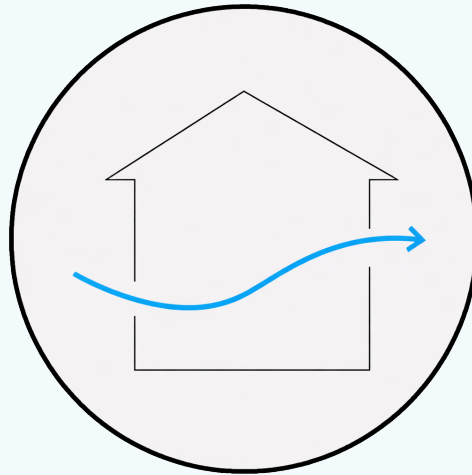
G. Lectures complémentaires

Improving thermal comfort in refugee shelters in desert environments :

Stratégies pour augmenter la masse thermique : [42, p. 35, 36]

2.2 Ventilation naturelle – aperçu des différentes approches en matière de ventilation

Figure 6 : Ventilation naturelle



Source : œuvre de l'auteur (inspiré par Bill Flinn)

Remarque : les informations générales concernant toutes ou la plupart des stratégies de ventilation naturelle ont présentées ici. Les informations spécifiques à certaines stratégies de ventilation sont présentées dans les sous-sections 2.2.1 à 2.2.5. Il est recommandé de lire cette section (générale) indépendamment de toute sous-stratégie qui peut ou non être applicable.

A. De quoi s'agit-il ?

La ventilation naturelle procure un effet rafraîchissant grâce au flux d'air par convection (voir la [section 1.3](#) pour plus d'informations sur les mécanismes de transfert de chaleur). Elle permet de remplacer l'air chaud par de l'air plus frais. Elle peut également procurer un effet rafraîchissant direct aux occupants du bâtiment en aidant le corps à réguler sa température, car (dans les environnements à faible humidité) la circulation de l'air favorise l'évaporation de la sueur, ce qui procure un effet rafraîchissant ([section 1.2](#)). La ventilation peut également améliorer la qualité de l'air et est importante pour éliminer l'humidité de l'intérieur, empêchant ainsi la formation de moisissures dans des conditions humides [16] (voir la [section 2.7d](#)).

Les personnes génèrent également de la chaleur et de l'humidité. Si le système ne permet pas d'augmenter la ventilation jusqu'à la norme minimale, il est recommandé de réduire le nombre maximal d'occupants dans la pièce, si possible [86]. Pour les normes minimales, voir la [section 2.2g](#).

La ventilation naturelle est l'une des stratégies les plus importantes pour le refroidissement passif dans les environnements humides.

B. Comment ça marche ?

Il existe deux mécanismes de ventilation naturelle principaux. Elle peut être soit entraînée par le vent, soit résulter de différences de température (causées par la montée de l'air chaud et la descente de l'air plus frais)¹³. Il existe plusieurs stratégies qui utilisent l'un de ces mécanismes, ou les deux :

- Ventilation simple par le vent
- Ventilation par tirage
- Ventilation stratégique
- Ventilation par cour intérieure
- Murs latéraux

Les stratégies de ventilation naturelle vont de pair avec le choix des fenêtres, des dispositifs d'ombrage extérieurs, de l'isolation et des propriétés d'absorption thermique des matériaux de surface extérieurs [16].

C. Facilité d'application / remarques sur l'application

La conception d'un système de ventilation naturelle comprend trois étapes fondamentales [16]. Pour plus d'informations, voir les lectures complémentaires de la [section 2.2g](#).

- 1.** Sélection du modèle de circulation d'air souhaité
- 2.** Identification des principales forces motrices
- 3.** Dimensionnement et emplacement des ouvertures

La ventilation naturelle repose sur la sensibilisation et la capacité des occupants à utiliser la ventilation lorsque les conditions sont favorables. Pour obtenir des conseils sur ce qui constitue des conditions favorables (par exemple, quand ouvrir et fermer les fenêtres), voir la [section 2.2.3a](#).

Voici quelques autres facteurs qui influent sur la qualité de la ventilation :

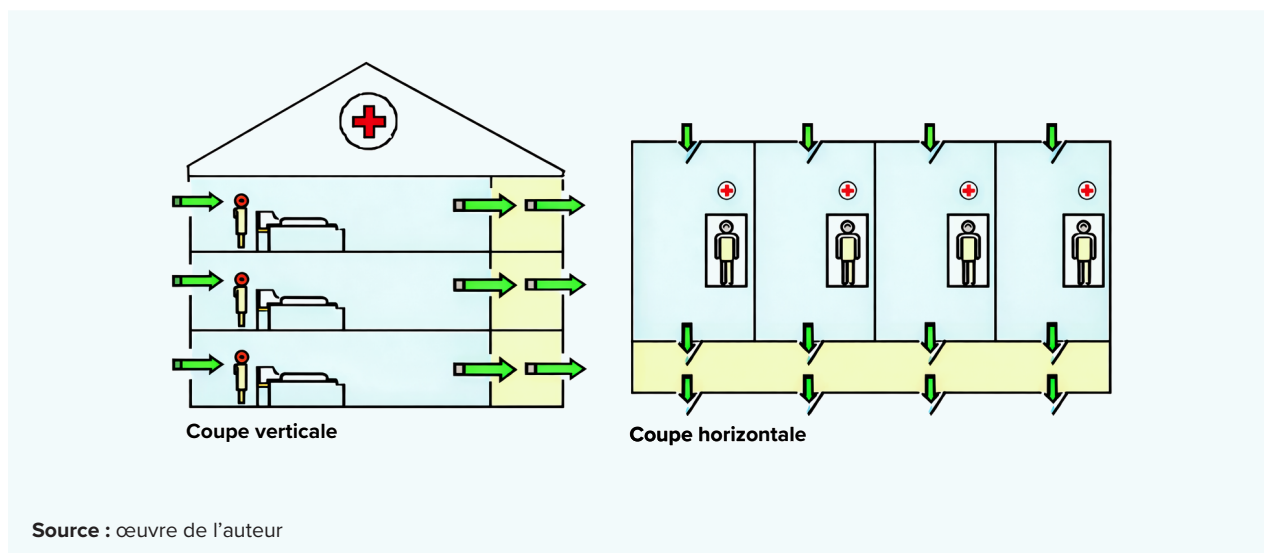
- **Hauteur des entrées et des sorties d'air** : placer les entrées à une hauteur moyenne à basse afin de créer une brise au niveau des occupants [87] et de permettre à l'air frais (qui a tendance à rester près du sol) d'entrer dans le bâtiment. Placer les sorties d'air en hauteur afin que l'air chaud puisse sortir du bâtiment.
- **Limitation du débit d'air** : pour la ventilation par une entrée et une sortie, la circulation de l'air dans un bâtiment sera limitée par les dimensions de la plus petite ouverture ou ventilation disponible pour le passage de l'air [16].
- **Format de l'entrée** : un format (largeur/hauteur) d'environ 4:1 pour l'entrée s'est avéré particulièrement efficace pour améliorer l'efficacité de la ventilation et la qualité de l'air intérieur [88]. Ce format permet d'obtenir des concentrations de polluants intérieurs plus faibles, ce qui est un indicateur clé de la qualité de l'air intérieur, en particulier dans les bâtiments à forte densité [88].
- **Taille des sorties** : les sorties doivent être légèrement plus grandes que les entrées [87].
- **Parois respirantes** : es structures temporaires, telles que les structures à base de bambou avec parois respirantes, fonctionnent bien dans les climats humides.
- **Équilibre entre le vent et la différence de température** : utiliser à la fois le vent et la chaleur naturelle ascendante pour améliorer la ventilation. Cela signifie concevoir des bâtiments qui tirent parti des brises extérieures tout en permettant à l'air chaud intérieur de monter et de s'échapper, créant ainsi un schéma de circulation [89].
- **Angle du toit** : bien qu'il soit principalement utilisé pour le drainage dans les climats où les précipitations sont fréquentes, un toit incliné est également utile pour améliorer la circulation de l'air. Une étude a montré qu'une pente de toit de 45° permettait une meilleure circulation de l'air à l'intérieur du bâtiment par rapport aux toits plats [89]. La même étude a également révélé qu'une pente de toit inférieure à 18° pouvait avoir des performances de circulation d'air moins bonnes qu'un toit plat [89]. La conception à 45° contribue à créer un flux d'air naturel, facilitant l'entrée d'air frais et la sortie d'air vicié [89].

Conseils pour le contrôle des infections :

Lors de la conception de la ventilation dans les établissements de santé, tenir compte des exigences en matière de contrôle des infections. L'OMS a fourni des lignes directrices sur la ventilation naturelle sous la forme d'une feuille de route succincte pour les établissements de santé et les établissements non résidentiels (y compris les écoles). Voir la [section 2.2g](#) pour plus d'informations.

- **Ne pas se fier uniquement à la ventilation par le vent** : dans les cliniques, la conception de la ventilation naturelle pour le contrôle des infections doit tenir compte du pire scénario possible, à savoir l'absence de vent. Dans ce cas, d'autres stratégies de ventilation sont nécessaires, telles que l'utilisation de ventilateurs (voir la [section 2.9](#)) [16].
- **Salles situées d'un seul côté du couloir** : lorsqu'il existe un risque d'infection croisée, la ventilation naturelle est préférable lorsque les salles sont situées d'un seul côté du couloir (plutôt que des deux côtés) [16], car le flux unidirectionnel réduit le risque de propagation des agents pathogènes aériens entre les salles. Il est préférable de placer les fenêtres dans l'alignement de la porte de la salle afin d'améliorer la ventilation transversale [90] cité dans [16].

Figure 7 : Ventilation des établissements de santé



- **Taux de ventilation** : une mauvaise ventilation peut augmenter le risque d'infections transmises par voie aérienne. Différents taux de ventilation sont recommandés pour différentes pièces d'un établissement de soins de santé primaires. Voir la [section 2.2g](#) pour obtenir des conseils et savoir comment calculer le taux de ventilation.
- **Gestion de l'air évacué** : dans les établissements de quarantaine pour les infections transmissibles par voie aérienne, si l'air vicié sortant du bâtiment n'est pas évacué directement loin des entrées d'air, il est recommandé d'utiliser des barrières pour maintenir les personnes à une distance d'au moins 4 mètres des fenêtres et des portes [86]. Cela n'est pas nécessaire si l'air est évacué par les toits ou à 2 mètres au-dessus des personnes [86].
- **Zonage des pièces en fonction de la direction du vent** : les pièces principales et les espaces les plus propres doivent être situés du côté exposé aux vents dominants, tandis que les espaces auxiliaires (tels que les couloirs) doivent être situés du côté abrité [16], [91].

Si l'air ne circule pas des zones moins propres vers les zones plus propres et si la direction du flux d'air a été clairement identifiée, envisager de modifier les zones réservées aux patients et au personnel, de manière à ce que le flux d'air circule de la zone réservée au personnel vers les chambres des patients, et non l'inverse, afin de minimiser les risques pour les professionnels de santé [86]. Voir la [section 2.2g](#) pour plus d'informations sur la manière d'évaluer la direction du flux d'air.

- **Zonage des services de pneumologie dans les cliniques à plusieurs étages** : si la clinique comporte plusieurs étages, il peut être préférable de situer les services de pneumologie aux étages supérieurs, afin de minimiser la réintroduction de l'air évacué dans les étages adjacents [16].
- **Création de zones pour séparer les zones propres des zones sales** : dans les pièces où sont effectuées des procédures générant des aérosols, ajouter des antichambres pour contrôler la direction du flux d'air [86]. Les doubles portes des antichambres ne doivent pas s'ouvrir simultanément, afin de maintenir une séparation entre la chambre du patient et le couloir propre [86]. La ventilation transversale n'étant pas toujours possible, utiliser d'autres stratégies pour respecter le taux de ventilation minimum, comme une fermeture éclair en plastique pour créer l'antichambre ; il s'agit là d'une solution rentable [86].

Voir également la [section 2.2.1c](#) sur *la profondeur réduite* des pièces pour obtenir des conseils sur la lutte contre les infections en rapport avec les dimensions des pièces et la présence de fenêtres.

D. Quels en sont les inconvénients ?

- **Sécurité incendie et fumée** : la création d'un bâtiment avec des ouvertures communicantes entre les pièces peut poser des défis en matière de sécurité incendie et de contrôle de la fumée. Les ouvertures de ventilation peuvent devoir être scellées en cas d'incendie. Cependant, les bâtiments ventilés naturellement peuvent être conçus pour respecter les normes de compartimentage pour le contrôle de la fumée. Une attention particulière doit être accordée à l'issue de secours, car la conception de la ventilation naturelle influence également les schémas de circulation de la fumée [16].
- **Fragilité** : la présence de fenêtres augmente les risques dans les zones sujettes aux tempêtes ou aux vents violents. Des volets doivent être installés (voir la [section 2.2g](#) pour plus de détails). L'OMS recommande également que les fenêtres des établissements de santé puissent résister à des vents de 200 km/h et soient laminées ou protégées d'une autre manière contre les bris en cas de catastrophe [92].
- **Nature variable** : la ventilation naturelle varie considérablement en fonction des différences de température et de pression entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Il est donc difficile de contrôler sa direction et son intensité, ce qui peut

entraîner un flux d'air important à certains endroits et une stagnation de l'air à d'autres. Certains endroits peuvent être trop froids, d'autres trop chauds.

- **Variabilité/dépendance aux conditions extérieures** : l'efficacité de la ventilation dépend fortement du climat extérieur. Par exemple, si la vitesse du vent est trop faible, la ventilation hybride peut offrir une solution, qui combine des techniques de ventilation assistée par ventilateur et un refroidissement passif [16]. Voir la [section 2.9](#) pour plus de détails sur les ventilateurs.
- **Obstructions** : le mobilier et les cloisons intérieures peuvent perturber le flux de ventilation. Il faut veiller à ne pas restreindre le cheminement prévu du flux et les ouvertures [16].
- **Sécurité et sûreté** : les grandes fenêtres peuvent présenter un risque pour la sécurité. Éviter de placer des fenêtres dans des zones où il existe un risque de chute. Sinon, installer des barrières ou remplacer le verre par du verre de sécurité ou un film de sécurité approprié [93].

De plus, selon la réglementation britannique en matière de santé et de sécurité, si les fenêtres sont situées au-dessus du rez-de-chaussée et suffisamment grandes pour qu'un enfant puisse tomber, leur ouverture doit être limitée à 100 mm ou moins [93]. Il est possible d'utiliser des dispositifs de limitation d'ouverture qui ne peuvent être désactivés qu'à l'aide d'une clé ou d'un outil spéciaux non accessibles au grand public [93]. Cependant, limiter l'ouverture peut réduire la ventilation. Une alternative pourrait être d'installer des barreaux pour empêcher les enfants de tomber. Cela peut également être utile en cas de problèmes de sécurité liés aux effractions. Les réglementations locales doivent être appliquées lorsqu'elles existent [16].

- **Surchauffe** : bien que les fenêtres soient essentielles pour assurer une ventilation naturelle, elles constituent la partie la plus faible d'un bâtiment en termes de performance thermique [94]. L'élargissement des surfaces vitrées, en particulier dans les climats chauds et secs, augmentera considérablement le gain de chaleur par rayonnement pendant la journée. La surface des fenêtres doit donc être réduite au minimum afin de n'assurer qu'une ventilation naturelle et un éclairage naturel suffisants dans ces climats. Les fenêtres doivent également être équipées de dispositifs de protection contre le vent et le soleil (voir la [section 2.6](#)).

Le rapport fenêtre/mur est le rapport entre la surface de la fenêtre et la surface du mur. En général, la recherche recommande un rapport fenêtre/mur de 10 à 20 % [17], [95]. Un autre facteur à prendre en compte est ce qu'on appelle la « valeur g » de la protection solaire, qui mesure la quantité d'énergie solaire qui traverse les fenêtres. Différents types de verre ont des valeurs g différentes. Une valeur g élevée de 1,0 signifie que toute l'énergie solaire passe à travers, tandis qu'une valeur g faible de 0,0 signifie qu'aucune énergie ne passe. Si la valeur g du verre de la fenêtre est disponible, une règle générale consiste à s'assurer que la valeur g multipliée par le rapport fenêtre/mur reste inférieure à 5 % [17].

- **Bruit et pollution** : le bruit, la poussière et la pollution provenant de l'extérieur peuvent devenir des préoccupations pratiques en fonction de l'environnement [96]. Les entrées d'air peuvent être placées sur les côtés des bâtiments, loin des sources de bruit ou de pollution ; cela n'est toutefois possible que pour les bâtiments neufs [16].
- **Restriction des taux de ventilation** : la taille des ouvertures est limitée pour des raisons de sécurité dans les cliniques et les écoles, ce qui restreint les taux de ventilation [96].
- **Dépendance vis-à-vis du contrôle par les occupants** : l'efficacité de la ventilation dépend de la capacité des occupants à contrôler les ouvertures. Dans les cliniques, il n'est pas toujours possible de compter sur les occupants et les infirmières pour ouvrir et fermer les fenêtres aux moments optimaux [96]. Cela peut réduire considérablement les performances des systèmes de ventilation naturelle [96].
- **Intimité** : l'intimité peut devenir un problème, en particulier dans les zones très fréquentées. Des toiles peuvent être installées devant les ouvertures. Dans ce cas, il convient d'évaluer si la ventilation naturelle et la lumière du jour sont suffisantes. Sinon, si possible, les ouvertures/fenêtres/événements peuvent être placés à un niveau plus élevé que les occupants.
- **Insectes et nuisibles** : les insectes et autres nuisibles peuvent pénétrer par les fenêtres et autres ouvertures, propageant ainsi des maladies vectorielles. Le cas échéant, il est recommandé d'installer des moustiquaires semi-transparentes au niveau des ouvertures [16].

E. Dans quelles circonstances ne pas utiliser cette méthode ?

Risques liés au vent : a ventilation naturelle ne doit pas être pratiquée dans des conditions dangereuses liées au vent, telles que les tempêtes, les vents violents, les vents poussiéreux et les fortes précipitations (susceptibles de pénétrer dans le bâtiment).

F. Efficacité

La ventilation est régulièrement mentionnée comme un mécanisme clé pour le refroidissement dans les environnements humides.

La ventilation nocturne, en particulier, est un élément important des stratégies de refroidissement des matériaux à forte capacité de stockage de chaleur (voir la [section 2.1](#)).

La ventilation par le vent est plus efficace que la ventilation par tirage [12] dans les situations où le vent est fiable et régulier, et pour les bâtiments dont la disposition est étroite.

Une étude a montré qu'un toit incliné à 45° peut augmenter le débit volumique d'air de 22 à 25 % par rapport à un toit plat [89]. L'inclinaison crée des zones où l'air chaud s'accumule sous la toiture. Lorsque le vent souffle, elle crée également une zone de basse pression du côté sous le vent lorsque l'air passe au-dessus du toit, ce qui peut « aspirer » l'air hors des sorties situées en hauteur.

Pour évaluer les performances de ventilation dans les cliniques, voir la [section 2.2g](#).

Comparaison avec d'autres stratégies :

Une étude a testé l'efficacité de différentes stratégies dans trois climats différents. Les résultats ont montré que la ventilation naturelle était une stratégie efficace dans toutes les régions ; elle était la plus efficace au Kenya (climat subtropical), où elle a permis une réduction de 3,8 °C de la température, mais moins efficace que d'autres stratégies à Mumbai (climat tropical, réduction de 2,4 °C grâce à la ventilation naturelle) et à Porto (climat méditerranéen, réduction de 2,9 °C grâce à la ventilation naturelle)¹⁴ [19]. Pour chaque climat, les réductions de température citées dans l'étude ont été calculées à partir de la moyenne des 5 % des températures les plus élevées. Voir l'[annexe 3.2](#) pour plus de détails.

Comparaison entre différents types de fenêtres pour la ventilation naturelle :

1. Les fenêtres à battants offrent une bonne circulation de l'air [87] et sont particulièrement recommandées à la place des fenêtres coulissantes dans les climats humides, car leur surface ouvrante est deux fois plus grande. Lorsque des volets s'ouvrant vers l'extérieur sont ajoutés, ceux-ci peuvent diriger le vent vers l'intérieur [23].
2. Les fenêtres à persiennes peuvent fournir de l'ombre en plus d'offrir une circulation d'air 9,2 fois supérieure à celle des fenêtres à auvent (fenêtres à suspension supérieure) pour une même surface de fenêtre¹⁵ [21].
3. Les fenêtres à auvent offrent une meilleure protection contre la pluie que la plupart des fenêtres lorsqu'il n'y a pas de pare-soleil ou d'autres dispositifs de protection contre la pluie sur le bâtiment [87].

G. Lectures complémentaires

- Évaluation des performances de ventilation : [16, p. 8]
- Étapes de conception d'un système de ventilation naturelle pour la lutte contre les infections : [16, p. 40]
- Feuille de route de l'OMS sur la ventilation naturelle dans les établissements de santé : [86, p. 6-7]

- Feuille de route de l'OMS sur la ventilation naturelle dans les bâtiments non résidentiels (écoles) : [86, p. 11]
- Taux de ventilation pour un système de ventilation naturelle éolienne – comment l'estimer ? [86, p. 18]
- Taux de ventilation pour un système de ventilation naturelle par tirage (entraînée par la différence de température) – comment l'estimer ? [16, p. 31]
- Direction du flux d'air/direction du vent – comment l'évaluer ? [86, p. 18]
- Taux de ventilation minimum pour les bâtiments non résidentiels (écoles) : [86, p. 11]
- Taux de ventilation minimum pour différentes pièces dans les établissements de santé :
 - › Salles non isolées [16, p. 18]
 - › Chambres d'isolement [16, p. 19]
 - › Nouveaux établissements de santé et salles de lutte contre les risques transmis par voie aérienne [16, p. 23]
 - › Services ambulatoires généraux, salles, couloirs et autres lieux de passage [16, p. 21]
- Volets et protection pendant les tempêtes et les vents violents [97]
- Guide de sécurité pour les fenêtres dans les établissements scolaires [98]
- Sécurité des fenêtres dans les établissements de santé et d'aide sociale [93]

2.2.1 Ventilation simple par le vent



Bâtiments neufs ET rénovations



Dispositifs permanents ET temporaires



Climats secs ET humides



Encadré 2 : Ventilation simple par le vent

La ventilation naturelle simple est un type de ventilation naturelle qui consiste à ouvrir les fenêtres, les événements et autres ouvertures vers l'extérieur afin de permettre aux courants d'air extérieurs de circuler dans le bâtiment.

S'il existe des ouvertures d'un seul côté d'un espace, on parle de **ventilation naturelle unilatérale**. S'il existe des ouvertures sur deux côtés ou plus (généralement les côtés opposés d'un espace), on parle de **ventilation transversale**. La ventilation transversale est généralement plus efficace que la ventilation unilatérale.

La ventilation par le vent dépend de l'existence d'un vent assez prévisible et constant. Le vent évacue l'air chaud du bâtiment et peut favoriser l'évaporation de la transpiration.

Son efficacité dépend de la conception et de l'emplacement des ouvertures, des proportions de la pièce et de la direction du vent. La ventilation transversale fonctionne mieux avec des ouvertures situées sur des murs opposés ou dans les coins éloignés de murs perpendiculaires, tandis que la ventilation naturelle unilatérale est améliorée par l'ouverture de deux fenêtres largement espacées situées sur le même mur au lieu d'une seule.

Les ouvertures doivent être orientées de manière à capter les brises fraîches tout en évitant les vents chauds indésirables. La profondeur des pièces est un facteur essentiel : les pièces ventilées transversalement avec des fenêtres situées sur des murs opposés doivent avoir une largeur inférieure à cinq fois la hauteur de la pièce ; celles ventilées d'un seul côté (par effet de cheminée) doivent avoir une largeur inférieure à 2,5 fois la hauteur ; et celles ventilées d'un seul côté (par le vent) doivent avoir une largeur inférieure à deux fois la hauteur - bien que ces deux dernières soient inefficaces pour le contrôle des infections transmises par voie aérienne.

La ventilation naturelle unilatérale est limitée aux espaces peu profonds (jusqu'à 2,5 fois la hauteur du plafond) et peut être inefficace dans les pièces hermétiques telles que les espaces d'isolement clinique, où les fenêtres ouvertes ne garantissent pas une circulation d'air adéquate. La ventilation transversale est généralement plus efficace, mais doit être évitée dans les salles ou les chambres où des aérosols sont générés, car elle peut transporter l'air contaminé vers des zones plus propres et augmenter le risque de contamination croisée.

A. De quoi s'agit-il ?

La ventilation naturelle simple par le vent consiste à ouvrir les fenêtres, les événements et autres ouvertures vers l'extérieur afin de permettre aux courants d'air extérieurs de circuler dans le bâtiment.

S'il existe des ouvertures d'un seul côté d'un espace, on parle de **ventilation naturelle unilatérale**.

S'il existe des ouvertures sur deux côtés ou plus (généralement les côtés opposés d'un espace), on parle alors de **ventilation transversale**.

B. Comment ça marche ?

La ventilation par le vent dépend de la direction du vent dans le bâtiment. Le vent déplace l'air chaud du bâtiment et peut favoriser l'évaporation de la transpiration. La ventilation transversale s'appuie sur une différence de pression : le côté sous le vent du bâtiment sera soumis à une pression plus faible que le côté au vent, ce qui aide à aspirer l'air hors du bâtiment.

C. Facilité d'application / remarques sur l'application

L'efficacité d'une ventilation simple par le vent dépend de la vitesse et de la direction du vent, de la position relative de la façade, de la profondeur de la pièce et de la taille des ouvertures [14]. Il ne doit y avoir aucun obstacle bloquant le vent.

- **Ventilation transversale** : idéalement, les ouvertures doivent être placées sur des murs opposés [23]. Si elles se trouvent sur des murs perpendiculaires, elles doivent être placées dans le coin le plus éloigné des murs [23].
- **Ventilation naturelle unilatérale - deux fenêtres au lieu d'une** : si une pièce ne peut avoir des fenêtres que d'un seul côté, il est préférable d'avoir deux fenêtres largement espacées plutôt qu'une seule [87].

- **Emplacement des ouvertures** : l'emplacement des fenêtres et des événements peut avoir un impact considérable sur la circulation de l'air dans un bâtiment. En cas de brises fraîches, les entrées d'air doivent être orientées en fonction de la direction du vent. Cependant, cela peut être indésirable pour les vents chauds en été (dans les climats chauds) et les vents froids en hiver (pour les climats avec des hivers froids). La direction du vent peut être évaluée à l'aide de méthodes simples – pour plus d'informations, voir la [section 2.2g](#).
- **Profondeur réduite des pièces** : les espaces ventilés naturellement doivent être étroits pour assurer une ventilation adéquate. Il existe des règles empiriques concernant la profondeur des pièces, qui s'appliquent aussi bien aux services médicaux qu'aux espaces généraux [16] :
 - › Pour les pièces ventilées transversalement (fenêtres situées sur des murs opposés), la profondeur doit être inférieure à 5 fois la hauteur de la pièce.
 - › Pour la ventilation unilatérale en l'absence de vent (ventilation par tirage uniquement), la profondeur doit être inférieure à 2,5 fois la hauteur de la pièce. Cette méthode n'est pas efficace pour le contrôle des infections transmissibles par voie aérienne.
 - › Pour une ventilation unilatérale (fenêtre située sur un seul mur), la profondeur doit être inférieure à deux fois la hauteur de la pièce. Ce type de ventilation n'est pas efficace pour contrôler les infections transmissibles par voie aérienne.

Voir la [section 2.2.2](#) pour plus d'informations sur la ventilation par tirage.

D. Quels en sont les inconvénients ? (voir également la section générale [Ventilation naturelle](#))

- **Ventilation naturelle unilatérale** – inefficace pour les espaces plus profonds : la ventilation naturelle unilatérale n'est efficace que jusqu'à une profondeur de 2,5 fois la hauteur du plafond [86]. La ventilation transversale est préférable pour les espaces plus profonds.
- **Ventilation naturelle unilatérale** – ventilation insuffisante dans les pièces hermétiquement fermées : pour la ventilation unilatérale dans les pièces hermétiquement fermées, telles que les chambres d'isolement dans les cliniques, le simple fait qu'une fenêtre soit ouverte ne signifie pas nécessairement que le débit d'air est suffisant [16].

E. Dans quelles circonstances ne pas utiliser cette méthode ?

- **Ventilation transversale** – risque de contamination : la ventilation transversale ne doit pas être mise en œuvre dans les salles/pièces où des aérosols sont générés lorsqu'il existe un risque de contamination croisée provenant de l'air

évacué par des procédures générant des aérosols [86]. C'est également le cas lorsque le flux d'air circule entre une zone moins propre et une zone propre [86]. La ventilation naturelle ne doit pas être pratiquée dans des conditions dangereuses liées au vent, telles que les tempêtes, les vents forts, les vents poussiéreux et les fortes précipitations (susceptibles de pénétrer dans le bâtiment).

F. Efficacité

La ventilation transversale est recommandée plutôt que la ventilation unilatérale [86] car elle peut jouer un rôle essentiel dans la réduction de la température intérieure [94].

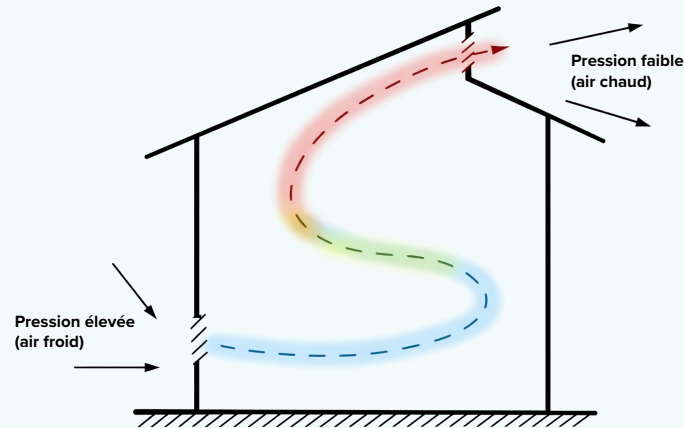
Voir également la [section 2.2f](#).

G. Lectures complémentaires

Voir la [section 2.2g](#).

2.2.2 Ventilation par tirage

Figure 8 : Ventilation par tirage



Source : Civil Construction Tips [99], modifié par l'auteur



Bâtiments neufs ET rénovations



Dispositifs permanents



Climats secs ET humides



Encadré 3 : Ventilation par tirage

La ventilation par tirage repose sur le principe selon lequel l'air chaud monte tandis que l'air plus frais descend. Elle consiste à placer des entrées et des sorties d'air dans un bâtiment de manière à permettre à l'air frais, plus lourd, d'entrer dans le bâtiment et de pousser vers l'extérieur l'air plus chaud et plus léger.

Elle repose sur les différences de pression entre l'air intérieur et l'air extérieur dues aux différences de température ou d'humidité. Cette différence de pression verticale fait monter l'air plus léger (plus chaud) vers le haut et descendre l'air plus froid vers le bas. La ventilation par tirage est possible en l'absence de vent.

La ventilation par tirage fonctionne mieux avec des sorties hautes et des entrées basses ou de hauteur moyenne, ce qui permet à l'air chaud de monter et de sortir. Le vent peut perturber ce processus, il faut donc tenir compte de la direction du vent et placer les sorties sur le côté du bâtiment à l'abri du vent. Les événements supérieurs ou les claires-voies (fenêtres situées sur une partie haute d'un mur, au-dessus du niveau des yeux) aident à évacuer l'air chaud, à faire entrer l'air plus frais par les événements inférieurs et à améliorer la luminosité naturelle. L'ombrage ou la plantation d'arbres près des événements inférieurs peut refroidir davantage l'air entrant. Les hélices de toit, alimentées par le vent, améliorent l'évacuation de l'air chaud en créant une aspiration, tandis que des alternatives de refroidissement actif telles que des ventilateurs d'extraction peuvent également être utilisées.

A. De quoi s'agit-il ?

Fondée sur le principe selon lequel l'air chaud monte tandis que l'air plus frais descend, la ventilation par tirage consiste à placer des entrées et des sorties d'air dans un bâtiment de manière à permettre à l'air plus frais d'entrer dans le bâtiment et de pousser l'air plus chaud vers l'extérieur.

B. Comment ça marche ?

La ventilation par tirage repose sur les différences de pression entre l'air intérieur et l'air extérieur dues aux différences de température ou d'humidité [16]. Cette différence de pression verticale fait monter l'air plus léger (plus chaud) vers le haut et descendre l'air plus froid vers le bas. La ventilation par tirage est possible en l'absence de vent.

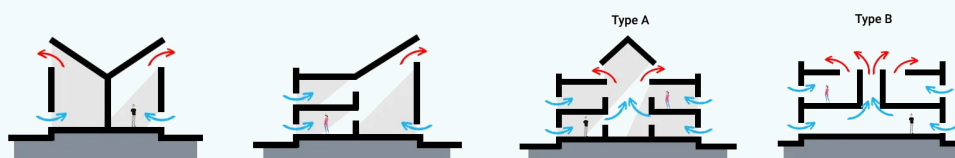
C. Facilité d'application / remarques sur l'application

- **Hauteurs des sorties et des entrées** : des sorties hautes et des entrées basses/moyennes sont efficaces pour favoriser la ventilation par tirage et permettre à l'air chaud de monter et de s'échapper. Une sortie dans un espace haut renforce ce phénomène [23]. En l'absence de vent, l'ouverture la plus haute servira dans la plupart des cas de sortie, car l'air plus chaud montera. En présence de vent, ce processus peut être perturbé. Il convient donc de vérifier la direction du vent (voir la [section 2.2g](#) pour plus de détails à ce sujet) afin de s'assurer que le vent ne pénètre pas dans la sortie et ne repousse pas l'air chaud à l'intérieur du bâtiment.
- **Toits en pente et bâtiments plus hauts** : la ventilation par tirage fonctionne plus efficacement dans les bâtiments présentant une toiture en pente que dans les bâtiments à toit plat, car les toits en pente offrent une plus grande hauteur intérieure : l'efficacité de la ventilation par tirage est directement proportionnelle à la différence de hauteur verticale entre les entrées d'air inférieures et les sorties supérieures.

- **Aérations ou claires-voies :** des aérations ou des claires-voies (fenêtres situées dans la partie haute d'un mur, au-dessus du niveau des yeux) peuvent être installées dans les étages supérieurs du bâtiment afin de permettre à l'air chaud de monter et de s'échapper vers l'extérieur. L'air plus frais peut être aspiré par les événements situés à un niveau inférieur [87]. Les claires-voies peuvent également améliorer le niveau de lumière naturelle. Il est recommandé de planter des arbres près de l'événement inférieur afin de refroidir l'air entrant [87]. Voir la [section 2.5](#) pour plus de détails sur la végétation.
- **Ventilateurs de toit :** des ventilateurs de toit peuvent être installés dans les toits pour améliorer l'effet de refroidissement passif [100] cité dans [86]. Les ventilateurs de toit, actionnés par l'énergie éolienne, créent, lorsqu'ils tournent, une zone de pression atmosphérique plus faible qui « aspire » l'air chaud ascendant, augmentant ainsi la vitesse d'évacuation de l'air chaud vicié. Il est également possible d'utiliser des dispositifs actifs tels que des ventilateurs d'extraction dans les murs à des fins d'évacuation. Voir la [section 2.9](#) pour plus de détails sur le refroidissement actif et la [section 2.2g](#) pour consulter des instructions d'installation des ventilateurs de toit.

D'autres stratégies, telles que les *cheminées solaires* et le *refroidissement passif par courant descendant*, ne sont pas abordées dans ce document en raison du niveau élevé d'expertise technique requis. Elles peuvent toutefois être appropriées si des conseils fiables et suffisants sont disponibles ailleurs.

Figure 9 : Exemples de ventilation par tirage



Source : Layak Architect [101] (modifié)

D. Quels en sont les inconvénients ?

Voir la [section 2.2d](#).

E. Dans quelles circonstances ne pas utiliser cette méthode ?

La ventilation naturelle ne doit pas être utilisée dans des conditions météorologiques dangereuses telles que les tempêtes, les vents violents, les vents poussiéreux et les fortes précipitations (susceptibles de pénétrer dans le bâtiment).

F. Efficacité

Voir la [section 2.2f.](#)

G. Lectures complémentaires

Ventilateurs de toit : [102], [103], [104]

Voir la [section 2.2g.](#)

2.2.3 Ventilation stratégique



Nouveaux bâtiments ET rénovations



Dispositifs permanents ET temporaires



Climats secs ET humides (efficacité limitée dans ce dernier cas)



Encadré 4 : Ventilation stratégique

La **ventilation stratégique** est une stratégie de contrôle qui repose sur la gestion active (ouverture et fermeture) des fenêtres et des ouvertures de ventilation par les utilisateurs du bâtiment afin d'optimiser la circulation de l'air. Elle est simple à mettre en œuvre, mais son efficacité dépend entièrement des utilisateurs, sauf si elle est automatisée.

La **ventilation proactive** consiste à ajuster les ouvertures en fonction des différences de température entre l'intérieur et l'extérieur au fur et à mesure qu'elles se produisent.

La **ventilation nocturne ou programmée** repose sur des routines fixes, généralement l'ouverture la nuit pour évacuer la chaleur et la fermeture pendant la journée, en tenant parfois compte des conditions de vent locales, comme les brises côtières ou de vallée. La ventilation nocturne utilise les différences de température entre le jour et la nuit pour évacuer la chaleur intérieure lorsque le ciel nocturne est plus frais que l'intérieur du bâtiment. Elle est plus efficace lorsqu'elle est combinée à la ventilation par tirage (voir la [section 2.2.2](#)) et est particulièrement importante dans les bâtiments à forte masse thermique (voir la [section 2.1](#)), qui pourraient autrement emprisonner une chaleur excessive à l'intérieur pendant la nuit.

La **ventilation nocturne** est moins efficace dans les climats où les différences de température entre le jour et la nuit sont faibles et peut s'avérer inefficace si elle est utilisée uniquement selon un horaire nocturne fixe, car l'air extérieur peut également être plus frais pendant la journée. Dans les espaces humides et densément occupés, elle peut aggraver les conditions en augmentant l'humidité intérieure. Bien qu'elle puisse encore fournir un refroidissement passif, la ventilation proactive est souvent plus efficace, et des déshumidificateurs sont recommandés lorsque l'humidité reste élevée.

A. De quoi s'agit-il ?

La ventilation stratégique est une stratégie de contrôle dans le cadre de laquelle les utilisateurs du bâtiment ouvrent et ferment les fenêtres et autres ouvertures afin de maximiser l'efficacité de la ventilation. Elle peut être appliquée à tous les principes/sous-stratégies de ventilation naturelle mentionnés dans la présente note d'orientation.

- **Ventilation proactive** : les utilisateurs du bâtiment ferment les fenêtres et autres ouvertures si la température extérieure dépasse la température intérieure, et les ouvrent si la température intérieure dépasse la température extérieure.
- **Ventilation nocturne/programmée** : les utilisateurs du bâtiment ouvrent et ferment les fenêtres et autres ouvertures selon un horaire fixe. Cela signifie souvent ouvrir les fenêtres, les événements, les portes et autres ouvertures vers l'extérieur pendant la nuit pour évacuer la chaleur et les fermer pendant la journée. Les horaires peuvent également tenir compte des conditions de vent locales, telles que les brises côtières rafraîchissantes ou les vents catabatiques (vents qui descendent des montagnes) dans les vallées montagneuses.

B. Comment ça marche ?

Ce système tire parti du vent et des différences de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.

- **Ventilation nocturne** : lorsque la température nocturne est inférieure à celle de l'air situé à l'intérieur du bâtiment, augmenter la ventilation pendant la nuit permet d'évacuer la chaleur vers le ciel nocturne. Cette stratégie peut être améliorée par le recours à une ventilation par tirage (voir la [section 2.2.2](#)) et peut s'avérer particulièrement importante lorsque des matériaux à haute capacité de stockage thermique ont été utilisés, car ceux-ci peuvent générer des températures internes insupportables pendant la nuit (voir la [section 2.1](#)).

C. Facilité d'application / remarques sur l'application

Il suffit d'ouvrir et de fermer les fenêtres et autres ouvertures vers l'extérieur. Cette opération peut être facilement gérée par le personnel. Elle est simple à mettre en œuvre, mais son efficacité dépend de l'utilisateur, sauf si elle est automatisée.

D. Quels en sont les inconvénients ?

- **Ventilation nocturne – faible différence par rapport à la température diurne** : elle n'est pas très efficace dans les endroits où les températures nocturnes et diurnes sont similaires. Il convient de noter toutefois qu'elle permet tout de même un certain refroidissement passif, comme en témoignent certains services hospitaliers à Singapour [21].

- **Ventilation nocturne – programme de ventilation fixe** : un programme fixe de ventilation uniquement pendant la nuit peut ne pas s'avérer très efficace, car il arrive que les températures extérieures soient également plus basses que les températures intérieures pendant la journée [21]. Une stratégie plus efficace consiste à recourir à la ventilation proactive, mentionnée à la [section 2.2.3a](#). Dans les bâtiments densément occupés situés dans des climats humides, une étude menée dans un service hospitalier à Singapour (climat tropical) a montré que s'il est possible de recourir à un horaire fixe de ventilation nocturne, les performances peuvent être moins bonnes qu'avec une ventilation diurne [21].
- **Ventilation nocturne – humidité élevée** : l'accumulation d'humidité doit être prise en compte dans les climats humides car, même si la ventilation nocturne peut réduire les températures internes, elle peut également augmenter les niveaux d'humidité et causer ainsi une gêne¹⁶ [105]. Les stratégies passives ne sont pas très efficaces pour contrôler l'humidité lorsque les niveaux d'humidité extérieurs et intérieurs sont tous deux élevés. Les déshumidificateurs, une solution relativement peu énergivore, sont recommandés [21]. Si la déshumidification n'est pas possible, une ventilation toute la journée (fenêtres ouvertes jour et nuit) peut être une meilleure option pour les espaces densément occupés dans les climats humides [105].

Voir également la [section 2.2d](#).

E. Dans quelles circonstances ne pas utiliser cette méthode ?

La ventilation naturelle ne doit pas être pratiquée dans des conditions météorologiques dangereuses telles que les tempêtes, les vents violents, les vents poussiéreux et les fortes précipitations (susceptibles de pénétrer dans le bâtiment).

F. Efficacité

Un essai mené en Malaisie (climat tropical) a montré qu'en utilisant la ventilation nocturne au lieu de la ventilation diurne (fenêtres ouvertes pendant la journée), la température maximale diminuait de 2,5 °C et la température nocturne de 2 °C [105]. Voir également la [section 2.2f](#).

Comparaison avec d'autres stratégies :

1. Une étude comparant l'efficacité de différentes stratégies¹⁷ dans une école à deux étages à Riyad (climat aride) a illustré le rôle important que joue la ventilation nocturne pour le refroidissement dans les climats chauds et secs. Ceci s'est avéré particulièrement significatif lorsqu'elle était combinée soit à [l'isolation](#), entraînant une réduction de la température de 1,9 °C, soit à l'utilisation de [matériaux à haute capacité de stockage thermique](#), entraînant une réduction




de la température de 1,6 °C [53]. Sinon, la chaleur accumulée pendant la journée par les surfaces vitrées et d'autres moyens peut rester emprisonnée à l'intérieur.

2. L'importance de la ventilation nocturne dans les climats où la différence de température entre le jour et la nuit est élevée est confirmée par des essais menés dans des abris préfabriqués du HCR en Jordanie (climat aride), qui ont enregistré une augmentation globale de la température lorsque l'isolation était utilisée uniquement avec une ventilation diurne (les fenêtres étaient ouvertes de 9 h à 21 h) [42].

G. Lectures complémentaires

Voir la [section 2.2g](#).

2.2.4 Ventilation par cour intérieure

	Bâtiments neufs
	Dispositifs permanents
	Climats secs ET humides



Encadré 5 : Ventilation par cour intérieure

Les cours sont des zones fermées qui peuvent aider à canaliser les flux d'air. L'amélioration des flux d'air grâce à la conception du bâtiment est appelée ventilation par cour intérieure.

Une cour peut fonctionner de deux manières et peut utiliser l'effet de cheminée ainsi que la ventilation par le vent.

- 1. Effet de cheminée :** si la cour se réchauffe, l'effet de cheminée aspirera l'air chaud du bâtiment autour de la cour. Cela vaut pour les cours non ombragées dotées d'un sol dur.
- 2. Ventilation par le vent :** s'il s'agit d'une cour ombragée, la ventilation par le vent peut pousser l'air frais à l'intérieur du bâtiment. Cela vaut pour les cours ombragées dotées d'un sol recouvert d'herbe, d'arbres et de plans d'eau. Les cours ombragées, qu'elles soient naturellement ombragées, végétalisées ou équipées de dispositifs d'ombrage, doivent être orientées vers le vent dominant afin de capter les brises. Plusieurs cours peuvent être combinées : des cours verdoyantes qui refroidissent l'air entrant et des cours en pierre qui se réchauffent et aspirent cet air refroidi à travers les pièces communicantes, améliorant ainsi la ventilation naturelle.

Dans les cliniques dotées de cours intérieures, les couloirs doivent être placés à l'extérieur des pièces (entre la pièce et la cour) plutôt qu'à l'intérieur, afin que l'air pur atteigne d'abord le couloir, réduisant ainsi le risque d'infection croisée dans les espaces à risque.

A. De quoi s'agit-il ?

Les cours sont des zones fermées qui peuvent aider à canaliser les flux d'air. Cette canalisation des flux d'air est appelée ventilation par cour intérieure.

B. Comment ça marche ?

Une cour peut fonctionner de deux manières, en utilisant l'effet de cheminée ou la ventilation par le vent.

- 1. Effet de cheminée :** si la cour se réchauffe, l'effet de cheminée aspire l'air chaud hors du bâtiment. Cela vaut pour les cours non ombragées dotées d'un sol dur.
- 2. Ventilation par le vent :** une cour ombragée peut utiliser la ventilation par le vent pour pousser l'air frais à l'intérieur du bâtiment. C'est le cas des cours ombragées dotées d'un sol recouvert d'herbe, d'arbres et de plans d'eau. Les cours végétalisées sont également bénéfiques pour diviser les grands espaces clos afin d'apporter de l'air frais et de la lumière [106]. Si les toits sont inclinés vers les cours ombragées, l'air plus frais descend et pénètre dans le bâtiment par les ouvertures basses, se réchauffe, puis peut être évacué du bâtiment par les ouvertures plus hautes [23].

Voir la [figure 10](#) pour une illustration des deux types de ventilation par cour intérieure.

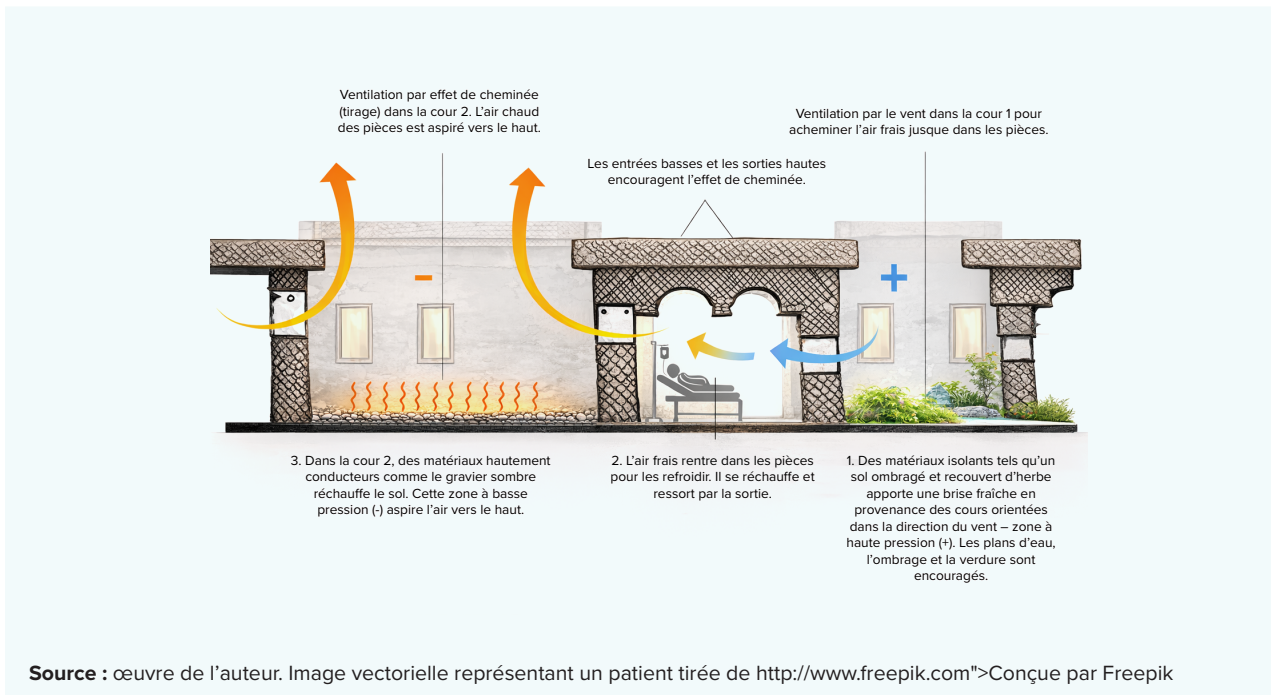
C. Facilité d'application / remarques sur l'application

Cette technique n'est possible que dans les nouveaux bâtiments où des cours peuvent être créées, ou dans les bâtiments existants dotés de cours où les effets de ventilation peuvent être améliorés, par exemple en plantant de la végétation et en ajoutant des sorties d'air dans les toits.

Les cours ombragées peuvent être ombragées soit par le bâtiment lui-même (si elles sont suffisamment petites), soit par de la végétation ou des dispositifs d'ombrage. Si possible, ces cours doivent être orientées vers le vent dominant, afin de permettre la circulation de la brise [23].

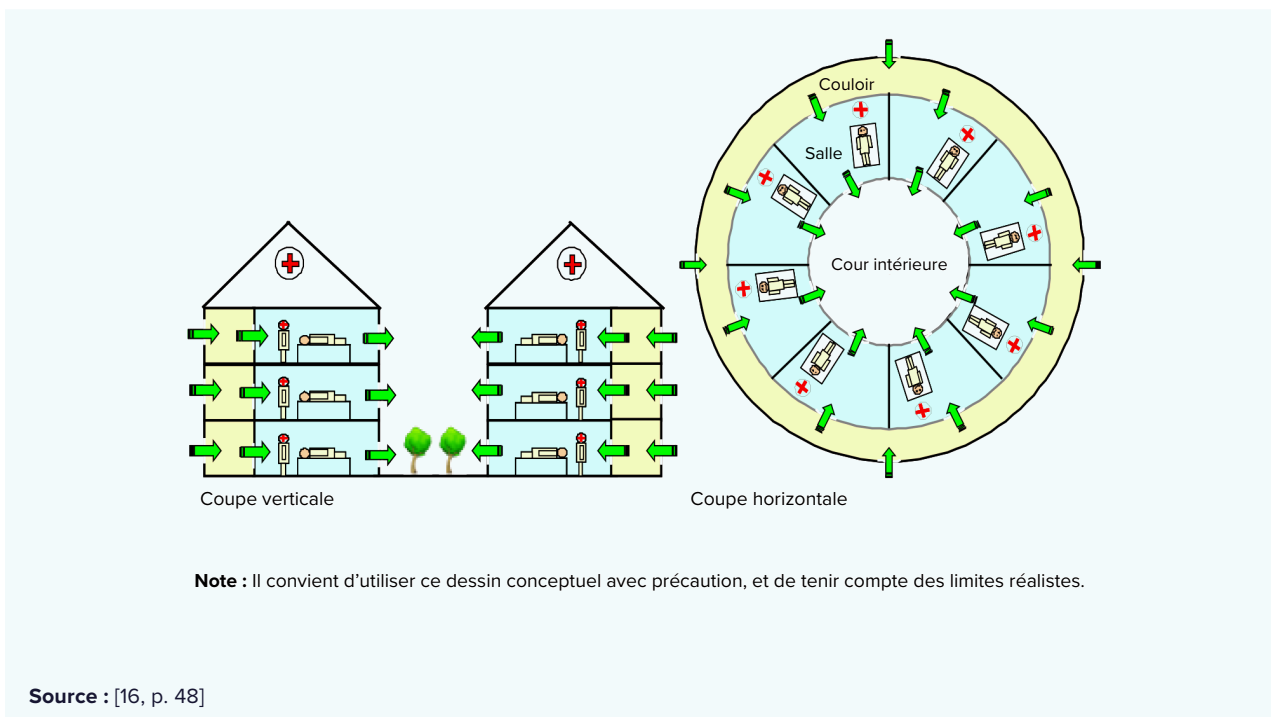
Une stratégie de refroidissement peut utiliser plusieurs cours en combinant la ventilation par effet de cheminée (tirage) et la ventilation par le vent : une cour avec des matériaux hautement conducteurs, tels que la pierre, réchauffe l'air, créant une zone de basse pression qui aspire l'air des pièces environnantes reliées aux cours végétalisées. Ces cours verdoyantes refroidissent l'air entrant qui circule dans les pièces et est aspiré par les cours en pierre. Ce principe est illustré à la figure 10.

Figure 10 : Ventilation par cour intérieure : effet de cheminée (cour 2) et ventilation par le vent (cour 1)



Recommandations pour les cliniques : lorsque les cliniques utilisent la ventilation par cour intérieure, elles doivent être orientées de manière à ce que l'air frais pénètre dans le couloir avant d'entrer dans les espaces présentant un risque d'infection ; cela permet d'éviter les infections croisées via les couloirs communicants en acheminant d'abord l'air propre vers le couloir [16], comme illustré dans la figure 11.

Figure 11 : Ventilation naturelle par le vent et par effet de cheminée (tirage) dans un hôpital avec cour (couloir extérieur)



D. Quels en sont les inconvénients ?

Voir la [section 2.2d.](#)

E. Dans quelles circonstances ne pas utiliser cette méthode ?

La ventilation naturelle ne doit pas être utilisée dans des conditions météorologiques dangereuses telles que les tempêtes, les vents violents, les vents poussiéreux et les fortes précipitations (susceptibles de pénétrer dans le bâtiment).

F. Efficacité

Voir la [section 2.2f.](#)

G. Lectures complémentaires

Voir la [section 2.2g.](#)

2.2.5 Murs latéraux



Nouveaux bâtiments ET rénovations



Dispositifs permanents



Climats secs ET humides



Encadré 6 : Murs latéraux

Les murs latéraux sont des panneaux verticaux solides qui s'étendent vers l'extérieur à partir des fenêtres, à angle droit par rapport au mur. Leur fonction est de capter, rediriger et accélérer le flux d'air dans un bâtiment. Ils sont particulièrement efficaces lorsque les fenêtres ne sont pas orientées vers les vents dominants, car ils peuvent intercepter les vents soufflant parallèlement à la façade. Ce faisant, ils créent des zones de succion d'un côté et des zones de pression de l'autre, canalisant ainsi plus efficacement l'air à l'intérieur. Les murs latéraux peuvent être intégrés à la fois aux bâtiments neufs et existants, bien que leur installation soit plus simple sur des bâtiments neufs. Dans les bâtiments existants, leur installation nécessite plus de précautions.

Les murs latéraux peuvent créer un flux d'air irrégulier, avec un mouvement d'air plus fort près des fenêtres. Les occupants qui préfèrent un flux d'air plus doux (par exemple, les patients) doivent donc être placés au centre. L'efficacité des murs latéraux est également difficile à prévoir pour des emplacements spécifiques.

A. De quoi s'agit-il ?

Il s'agit de panneaux verticaux solides qui dépassent vers l'extérieur à côté des fenêtres et perpendiculairement aux murs [87]. Ils dévient et accélèrent le vent vers l'intérieur du bâtiment. Cela est utile pour les bâtiments existants dont les fenêtres ne sont pas orientées dans la direction du vent, car ils peuvent capter les vents qui soufflent parallèlement aux fenêtres [21].

B. Comment ça marche ?

Ils créent des zones de haute pression d'un côté et des zones de basse pression de l'autre côté afin d'accélérer et d'orienter les vents [21]. Voir la [section 1.3](#) pour plus d'informations sur la haute pression et la basse pression.

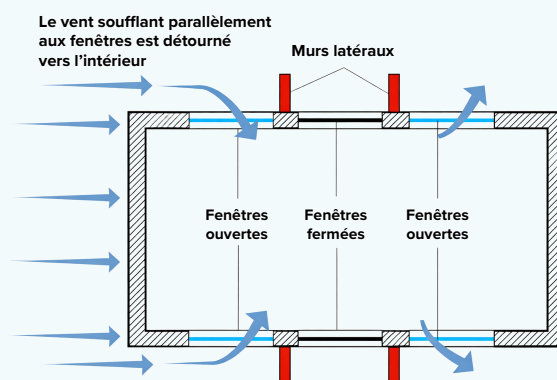
C. Facilité d'application / remarques sur l'application

Les murs latéraux peuvent être construits dans des bâtiments existants et neufs.

Murs latéraux dans les bâtiments dotés de rangées de fenêtres ouvrables.

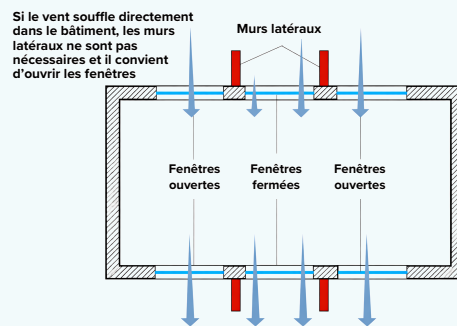
Dans les bâtiments existants, si le vent souffle parallèlement au mur, l'ouverture de toutes les fenêtres n'est pas une solution de ventilation efficace, car le vent entrant par une fenêtre peut sortir immédiatement par la suivante. Dans cette situation, une combinaison de murs latéraux et de fenêtres ouvertes est plus efficace. En construisant des murs latéraux à chaque extrémité de la rangée de fenêtres et en fermant les fenêtres situées entre les murs, le vent est canalisé dans la pièce vers une extrémité, traverse la longueur de la pièce et ressort à l'autre extrémité. L'effet est renforcé par les murs latéraux, qui guident le vent à une extrémité et, en créant une zone de basse pression à l'écart du vent, contribuent à l'aspirer à l'autre extrémité (voir la figure 12). Ce dispositif fonctionne quelle que soit la direction du vent (toutefois, si la direction du vent dominant change et qu'il souffle directement dans le bâtiment plutôt que le long de celui-ci, il est recommandé d'ouvrir les fenêtres entre les deux murs latéraux [21]) ; voir la [figure 13](#). Cette stratégie a été utilisée dans une salle de soins ventilée naturellement à Singapour (voir ci-dessous).

Figure 12 : Utilisation de murs latéraux avec plusieurs fenêtres



Source : œuvre de l'auteur, inspiré par [21]

Figure 13 : Ouverture des fenêtres lorsque le vent souffle dans le bâtiment



Source : œuvre de l'auteur, inspiré par [21]

D. Quels en sont les inconvénients ?

- **Répartition inégale du confort** : les flux d'air sont plus importants près des fenêtres, ce qui entraîne une répartition inégale du confort. Dans les salles d'hôpital, il est donc recommandé de placer les patients qui préfèrent des flux d'air plus faibles au milieu de la pièce [21].
- **Efficacité difficile à prévoir** : il est difficile de prévoir l'efficacité des murs latéraux dans un endroit spécifique [107].

Voir également la [section 2.2d](#).

E. Dans quelles circonstances ne pas utiliser cette méthode ?

La ventilation naturelle ne doit pas être pratiquée dans des conditions météorologiques dangereuses telles que les tempêtes, les vents violents, les vents poussiéreux et les fortes précipitations (susceptibles de pénétrer dans le bâtiment).

F. Efficacité

Configuration des murs latéraux – étude de cas : les murs latéraux se sont révélés efficaces dans une salle de soins ventilée naturellement dans un hôpital de Singapour (climat tropical) avec des vents parallèles [21]. Il a été constaté que les murs latéraux augmentaient la vitesse de l'air de 88 % et 60 % respectivement pour deux configurations différentes. À noter toutefois que ces données ont été recueillies à partir d'une seule étude.

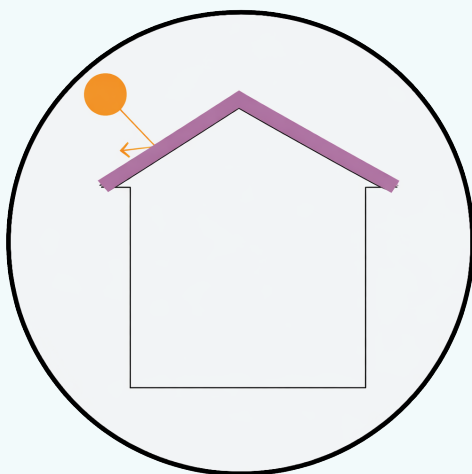
Voir également la [section 2.2f](#).

G. Lectures complémentaires

Voir la [section 2.2g](#).

2.3 Peinture thermique

Figure 14 : Peinture thermique



Source : œuvre de l'auteur (inspiré par Bill Flinn)



Nouveaux bâtiments ET rénovations



Dispositifs permanents ET temporaires



Climats secs ET humides



Encadré 7 : Peinture thermique

Les peintures thermiques sont des revêtements conçus pour réfléchir le rayonnement solaire, empêchant ainsi la chaleur d'être absorbée par les matériaux de construction, de la même façon que les vêtements de couleur claire gardent le corps humain au frais en été. Elles sont particulièrement utilisées sur les matériaux hautement conducteurs, tels que les toits métalliques ondulés, mais aussi sur les murs. Il existe deux types de peintures thermiques : les enduits/plâtres (par exemple, le plâtre blanc) et les peintures. Les peintures offrent généralement une meilleure adhérence et une meilleure durabilité. Leur performance est mesurée par leur réflectance solaire, les couleurs plus claires réfléchissant davantage la chaleur. Les peintures spécialisées réfléchissant la chaleur renforcent encore cet effet, mais elles sont plus chères que les options conventionnelles moins coûteuses, telles que la peinture acrylique blanche.

Il s'agit de l'une des méthodes les plus simples en matière de refroidissement passif et elle est idéale pour une application amateur.

Cette méthode peut ne pas convenir aux climats où les hivers sont froids et où la chaleur du soleil est souhaitable pendant une partie de l'année ; dans ce cas, on peut utiliser des **stores** rétractables. Les performances de la peinture thermique diminuent avec l'accumulation de poussière, il faut donc l'envisager avec prudence dans les régions sujettes aux vents violents et aux tempêtes. Ses performances diminuent avec le temps, ce qui nécessite de la réappliquer plus fréquemment que d'autres stratégies telles que l'**isolation**.

La combinaison de toitures réfléchissantes (froides) et d'une **isolation** interne réduit efficacement les gains de chaleur dans les climats chauds et humides comme dans les climats chauds et secs.

Cette peinture peut être appliquée à la fois sur des bâtiments existants et sur des bâtiments neufs. Son application sur des structures temporaires, telles que des tentes, est limitée, car les problèmes d'adhérence à la surface doivent être soigneusement pris en compte.

A. De quoi s'agit-il ?

Il s'agit d'utiliser une peinture qui réfléchit le rayonnement solaire. Cela peut être particulièrement utile dans les zones où la surchauffe des toits en tôle ondulée est fréquente. Si les peintures thermiques sont principalement appliquées sur les toits (qui sont la principale source de surchauffe), elles peuvent également être appliquées sur les murs.

Il existe deux principaux types de « peinture » thermique¹⁸ : les enduits/plâtres et les peintures. Les revêtements de peinture offrent généralement de meilleures performances en termes d'adhérence et de durabilité que les enduits [108]. Le plâtre blanc est un exemple de revêtement d'enduit ; la peinture acrylique blanche est un exemple de revêtement de peinture. Les performances d'une peinture peuvent être évaluées en fonction de sa réflectance solaire.

Une peinture de couleur claire réfléchira davantage le rayonnement qu'une peinture foncée, mais les propriétés réfléchissantes peuvent également être améliorées chimiquement pour former des peintures réfléchissant la chaleur. Les peintures conventionnelles sont moins chères mais moins efficaces que les peintures thermiques/réfléchissant la chaleur/le soleil. Parmi les peintures réfléchissantes disponibles dans le commerce, on peut citer Energy Star Paints, InfraCOOL Paints, INSULADD Paints, Thermilate Paints, Acryloc Roofcote et LuminX. Il ne s'agit pas là de recommandations, mais d'exemples illustrant certaines options disponibles sur le marché.

Une recommandation rentable consiste à appliquer deux couches de peinture acrylique blanche et brillante (peinture conventionnelle) sur un apprêt adapté - la brillance minimise l'accumulation de poussière [109]. Elle peut également être pulvérisée en deux couches pour obtenir une finition lisse. Si les ressources sont suffisantes, il est recommandé d'utiliser une version réfléchissant la chaleur d'une peinture blanc pur [109].

B. Comment ça marche ?

La peinture réfléchit les rayonnements solaires, empêchant ainsi le transfert d'énergie thermique vers les matériaux de construction. Le principe est le même que celui qui consiste à porter des couleurs claires lors des chaudes journées d'été pour rester au frais. Cela permet de réfléchir la chaleur et d'empêcher le transfert de chaleur par rayonnement (voir la [section 1.3](#) pour plus d'informations sur les différentes formes de transfert de chaleur).

C. Facilité d'application / remarques sur l'application

Il s'agit de l'une des approches les plus simples en matière de refroidissement passif. La plupart des produits disponibles dans le commerce sont destinés à être utilisés dans le cadre de travaux de bricolage. La préparation de la surface consiste principalement à la nettoyer pour éliminer toute trace de poussière, saleté, mousse, moisissure, graisses, etc. Il convient de suivre les instructions du fabricant pour l'application, car les spécifications peuvent varier. Pour plus de détails, voir les « [Lectures complémentaires](#) » de cette section. Cela s'applique également aux bâtiments permanents. Pour les tentes, voir la [section 2.3f](#).

D. Quels en sont les inconvénients ?

- **Peut ne pas convenir aux climats avec des hivers froids** : bien qu'elle soit efficace pendant les journées chaudes d'été, elle peut avoir un effet néfaste dans les climats marqués par des hivers froids, car elle bloque également la chaleur hivernale du soleil, qui pourrait autrement apporter un certain confort. Si une peinture thermique est utilisée dans ces climats, une isolation adéquate du toit doit également être appliquée (voir les [sections 2.7](#) et [2.3f](#) ci-dessous pour plus de détails sur la combinaison des **peintures thermiques** et de **l'isolation du toit**). Une autre solution consiste à utiliser une couverture amovible avec un revêtement réfléchissant qui peut être rétracté, au lieu d'appliquer une peinture (thermique) de manière permanente. Voir la section « [Ombrage des toits](#) » pour plus d'informations.
- **Éblouissement** : la chaleur et la lumière du soleil réfléchies par les toits peints en couleur froide peuvent provoquer un éblouissement dans les bâtiments adjacents. Pour éviter cela, une peinture de couleur claire peut remplacer une peinture blanc pur [109].

- **Le vieillissement réduit les performances** : comme les autres matériaux, la peinture vieillit. Une étude menée dans un climat méditerranéen a montré une réduction de 20 à 25 % de la réflectance solaire de la peinture acrylique blanche après un an [110]. La même étude a révélé une réduction de 19 % de la réflectance solaire pour la peinture California C-Paint, un type de peinture thermique [110]. Une autre étude a montré qu'un toit recouvert d'une peinture réfléchissante blanche doit être repeint tous les cinq ans [49].
- **L'accumulation de saleté réduit les performances** : l'accumulation de saleté sur la surface du toit peut notamment poser problème dans les régions exposées aux tempêtes et aux vents violents, où la poussière et la saleté sont susceptibles de s'accumuler régulièrement sur le toit. Les peintures autonettoyantes peuvent constituer une alternative dans ces cas-là si les ressources sont suffisantes [111].

E. Dans quelles circonstances ne pas utiliser cette méthode ?

Comme mentionné précédemment, son utilisation dans les climats où les températures hivernales sont plus froides peut être contre-productive, car la chaleur du soleil peut être souhaitable en hiver.

F. Efficacité

En raison de sa simplicité, de ses performances et de sa polyvalence, la peinture thermique est fortement recommandée. Elle peut être appliquée à la fois sur des bâtiments existants et sur des bâtiments neufs.

Dans une étude menée dans un climat aride, une réduction de 2 à 6,5 °C de la température moyenne a été constatée grâce à l'application de peintures thermiques [112] cité dans [55], [113].

Structures temporaires : l'application d'un revêtement réfléchissant sur les tentes peut permettre de les rafraîchir. Une réduction maximale de 7,7 °C de la température intérieure a été constatée dans une tente à Chengdu (région subtropicale), grâce à l'utilisation d'un revêtement appelé « revêtement rétroréfléchissant avec microbilles » sur une tente en PVC [114]. Il est toutefois important de tenir compte de l'adhérence du revêtement au matériau de la tente. Il est donc recommandé de vérifier auprès du fabricant si le revêtement peut être appliqué sur des tentes. Pour plus d'informations sur le revêtement, voir la section « Lectures complémentaires » ci-dessous.

Combinaison et comparaison avec d'autres stratégies :

- i. Une étude menée dans une école de deux étages à Riyad (climat aride) a montré que peindre le toit en blanc était quelque peu efficace pour rafraîchir l'été (réduction de 0,6 °C de la température), mais pas aussi efficace que d'autres stratégies¹⁹.

- ii. Lors d'un essai réalisé à Porto (climat méditerranéen), la peinture thermique s'est avérée très efficace, réduisant la température maximale de la surface de 8,9 °C [19]. Il convient de noter que la température de surface est différente de la température de l'air, car il s'agit de la température des murs et du toit, et non de l'air à l'intérieur du bâtiment.
- iii. La peinture thermique nécessite d'être réappliquée plus fréquemment que d'autres stratégies, telles que l'isolation. Une étude menée en Malaisie (climat tropical) a révélé que le toit devait être repeint tous les cinq ans [55].
- iv. Les revêtements réfléchissants se sont avérés plus efficaces que les toits verts pour réduire les besoins en refroidissement [115] et [116] cités dans [48].
- v. La combinaison d'un toit réfléchissant et d'une isolation interne est très efficace pour réduire la charge thermique totale provenant du toit [107], tant dans les climats chauds et humides que dans les climats chauds et secs.

Tableau 3 : Comparaison entre différents types de peintures thermiques

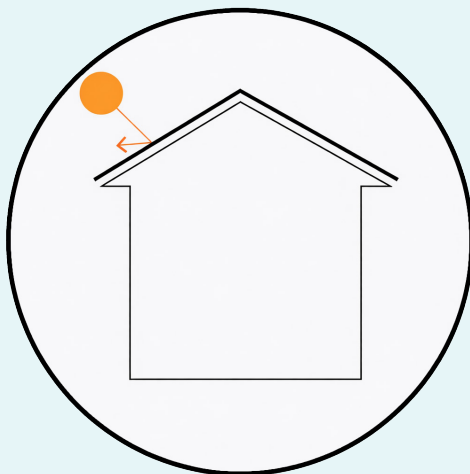
	Peintures thermiques	Comparaison
i)	Peinture acrylique blanche vs peinture en aluminium [110] cité dans [117]	La peinture acrylique blanche est plus efficace que la peinture en aluminium
ii)	Peintures conventionnelles ASTEC vs peintures réfléchissantes ASTEC [109]	Si les peintures réfléchissantes sont 31 % plus performantes que leurs équivalents conventionnels dans les couleurs foncées, leur réflectivité thermique n'est supérieure que de 4 % dans le cas du blanc pur.

G. Lectures complémentaires

- Avantages et inconvénients des peintures thermiques : [108]
- Application des peintures thermiques : [118]
- Peinture thermique dans des contextes humanitaires : [113]
- Revêtement rétro réfléchissant en microbilles pour tentes : [119]

2.4 Protection des toits et barrières radiantes

Figure 15 : Protection du toit



Source : œuvre de l'auteur (inspiré par Bill Flinn)



Nouveaux bâtiments ET rénovations



Dispositifs permanents ET temporaires



Climats secs ET humides

A. De quoi s'agit-il ?

La **protection du toit** consiste à installer des couvertures, telles que des panneaux, des tôles ou des toiles, au-dessus du toit afin d'empêcher les rayons solaires d'atteindre la surface du toit et de la réchauffer. Pour une efficacité optimale, ces couvertures doivent réfléchir la chaleur plutôt que l'absorber. Pour cela, on peut utiliser des matériaux de couleur claire. Il est important de laisser un espace entre la couverture et le toit afin que la chaleur absorbée par les matériaux de protection puisse être évacuée par le vent. Une couverture de toit qui dépasse du toit peut également fournir un certain ombrage aux murs et aux fenêtres.

Idéalement, la surface supérieure d'un pare-soleil de toit sera durable (pour résister aux intempéries) et la surface inférieure sera fabriquée à partir d'un matériau

hautement réfléchissant et à faible émissivité, tel que de la feuille d'aluminium, afin d'empêcher la chaleur d'être émise par la couverture vers la toiture. Si un filet d'ombrage est utilisé, il est recommandé d'opter pour un type à mailles serrées. Là encore, l'ajout d'un revêtement à faible émissivité au filet le rendra plus efficace.

Dans les climats où les variations de température entre le jour et la nuit sont importantes, en particulier lorsque l'on utilise une stratégie à masse thermique élevée, il est recommandé d'installer une structure de support pour rétracter l'ombrage pendant la nuit, permettant ainsi au toit de se refroidir sous le ciel nocturne frais. Cela est également important dans les climats où les hivers sont froids et où la chaleur du soleil est souhaitable pendant cette période. Cependant, les structures de support pour les ombrages de toit rétractables peuvent être coûteuses et vulnérables à l'usure. Il est recommandé d'utiliser des mécanismes simples et efficaces.

La rétractabilité n'est pas nécessaire dans les climats où les variations de température entre le jour et la nuit sont faibles. Cependant, en cas de vents et de tempêtes, il est recommandé que la structure de soutien soit suffisamment solide et que la couverture puisse être rétractée ou retirée pour éviter tout dommage. Si cela n'est pas possible, il peut être préférable de recourir à la [peinture thermique](#).

Les **barrières radiantes** sont des couches de matériau hautement réfléchissant semblable à de l'aluminium (feuille d'aluminium ou similaire) qui peuvent être utilisées comme partie intégrante d'un pare-soleil de toit, combinées à une isolation thermique (voir la [section 2.7](#)) ou placées à l'intérieur d'un toit ou d'un mur. Elles empêchent la chaleur de se propager par rayonnement de deux manières. Tout d'abord, elles réfléchissent le rayonnement vers l'atmosphère. Ensuite, comme elles sont fabriquées à partir de matériaux à faible émissivité, elles empêchent la chaleur accumulée dans un matériau (tel qu'un toit) d'être émise dans le bâtiment. Le facteur le plus important à prendre en compte lors de l'utilisation de barrières radiantes est qu'elles soient propres et dénuées de poussière, et qu'elles soient orientées vers une lame d'air. Pour que les barrières radiantes puissent être utilisées dans l'ombrage extérieur des toits, elles doivent être fixées sur un matériau durable. Il est également possible de placer la barrière radiante à l'intérieur du toit, éventuellement en combinaison avec un système d'ombrage extérieur.

B. Comment ça marche ?

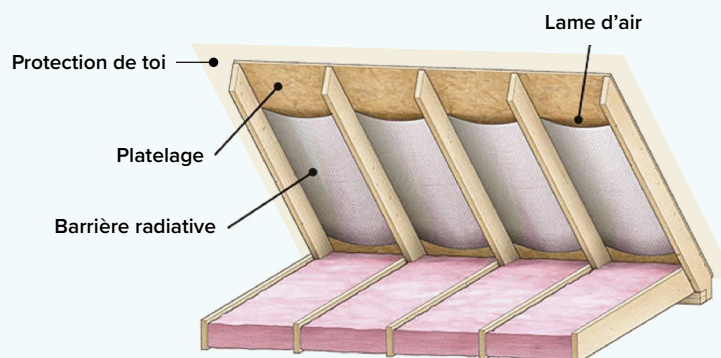
La **protection solaire pour toiture** agit comme un filtre ou une barrière contre la lumière directe du soleil (en bloquant le transfert de chaleur par rayonnement). Une lame d'air entre la couverture et la toiture permet ensuite à la chaleur qui n'a pas été réfléchie d'être évacuée hors du bâtiment par convection [42]. Voir la [section 1.3](#) pour plus d'informations sur le transfert de chaleur.

Il est recommandé d'utiliser des matériaux de couleur claire pour la couverture de protection, car ceux-ci réfléchissent davantage les rayonnements. Les matériaux plus foncés peuvent également fournir de l'ombre, mais ils absorbent la chaleur et la réémettent ensuite dans le bâtiment.

Une couverture blanche sur le dessus et réfléchissante sur le dessous est très efficace [107]. Sur la face supérieure, exposée au ciel, la surface doit idéalement être très réfléchissante et très émissive (similaire aux propriétés qui rendent efficace la peinture thermique [107]). Le matériau doit également avoir une texture rugueuse, car cela signifie généralement qu'il renvoie plus de chaleur dans l'atmosphère. Du côté du toit de la couverture, une barrière radiante réfléchissante est efficace, car la surface réfléchissante émettra très peu de chaleur en direction du bâtiment.

Les **barrières radiantes** peuvent agir de deux manières, car leurs surfaces brillantes sont à la fois hautement réfléchissantes (elles renvoient le rayonnement vers sa source) et ont une faible émissivité (elles sont peu efficaces pour rayonner la chaleur elles-mêmes). Lorsque le côté brillant est placé vers la source de rayonnement (le soleil), elles renvoient une grande partie de ce rayonnement dans l'atmosphère. En revanche, en plaçant le côté brillant à l'opposé de la source de rayonnement, on empêche la chaleur d'être rayonnée à travers la barrière radiante et dans le bâtiment. Cependant, pour que cela fonctionne, le côté brillant doit être orienté vers une lame d'air : s'il est orienté vers un matériau solide, la chaleur sera transférée par conduction (de solide à solide).

Figure 16 : Protection de toit, plafond, isolation et barrière radiante dans une coupe de toit



Source : [121] (modifié par l'auteur)

Une couverture de toit qui dépasse du toit peut également fournir un certain ombrage aux murs et aux fenêtres. Voir [Protection des fenêtres et des murs](#).

C. Facilité d'application / remarques sur l'application

Une couverture est tendue au-dessus du toit. Elle peut être dynamique (rétractable) ou statique (permanente).

1. Quels types de stores existe-t-il ?

- › **Dynamiques** : les stores amovibles sont préférables dans les climats où les températures varient fortement entre le jour et la nuit (souvent les climats secs). Les stores amovibles permettent d'exposer le toit afin qu'il puisse libérer sa chaleur dans le ciel nocturne frais. Une structure légère est fixée sur le toit, abritant un mécanisme qui peut être utilisé pour rétracter la couverture ou plier les panneaux [122].

Il existe différents mécanismes pour ouvrir/rétracter la couverture, en fonction des ressources disponibles [24]. Un exemple est le moteur tubulaire, un mécanisme motorisé qui contrôle la rotation d'un tube, généralement pour enrouler ou dérouler une corde qui soutient la couverture d'ombrage, afin d'enrouler ou de libérer la corde, permettant ainsi l'ouverture et la fermeture d'un système. Pour plus d'informations sur les différents mécanismes, voir la [section 2.4g](#).

- › **Statique** : dans les régions où la différence entre les températures diurnes et nocturnes est faible, les avantages liés au retrait de la couverture sont limités et une couverture fixe est plus appropriée.

2. Qu'est-ce qui fait un bon store de toit ?

- › **Couleur et texture** : les stores doivent être de couleur claire, afin de réfléchir les rayonnements autant que possible, et (au moins sur leur face supérieure) ternes, mats et texturés, afin de renvoyer autant de chaleur que possible dans l'atmosphère. Les surfaces peintes et les tissus sont préférables aux surfaces métalliques brillantes.
- › **Barrière radiante** : si possible, les couvertures doivent comporter une barrière radiante sur leur face inférieure afin d'empêcher la chaleur d'être rayonnée vers le toit. Il est également possible de placer une barrière radiante sous le toit, dont le côté brillant est tourné vers le bas afin d'empêcher la chaleur d'être rayonnée du toit vers le reste du bâtiment. Éviter de placer le côté brillant vers le haut, car même s'il réfléchit davantage le rayonnement, cela entraîne généralement un encrassement de la barrière, ce qui en réduit l'efficacité. Veiller également à ce que le côté brillant soit orienté vers une lame d'air. Une couverture de toit en feuille d'aluminium fera également office de barrière radiante en plus de sa fonction de couverture de toit, et le côté brillant doit être orienté vers le bas, face à une cavité d'air (voir la [section 2.4g](#) pour savoir pourquoi une cavité d'air est nécessaire).

- › **Filet d'ombrage à haute densité de mailles** : si un filet d'ombrage est utilisé, il est recommandé d'utiliser un filet d'ombrage à haute densité de mailles (tissage serré). Pour plus d'informations à ce sujet, voir la [section 2.4f](#) où une tente a été ombragée à l'aide de ce matériau.

3. Qu'en est-il des tentes ?

- › L'ajout d'une couverture supplémentaire au-dessus de la tente peut permettre de la rafraîchir. Si la tente est fortement exposée à la chaleur rayonnante latérale, une stratégie d'ombrage peut également être utilisée, comme des écrans ou un filet d'ombrage positionnés verticalement pour bloquer les rayons du soleil à f angle bas (voir la [section 2.6](#) pour l'ombrage des murs). Voir la [section 2.4f](#) pour plus de détails sur les études relatives aux tentes.

D. Quels en sont les inconvénients ?

- **Inefficacité sans cavité d'air** : les barrières radiantes ne sont efficaces que lorsqu'elles sont placées face à une cavité d'air [107], [123]. Les couvertures de toit doivent également comporter un espace entre la couverture et le toit, afin de permettre à l'air chaud de s'échapper.
- **Mécanismes dynamiques – usure** : les mécanismes dynamiques permettant de rétracter les couvertures peuvent être sujets à l'usure au fil du temps et doivent être remplacés.
- **Intempéries** : les couvertures exposées aux intempéries sont susceptibles de s'abîmer. Les intempéries peuvent être aggravées par des conditions météorologiques difficiles, telles que les précipitations, la poussière et les vents violents.
- **Mécanismes à moteur tubulaire – consommation d'énergie/coût plus élevé** : bien qu'il s'agisse d'un mécanisme efficace pour l'ombrage dynamique, ils utilisent un moteur et de l'énergie, ce qui peut augmenter les coûts.
- **Considérations relatives au chauffage en hiver** : dans les climats où les hivers sont froids et où le chauffage est nécessaire, les dispositifs d'ombrage peuvent bloquer le rayonnement solaire. Dans ce cas, il est recommandé d'utiliser une couverture amovible. Il est important de concevoir l'ombrage en tenant compte de son utilisation en hiver comme en été.
- **Vents violents** : si le climat est sujet aux tempêtes et aux vents violents, il est recommandé d'utiliser une couverture qui peut être entièrement rangée afin qu'elle ne s'envole pas au vent. La connexion de la structure légère doit également être solide et vérifiée régulièrement afin d'éviter tout dommage. Si cela n'est pas possible, il peut être plus approprié de peindre le toit avec une peinture thermique (voir la [section 2.3](#)).

E. Dans quelles circonstances ne pas utiliser cette méthode ?

Cette méthode peut être utilisée dans des conditions chaudes et sèches ou chaudes et humides, mais peut ne pas convenir aux contextes marqués par des vents forts.

F. Efficacité

Une étude a montré que dans un climat tropical, une réduction de la température radiante moyenne de 3,7 °C pouvait être obtenue [124]. Il s'agit de la température moyenne de toutes les surfaces entourant une personne, y compris les parois, les sols et les objets, qui se distingue donc de la température de l'air, qu'elle dépasse généralement.

Structures temporaires :

Une réduction de 46 à 49 % des besoins en refroidissement a été constatée dans un climat aride (près de La Mecque, en Arabie saoudite) grâce à l'utilisation d'un auvent en toile par temps clair [125] cité dans [126].

Une étude a montré une réduction de 8°C de la température intérieure maximale d'une tente utilisant un filet d'ombrage à 6 broches (haute densité de maillage) ; une réduction de 5 °C a été obtenue en utilisant un filet d'ombrage à 3 broches.

Figure 17 : Tentes ombragées par des filets d'ombrage



Source : [127]

Comparaison avec d'autres stratégies :

Une étude menée dans une école de deux étages à Riyad (climat aride) a montré que, bien que l'ombrage du toit soit quelque peu efficace, il existe des stratégies plus performantes que d'autres pour le refroidissement estival²⁰ [53].

Voir l'[annexe 3.2](#) pour plus de détails sur cette étude.

Dans les climats où les hivers sont froids et où le chauffage est souhaitable, l'ombrage dynamique du toit peut être plus approprié que la peinture thermique, car il peut être retiré pour permettre au toit de se réchauffer pendant la journée.

Voir également la [section 2.6f iii](#).

G. Lectures complémentaires

- Mécanismes rétractables d'ombrage de toiture : [24, p. 1-7]
- Pourquoi une lame d'air est-elle nécessaire pour les barrières radiantes ? [123]
- Différence entre les barrières radiantes et l'isolation réfléchissante : [77]

2.5 Végétation

Figure 18 : Végétation



Source : œuvre de l'auteur (inspiré par Bill Flinn)



Nouveaux bâtiments ET rénovations



Dispositifs permanents ET temporaires



Climats secs ET humides



Encadré 8 : Végétation

La plantation de végétation autour des bâtiments (arbres, arbustes, herbe ou plantes grimpantes) rafraîchit l'environnement de plusieurs façons. La végétation fournit de l'ombre directe, réduisant ainsi le rayonnement. Elle diminue la température de l'air grâce au processus d'évapotranspiration, qui refroidit l'air en mouvement par convection. Enfin, elle peut également canaliser ou protéger du vent. L'aménagement paysager (remplacement des surfaces dures par de la végétation) peut réduire la conduction thermique en remplaçant les surfaces dures absorbant la chaleur par de l'herbe.

Les feuillus sont particulièrement utiles pour fournir de l'ombre dans les climats où les hivers sont froids et où le soleil hivernal est souhaitable. Ils remplissent la même fonction d'ombrage que les toits rétractables, mais présentent d'autres avantages, tels que l'amélioration de la qualité de l'air, le refroidissement par évaporation et la protection contre les vents violents.

La plantation est simple, mais nécessite de l'eau pour se maintenir, ce qui peut s'avérer impossible dans les régions où l'eau est rare et où la seule alternative peut être le pavage. Il est recommandé d'utiliser des couleurs claires pour le pavage. Si les arbres et la végétation offrent généralement un abri contre les vents violents, les branches peuvent également se transformer en projectiles lors des tempêtes. Il n'est pas recommandé de planter des arbres à grandes racines, tels que les eucalyptus, à proximité d'infrastructures telles que les canalisations d'eau. Vérifier que les plantes ne provoquent pas de réactions allergiques, en particulier celles plantées à proximité des cliniques.

A. De quoi s'agit-il ?

Planter de la végétation, comme des arbres, des arbustes, de l'herbe ou des plantes grimpantes, à proximité et autour des bâtiments afin de rafraîchir l'environnement.

B. Comment ça marche ?

La végétation permet de rafraîchir l'air de plusieurs façons :

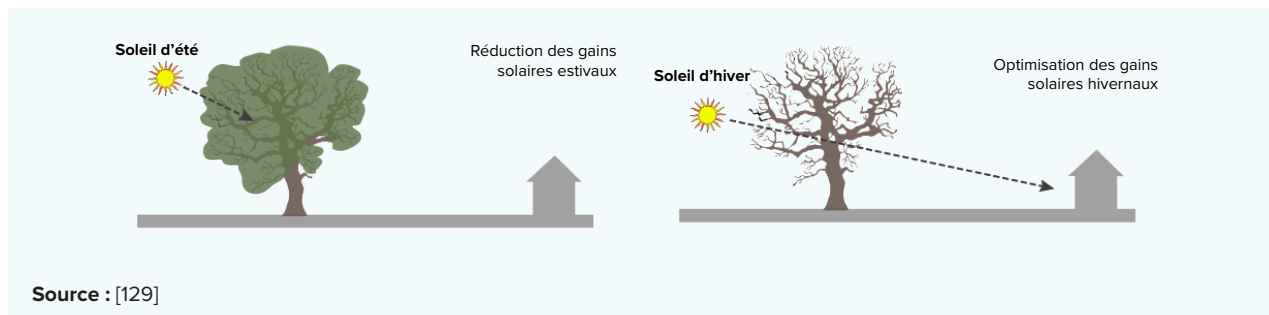
1. Lorsque les plantes transpirent, elles produisent de l'eau. Lorsque cette eau s'évapore, elle abaisse la température de l'air (refroidissement par évaporation), ce qui évacue la chaleur par **convection** (voir la [section 1.3](#)). Ce phénomène est particulièrement bénéfique dans les climats secs.
2. Les arbres peuvent également ombrager les espaces extérieurs et fournir de l'ombre au bâtiment (en bloquant le **rayonnement**).
3. Les plantes peuvent également servir à détourner le vent vers le bâtiment, de la même manière que les murs latéraux (pour en savoir plus sur les murs latéraux, voir la [section 2.2.5](#)).
4. Les plantes sont également de mauvais **conducteurs** de chaleur. Les surfaces couvertes de végétation sont plus fraîches.

C. Facilité d'application / remarques sur l'application

Les stratégies de végétalisation sont simples à mettre en œuvre car elles ne nécessitent pas d'expertise supplémentaire.

- **Végétation près des fenêtres** : l'air peut être refroidi avant d'entrer dans le bâtiment grâce à la plantation de végétaux à proximité des fenêtres, dans le sens du vent dominant.
- **Plantation d'arbres d'ombrage** : la plantation de feuillus est fortement recommandée dans les climats où les hivers sont froids, car ils fournissent de l'ombre pendant l'été tout en perdant leurs feuilles en hiver, ce qui permet au bâtiment de se réchauffer lorsque cela est nécessaire [53]. Voir la figure 19.
- **Aménagement paysager** : il est recommandé dans les espaces extérieurs, par exemple la plantation d'herbe à la place de revêtements durs/pavés autour des écoles et des cliniques et dans les cours [53]. Cela peut réduire l'accumulation de chaleur et stabiliser le sol contre les inondations et les tempêtes.
- **Planter de la végétation pour détourner le vent** : la végétation peut également influencer la direction du vent par déviation, canalisation et accélération de l'air [16]. L'augmentation du flux d'air peut améliorer le confort thermique. La végétation peut également fournir une protection contre les vents forts [16]. Les canopées améliorent par ailleurs la qualité de l'air, en particulier en dessous d'elles [16].

Figure 19 : Feuillus fournissant de l'ombre en été et assurant des apports solaires en hiver



D. Quels en sont les inconvénients ?

- **Obstacles et projectiles** : les vents violents peuvent déraciner les arbres et les arbustes et transformer les branches en projectiles [130].
- **Consommation d'eau et entretien** : les plantes peuvent nécessiter beaucoup d'eau, ce qui peut poser problème dans les régions sèches où l'eau est rare.
- **Impraticabilité de l'aménagement paysager** : l'aménagement paysager n'est pas possible ou pratique partout, par exemple sur les voies d'accès ou dans les zones où l'eau est rare. Il convient donc de recourir à la place au pavage. Concevoir le pavage de manière à minimiser l'accumulation de chaleur, par exemple en utilisant de l'asphalte ou du béton de couleur claire, en s'appuyant sur les mêmes principes que la peinture thermique (voir la [section 2.3](#)) [131]. Les matériaux perméables sont recommandés pour permettre à l'eau de s'infiltrer et fournir un refroidissement par évaporation direct, tout en assurant la gestion des eaux pluviales [131].

- **Allergènes** : certaines plantes peuvent également déclencher des réactions allergiques. Voir la [section 2.5g](#) pour obtenir des conseils sur leur identification. Ce point est particulièrement important dans les cliniques.
- **Dommages aux infrastructures** : es arbres dotés d'un système racinaire étendu, tels que les eucalyptus et les peupliers [132], peuvent endommager les infrastructures telles que les fondations, les sentiers piétonniers, les canalisations d'eau souterraines et les câbles électriques et de communication [133]. Pour plus de détails sur les plantes à éviter et les mesures à adopter, voir la [section 2.5g](#).

Le risque de conflits entre les arbres et les infrastructures est élevé lorsque les conditions suivantes sont réunies [132] :

- › Espèces d'arbres de grande taille à maturité
- › Arbres à croissance rapide
- › Arbres plantés dans des volumes de sol limités
- › Couche arable peu profonde recouvrant une couche dure
- › Sentiers piétonniers avec des fondations peu profondes ou des matériaux de base minimaux
- › Systèmes d'irrigation peu profonds
- › Arbres plantés à moins de 2,0 à 3,0 mètres des infrastructures
- › Arbres âgés de plus de 15 à 20 ans

E. Dans quelles circonstances ne pas utiliser cette méthode ?

Une évaluation doit être faite des arbres plantés à proximité de bâtiments, d'infrastructures et le long des voies d'accès, afin qu'ils n'entravent pas la circulation s'ils tombent en raison de catastrophes climatiques [92] [130].

F. Efficacité

La plantation de végétation près des fenêtres et la mise en place de couvertures végétales sur les murs ont permis de réduire la température de 7 °C [134] cité dans [14] dans un climat tropical. De plus, grâce à l'ombrage des arbres, une réduction de 6 à 29 % des besoins en refroidissement (besoin de refroidissement mécanique) a été constatée dans les mêmes climats [135] cité dans [14] et [136] cité dans [14]. À noter qu'il ne s'agit pas d'une réduction de 6 à 29 % de la température. Pour plus de détails sur les études, voir l'[annexe 3.1](#).

Comparaison avec d'autres stratégies :

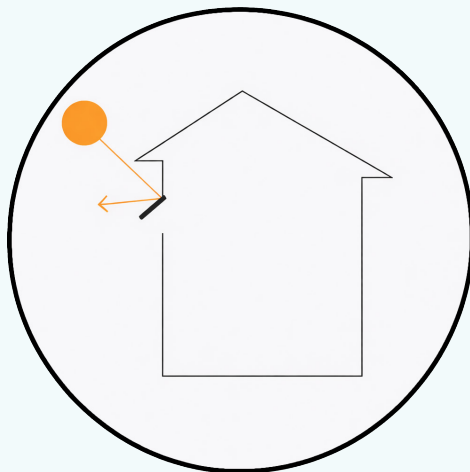
Une étude menée dans une école de deux étages à Riyad (climat aride) a montré que l'utilisation de cours herbeuses et de feuillus pour ombrager les murs s'est avérée efficace pour rafraîchir les locaux en été (réduction de la température de 1,2 °C), mais moins efficace que d'autres stratégies²¹ [53]. Voir l'[annexe 3.1](#) pour plus de détails sur l'étude et la [section 2.2.4](#) pour la ventilation par cour intérieure.

G. Lectures complémentaires

- Critères de sélection des plantes d'ornement pour les patients allergiques : [137]
- Éviter les problèmes de tuyauterie causés par les plantes envahissantes : [138]

2.6 Protection des fenêtres et des murs

Figure 20 : Protection des fenêtres et des murs



Source : œuvre de l'auteur (inspiré par Bill Flinn)



Nouveaux bâtiments ET rénovations



Dispositifs permanents ET temporaires



Climats secs ET humides



Encadré 9 : Protection des fenêtres et des murs

La protection des fenêtres et des murs vise à empêcher la chaleur du soleil (rayonnement) de réchauffer les murs ou de pénétrer dans un bâtiment par les fenêtres. Il existe toute une gamme de dispositifs d'ombrage, tels que les persiennes, les dispositifs à caissons, les avant-toits, les ailettes et les volets.

La protection solaire est particulièrement importante pour les bâtiments dotés de grandes fenêtres, où le rayonnement solaire est transféré directement à l'intérieur du bâtiment. Dans l'hémisphère nord, une protection s'impose sur les façades sud, est et ouest ; dans l'hémisphère sud, sur les façades nord, est et ouest. La façade orientée vers l'équateur (façade sud dans l'hémisphère nord, façade nord dans l'hémisphère sud) est la plus exposée au soleil, suivie par la façade ouest, qui est plus difficile à ombrager en raison de l'angle faible du soleil

Près de l'équateur, de simples avant-toits peuvent fournir un ombrage suffisant aux murs et aux fenêtres, dans une certaine mesure. En plus de la protection contre le soleil, les stores peuvent également protéger de la pluie.

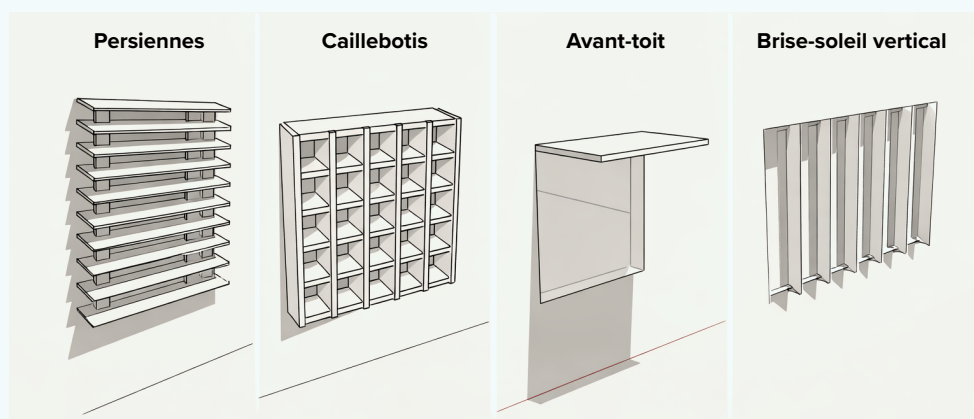
Pour les façades orientées au nord et au sud, l'objectif est d'empêcher le soleil à angle élevé de pénétrer à l'intérieur grâce à des avant-toits, des brise-soleil verticaux, des fenêtres profondément encastrées ou une combinaison de ces éléments. Pour les façades orientées à l'est et à l'ouest (en raison de l'angle plus faible du soleil le matin et le soir), des solutions pratiques comprennent des persiennes multiples ou des caillebotis.

La protection solaire doit trouver un équilibre entre le contrôle de la chaleur et les besoins en lumière naturelle et en chauffage en hiver. Les dispositifs réglables tels que les stores offrent une certaine flexibilité, tandis que les avant-toits doivent être dimensionnés de manière à bloquer le soleil en été tout en laissant passer le soleil en hiver. Dans les régions venteuses ou sujettes aux tempêtes, les dispositifs d'ombrage permanents (par exemple, les avant-toits) sont plus sûrs que les dispositifs fragiles ou temporaires.

A. De quoi s'agit-il ?

Il s'agit d'installer des dispositifs d'ombrage sur les fenêtres et les murs afin d'empêcher la lumière du soleil de pénétrer par les fenêtres ou de réchauffer les murs. Voir la figure 21.

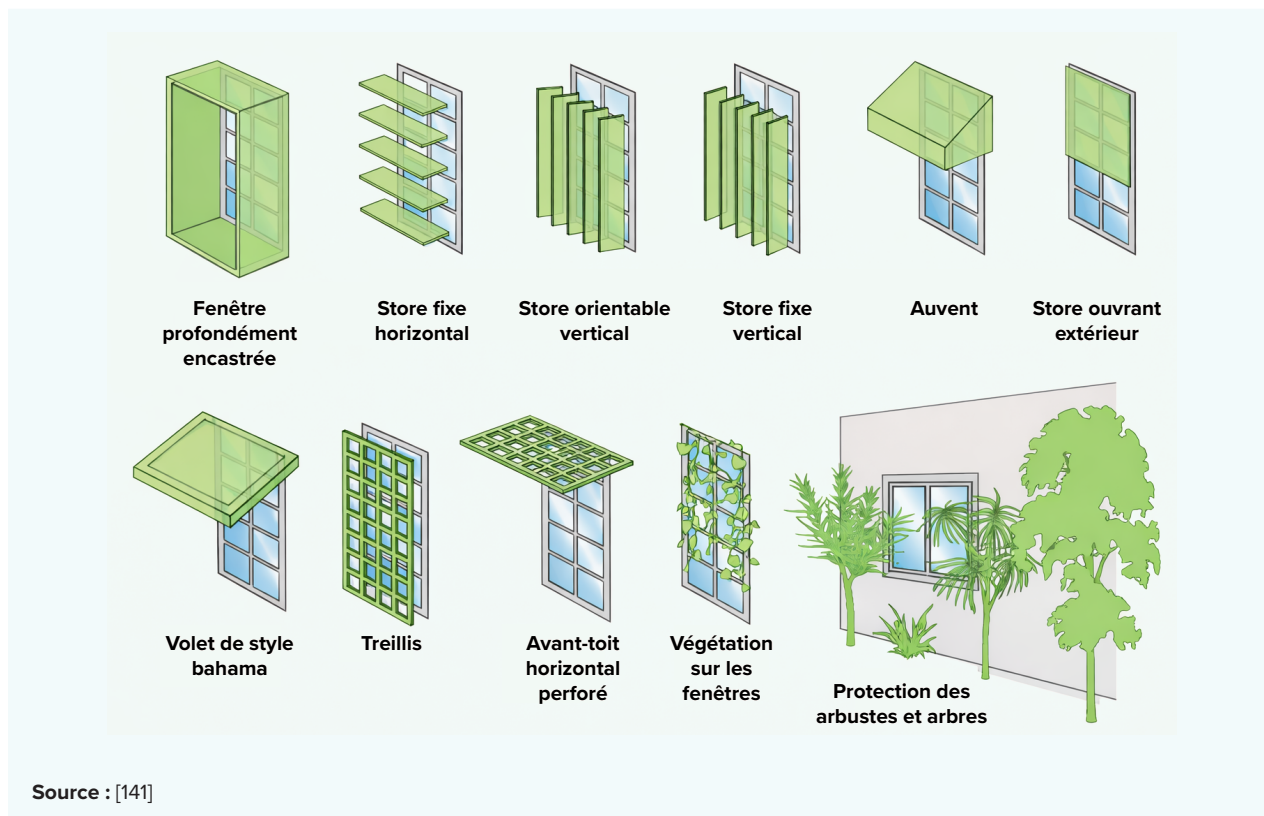
Figure 21 : Dispositifs d'ombrage pour fenêtres et murs



Source : [139], [140] (modifié par l'auteur)

- **Persiennes** : il s'agit de structures à lamelles qui sont généralement installées sur les fenêtres ou, plus rarement, sur les façades ou les toits afin de contrôler la lumière du soleil et l'air. Elles sont composées de lamelles inclinées qui laissent passer la lumière et l'air tout en bloquant la lumière directe du soleil et la pluie. Cette conception permet de réduire l'accumulation de chaleur à l'intérieur des bâtiments tout en assurant la ventilation et en préservant la visibilité. Les persiennes peuvent être fabriquées à partir de divers matériaux tels que le bois, le métal ou le plastique, et peuvent être fixes ou réglables pour contrôler la quantité de lumière et d'air qui pénètre. Les matériaux qui chauffent moins ou qui réfléchissent le rayonnement solaire sont idéaux.
- **Caillebotis** : ils sont similaires aux persiennes, mais ont une structure en forme de grille. Ils sont souvent fabriqués à partir de matériaux légers et servent à diffuser la lumière du soleil et à réduire l'accumulation de chaleur sur les murs et les fenêtres. La structure en grille ouverte permet à l'air et à la lumière de circuler tout en créant de l'ombre. Ils sont particulièrement efficaces sur les surfaces orientées à l'est et à l'ouest, où une protection est nécessaire contre le soleil à angle bas ; les parpaings peuvent être efficaces à cet effet. Les écrans, tels que ceux fabriqués à partir de treillis en bois, fonctionnent de manière similaire. Des écrans plus fins peuvent être utilisés pour préserver l'intimité.
- **Avant-toits** : ce sont des extensions du toit qui dépassent des murs d'un bâtiment. Ils fournissent de l'ombre aux fenêtres et aux murs, contribuant ainsi à bloquer la lumière directe du soleil et à réduire la chaleur à l'intérieur du bâtiment. Les avant-toits peuvent également protéger les entrées de la pluie.
- **Brise-soleil verticaux** : structures verticales fixées à l'extérieur d'un bâtiment, s'étendant généralement à partir des murs. Ils sont conçus pour bloquer la lumière du soleil et ombrager les fenêtres et les murs. Ils peuvent être fabriqués à partir de divers matériaux, tels que le métal ou le béton, et être positionnés à différents angles afin de maximiser leur effet d'ombrage. Ils peuvent potentiellement fonctionner comme des murs latéraux (voir la [section 2.2.5](#)).
- **Volets** : les volets à charnières supérieures constituent également une solution peu coûteuse.

Figure 22 : Autres dispositifs d'ombrage pour fenêtres et murs



Source : [141]

B. Comment ça marche ?

Les dispositifs de protection solaire ou d'ombrage agissent comme une barrière contre la lumière directe du soleil, bloquant le transfert de chaleur par rayonnement (voir la [section 1.3](#) pour consulter les types de transfert de chaleur). Ils sont particulièrement importants lorsque les fenêtres sont de grande taille. Une étude menée dans un climat méditerranéen a révélé qu'un bâtiment dont le rapport fenêtre/mur est de 30 % sans dispositif d'ombrage présente des performances (en termes de chauffage et de refroidissement) similaires à celles d'un bâtiment dont le rapport fenêtre/mur est de 60 % avec dispositif d'ombrage [142].

Si le bâtiment est situé dans l'hémisphère nord, un dispositif d'ombrage sera nécessaire sur les façades sud, est et ouest. Dans l'hémisphère sud, un dispositif d'ombrage sera nécessaire sur les façades nord, est et ouest.

Les façades est sont exposées au soleil le matin, tandis que les façades ouest sont exposées l'après-midi. En général, la façade orientée vers l'équateur est la plus exposée au soleil et nécessite la protection la plus importante. La façade orientée vers l'ouest nécessite également une protection, mais elle est plus difficile à ombrager en raison de l'angle bas du soleil. Près de l'équateur, les façades sud et nord ne sont pas très exposées au soleil ; elles peuvent facilement être protégées par des avant-toits, comme indiqué dans la [section 2.6c](#) [107].

C. Facilité d'application / remarques sur l'application

- **Façades nord et sud** : l'objectif est de bloquer le soleil à angle élevé. Le meilleur moyen d'y parvenir est d'utiliser des avant-toits, des brise-soleil verticaux, des fenêtres profondément encastrées ou une combinaison de ces éléments [139].
- **Façades est et ouest** : en raison de l'angle bas du soleil, les avant-toits simples ne sont pas adaptés car ils seraient trop profonds. Une solution plus pratique consiste à utiliser plusieurs persiennes ou des caillebotis.
- **Dimensionnement des dispositifs d'ombrage** : le dimensionnement et l'orientation des dispositifs d'ombrage dépendent de l'emplacement du bâtiment, de l'orientation de la façade (par exemple, fenêtre ouest) et de la hauteur des fenêtres. Lorsqu'une série de dispositifs d'ombrage horizontaux sont placés les uns au-dessus des autres, la longueur de la projection de chaque dispositif peut être réduite en diminuant l'espacement entre les ombres consécutives (voir la [figure 23](#)).

Des outils en ligne sont disponibles pour calculer les dimensions des dispositifs de protection solaire. Voir la [section 2.6g](#) pour plus de détails. Il existe également de la documentation sur le dimensionnement des dispositifs de protection solaire pour les fenêtres selon différentes orientations, à différentes latitudes et à des heures limites sélectionnées, mais ce dimensionnement ne s'applique qu'aux latitudes proches de l'équateur, entre 0° (équateur) et 10° S (voir la [section 2.6g](#)).

- **Avant-toits** : un dispositif de protection de la toiture (voir la [section 2.4](#)) ou un toit prolongé peut fournir un certain ombrage aux murs et aux fenêtres et peut également offrir une protection contre la pluie.

Pour plus d'informations sur les tentes, voir la [section 2.4c iii](#).

D. Quels en sont les inconvénients ?

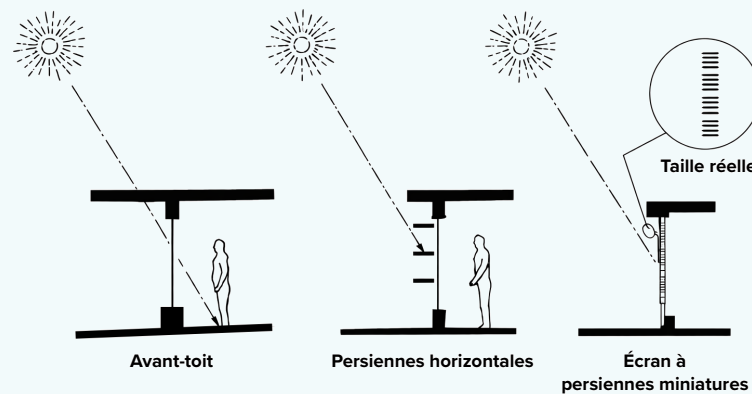
- **Éclairage** : comme la lumière du soleil est bloquée, la lumière du jour dans le bâtiment diminue. Il convient donc de veiller à ce que l'ombrage des fenêtres soit réalisé avec soin afin que la lumière du jour puisse encore pénétrer en quantité suffisante. Les dispositifs d'ombrage multiples, tels que les persiennes, bloquent davantage la lumière du soleil que les dispositifs simples, tels que les pare-soleil. Voir la [section 2.6g](#) pour des conseils sur l'ombrage.
- **Considérations relatives au chauffage en hiver** : dans les climats où les hivers sont froids et où le chauffage est souhaitable, les dispositifs d'ombrage peuvent bloquer le rayonnement solaire, ce qui constitue un problème important en matière de conception.

Les protections réglables, telles que les stores, peuvent être facilement contrôlées. Si des avant-toits sont utilisés, ils ne doivent être suffisamment

profonds que pour bloquer le soleil en été, tout en laissant passer le soleil d'hiver, dont l'angle est plus bas. Voir la [section 2.6g](#) pour plus d'informations.

- **Avant-toits trop profonds :** dans certains cas, la longueur des dispositifs d'ombrage horizontaux nécessaires est trop importante et peu pratique. Si plusieurs stores horizontaux sont utilisés, la longueur requise pour qu'ils dépassent du bâtiment est réduite. C'est pourquoi plusieurs persiennes dépassent beaucoup moins qu'un seul avant-toit. Cependant, cela réduit la lumière du jour à l'intérieur et la visibilité vers l'extérieur. Voir la figure 23.

Figure 23 : Différents exemples de dispositifs d'ombrage horizontaux



Source : [143] cité dans [144]. Modifié par l'auteur.

Pour un même angle d'ensoleillement, il est possible d'éviter les avant-toits profonds en utilisant plusieurs dispositifs d'ombrage horizontaux. La profondeur nécessaire pour ombrager est réduite si l'espacement entre les différents dispositifs d'ombrage est réduit.

E. Dans quelles circonstances ne pas utiliser cette méthode ?

Vents violents, tempêtes : il convient d'être prudent dans les zones soumises à des vents violents et à des tempêtes. Les dispositifs d'ombrage permanents et plus robustes, tels que les avant-toits, ne posent généralement pas de problème, contrairement à ceux qui sont fixés temporairement et qui sont plus fragiles (tels que les persiennes).

F. Efficacité

Des tests effectués à Nicosie (climat méditerranéen) ont montré que l'ombrage des fenêtres entraînait une réduction de 7 % des besoins en climatisation [145] cité dans [55]. Dans une étude menée à Palerme (climat méditerranéen), les stores se sont révélés très efficaces lorsqu'ils étaient associés à une isolation [142]. À New Asuid City (climat aride), les stores ont permis une réduction moyenne de la température de 2 °C dans les quatre orientations (nord, est, sud, ouest) [146].

Comparaison avec d'autres stratégies :

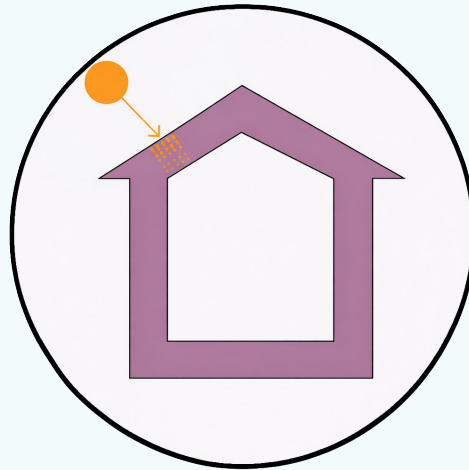
1. Une étude menée dans une école de deux étages à Riyad (climat aride) a montré que l'ombrage des fenêtres était moins efficace que d'autres stratégies de refroidissement estival²² [53] (voir l'[annexe 3.2](#) pour plus de détails).
2. Une étude a testé l'efficacité de différentes stratégies dans trois climats différents. Les résultats ont montré que les stores sont la stratégie la plus efficace à Mumbai (climat tropical), avec une réduction de la température de 2,9 °C, mais qu'ils sont moins efficaces que d'autres stratégies à Nairobi (climat subtropical) et à Porto (climat méditerranéen)²³ [19]. Voir l'[annexe 3.2](#) pour plus de détails.
3. Lors d'essais menés dans une maison préfabriquée destinée aux secours en cas de catastrophe dans la ville de Chengdu (climat subtropical), différentes stratégies d'ombrage ont été comparées et la protection des murs s'est avérée être la plus efficace²⁴ [126]. L'ombrage utilisait des tissus fins et hautement réfléchissants qui pouvaient être retirés en hiver. Une réduction de 18 % du nombre d'heures insupportables (lorsque la température était supérieure à 28 °C) a été obtenue, soit deux fois plus que la réduction obtenue avec la protection du toit. Lorsqu'il a été fait usage conjointement des dispositifs d'ombrage du toit et des murs à l'aide du tissu, cette réduction s'élevait à 28,6 %. En combinaison avec l'ombrage des fenêtres à l'aide de stores, une réduction de 38,2 % a été obtenue. Voir l'[annexe 3.2](#).

G. Lectures complémentaires

- Outils de conception : calculateur en ligne pour les dispositifs de protection solaire : [147]
- Comment fonctionnent les stores solaires : bloquer le soleil tout en laissant entrer la lumière : [148]
- Catalogue de protection solaire : dimensionnement des dispositifs de protection solaire (latitudes comprises entre 0° et 10° S) : [139, p. 8-23]

2.7 Isolation

Figure 24 : Isolation



Source : œuvre de l'auteur (inspiré par Bill Flinn)



Bâtiments neufs ET rénovations



Dispositifs permanents



Climats secs ET humides (moins efficace)



Encadré 10 : Isolation

L'isolation ajoute une couche de matériau au bâtiment qui empêche le transfert de chaleur. Le matériau isolant est composé de substances à faible conductivité thermique, qui agissent comme des barrières au flux de chaleur, réduisant ainsi la capacité de la chaleur présente dans l'environnement à pénétrer dans le bâtiment par les murs ou le toit (et réduisant également la capacité de la chaleur à quitter le bâtiment). Il agit principalement en réduisant le transfert de chaleur par **conduction**. En colmatant les interstices et les cavités, il diminue également le transfert de chaleur par **convection**.

Lorsqu'un film réfléchissant est ajouté à l'isolation, cette combinaison peut empêcher le transfert de chaleur par **rayonnement** en agissant comme un miroir pour la chaleur, tout en empêchant le transfert par conduction.

L'isolation sert principalement de stratégie de refroidissement passif dans les climats secs ; elle est moins utile dans les climats humides. Il convient également d'être prudent lors de l'utilisation d'une isolation avec des matériaux à masse thermique élevée, car cela peut perturber la circulation de la chaleur hors du bâtiment pendant la nuit. Il est important d'associer l'isolation à une ventilation stratégique (voir la [section 2.2.3](#)) afin de garantir que la chaleur ne reste pas emprisonnée à l'intérieur du bâtiment et puisse être libérée au moment opportun.

L'isolation se présente sous différentes formes, notamment sous forme de panneaux rigides et de rouleaux pouvant être appliqués sur les toits et/ou les murs. Elle est fabriquée à partir de différents matériaux, tels que la laine minérale, la laine de verre, la cellulose, l'isolant réfléchissant, le polystyrène extrudé (XPS), le polystyrène expansé (PSE) et la laine de mouton. Le choix du matériau dépend de sa disponibilité, de sa forme physique, de son coût, de sa toxicité, de l'aspect écologique, de ses performances, de sa résistance à l'eau, de sa résistance acoustique, de sa résistance mécanique, de sa résistance aux nuisibles et aux champignons, et de son entretien. La sécurité incendie est un critère particulièrement important à prendre en compte.

La performance thermique d'un matériau isolant est évaluée à l'aide d'un indicateur appelé « valeur R ». Plus la valeur R est élevée, plus le matériau est performant en tant qu'isolant.

L'isolation peut être appliquée aussi bien aux bâtiments existants qu'aux bâtiments neufs. Dans la plupart des cas, un cadre est créé et fixé aux murs ou au toit pour monter l'isolant. Si un isolant en film réfléchissant est utilisé, il doit être positionné avec le côté brillant vers l'extérieur, face à une lame d'air ou une cavité.

A. De quoi s'agit-il ?

L'isolation est une couche de matériau qui empêche la chaleur de se propager. Des matériaux qui sont de mauvais conducteurs de chaleur (à faible conductivité thermique) sont utilisés pour créer cette barrière.

Différents matériaux peuvent être choisis en fonction de leur disponibilité, de leur forme physique, de leur coût, de leur toxicité, de leur aspect écologique, de leurs performances, de leur résistance à l'eau, de leur résistance acoustique, de leur résistance mécanique, de leur résistance aux nuisibles et aux champignons, de leur entretien et de leur sécurité incendie.

Les matériaux synthétiques hautement performants comprennent le XPS, le PSE et le polyuréthane (PU). Lorsque les ressources sont limitées, il existe également des

alternatives rentables et durables qui peuvent favoriser les opportunités d'emploi et l'industrie locale [22]. Selon le matériau, l'isolation se présente sous différentes formes, notamment des panneaux rigides ou des rouleaux de matériau.

L'isolation des murs peut également être réalisée à partir de panneaux de biomasse créés à partir de fibres de différentes pulpes, telles que la canne à sucre, le fenugrec, la bouse de vache, l'attier et le bois [22]. La laine de mouton et la paille sont également des options possibles. Ces options d'origine naturelle dépendent du contexte ; toutes ces options ne seront pas pertinentes dans tous les contextes.

L'isolation du toit peut également être réalisée à l'aide de matériaux tels que des briques, des pots en terre cuite inversés dans du béton à la chaux, et en posant une couche de tuiles sur des pots en argile [23], [24]. L'isolation du toit est particulièrement importante pour les toits en tôle ondulée, car ceux-ci deviennent très chauds. L'isolation peut également être placée au plafond.

L'isolation par film réfléchissant peut être constituée d'une ou plusieurs couches de film réfléchissant (pour empêcher le transfert de chaleur par rayonnement), combinées à des matériaux qui empêchent le transfert de chaleur par conduction (tels que la mousse ou les bulles de plastique). Voir également les barrières radiantes à la [section 2.4b](#) et les lectures complémentaires de la [section 2.4g](#). Pour des conseils sur l'installation, voir la [section 2.7c](#).

B. Comment ça marche ?

L'isolation réduit la capacité de la chaleur présente dans l'environnement à pénétrer dans le bâtiment par les murs ou le toit. Elle y parvient principalement en réduisant le transfert de chaleur par conduction et convection. Cependant, l'isolation par film réfléchissant empêche également le transfert de chaleur par rayonnement. Voir la [section 1.3](#) pour consulter les types de transfert de chaleur.

C. Facilité d'application / remarques sur l'application

L'isolation peut être appliquée aussi bien sur des bâtiments existants que sur des bâtiments neufs. Dans la plupart des cas, un cadre est créé et fixé aux murs ou au toit pour monter l'isolation. Pour plus d'informations sur l'installation, voir la [section 2.7g](#).

Plusieurs facteurs déterminent si l'isolation est appliquée à l'extérieur (externe) ou à l'intérieur (interne). Les études suggèrent généralement que l'isolation externe est plus efficace pour empêcher le transfert de chaleur, mais l'isolation interne est plus facile à appliquer et moins exposée aux dommages causés par les éléments.

Dans un climat chaud et sec, l'isolation du toit doit être placée sur le plancher du grenier, directement au-dessus et à l'extérieur de la partie du bâtiment qui est utilisée, mais sous l'espace du toit. Cela crée une barrière entre la partie utilisée du bâtiment et l'espace inutilisé du toit et permet à l'air chaud de s'échapper pendant la nuit.

Lorsque la principale stratégie de refroidissement passif consiste à utiliser la masse thermique pour stocker la chaleur pendant la journée et la libérer pendant la nuit (voir la [section 2.1](#)), l'isolation peut ne pas être appropriée car elle peut interférer avec la perte de chaleur nocturne.

L'isolation est moins efficace comme stratégie de refroidissement passif dans les climats humides, mais dans les régions très ensoleillées, elle peut empêcher le transfert de la chaleur (chaleur rayonnée) à travers les toits ou les murs solides. Si l'isolation est utilisée dans ces environnements, il convient de veiller à éviter l'accumulation d'humidité.

Si l'on utilise du PSE ou du XPS, il convient d'utiliser des matériaux ignifuges, tels que des bandes de laine minérale, comme barrières là où il existe un risque de propagation du feu (par exemple au niveau des joints entre les matériaux de construction, entre les étages et les espaces autour des fenêtres et des portes, et en particulier à proximité de sources potentielles de risque d'incendie telles que les boîtiers électriques). Les laines inorganiques telles que la laine minérale et la fibre de verre sont des options résistantes au feu, la laine minérale présentant de meilleures performances en matière de résistance au feu [25]. Il existe également des options organiques présentant un faible risque d'incendie, telles que la paille compressée [26], le liège [27] et la brique de chanvre [28]. Pour plus de détails sur la sécurité incendie, voir les [sections 2.7d](#) et [2.7f](#).

Isolation réfléchissante : le côté brillant doit être orienté vers une cavité d'air fermée d'une épaisseur minimale de 19 mm [29] (voir la [section 2.7g](#) pour savoir pourquoi une cavité d'air est nécessaire). Dans les murs, l'isolation réfléchissante doit être placée de façon à ce que le côté brillant soit tourné vers l'extérieur et vers la cavité d'air, afin d'agir comme un « miroir » pour la chaleur rayonnante. Dans les toitures, le côté brillant doit être orienté vers le bas, là encore face à une cavité d'air (généralement le grenier). Ici, ce n'est pas le pouvoir réfléchissant de l'isolant, mais le fait que la surface réfléchissante soit également un faible émetteur de rayonnement, qui contribue à l'effet de refroidissement (voir la [section 2.4](#) pour plus d'informations sur cet effet). Le fait de placer le côté brillant vers le bas empêche également qu'il ne se recouvre de poussière [17]. Pour plus d'informations sur l'installation, voir la [section 2.7g](#). Dans une étude, des emballages alimentaires recouverts d'une couche d'aluminium (qui auraient autrement fini dans une décharge) ont été réutilisés comme isolant réfléchissant. Ils ont été superposés pour plus de solidité (trois couches ont été utilisées dans le cadre de l'étude) et leurs joints ont été repassés

pour les assembler. Ils ont ensuite été fixés sur un matériau de support, comme de la toile de jute, du carton ou une bâche [124]. Une autre étude a proposé de recouvrir la surface interne des tentes d'un film aluminium [126] afin de former une barrière radiante, mais n'a fourni aucune preuve de l'efficacité de cette technique.

Les assemblages à isolation murale avec isolation fixée directement au mur conviennent aux climats chauds où il n'y a pas de risque de condensation. L'isolation sous forme de panneaux ou de couvertures, comme la laine minérale, peut être installée par friction entre les solives en bois, tandis que les panneaux rigides d'isolation, comme le PSE, peuvent être fixés directement au mur. Ils sont ensuite recouverts d'un revêtement, comme des plaques de plâtre ou du plâtre.

Les toitures ventilées avec isolation placée au plafond/grenier sont réputées efficaces dans tous les climats, tant pour les toitures en pente que pour les toitures plates.

D. Quels en sont les inconvénients ?

- **Efficacité réduite dans les climats chauds et humides** : lorsqu'il n'y a pratiquement pas de différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, l'isolation thermique n'a que peu ou pas d'effet, sauf si la façade ou le toit est exposé au soleil. C'est pourquoi, en général, l'isolation thermique n'est pas utile dans les climats chauds et humides lorsque le bâtiment est refroidi de manière passive [17].
- **Perte de performance due à l'humidité/à la rétention d'humidité** : les sources d'humidité, telles que les conduites d'eau, doivent être soigneusement vérifiées avant la pose de l'isolation, afin que l'eau ne s'infilte pas dans l'isolation, l'endommageant et réduisant ainsi son efficacité. Dans les climats humides, afin de permettre à l'humidité présente à l'intérieur du bâtiment de s'échapper vers l'extérieur, il convient d'utiliser, pour l'isolation [45], des matériaux perméables à la vapeur, tels que la laine minérale, qui ne favorisent pas la croissance de moisissures [46]. Les films réfléchissants empêchent également le mouvement de l'humidité et, lorsque l'intérieur d'un bâtiment présente un taux d'humidité élevé (en raison, par exemple, d'une forte occupation dans un climat sec), ils peuvent retenir l'humidité à l'intérieur du bâtiment. Dans ces circonstances, envisager d'utiliser une isolation réfléchissante perméable.
- **Infestation de nuisibles** : les souris et autres nuisibles peuvent infester la cavité isolante s'ils trouvent un moyen d'y pénétrer. Cela est particulièrement vrai pour certains types d'isolants. Voir la [section 2.7g](#) pour plus de détails sur les isolants susceptibles d'être infestés. Il est recommandé de colmater toutes les fissures et crevasses et d'installer un treillis perforé anti-nuisibles, en particulier dans les parties inférieures du mur [42].

- **Surchauffe** : un bâtiment bien isolé mais mal ventilé peut également empêcher la chaleur de se propager de l'intérieur vers l'extérieur, la piégeant à l'intérieur. La chaleur peut être générée par l'activité des occupants du bâtiment et par les équipements électroniques, en particulier dans les zones densément peuplées telles que les salles communes, provoquant une surchauffe. Par conséquent, lorsque les températures extérieures sont inférieures aux températures intérieures (ce qui est souvent le cas la nuit, en particulier dans les climats secs), l'isolation doit être combinée à une ventilation naturelle pour évacuer la chaleur. Voir la [section 2.2.3](#) pour plus d'informations sur le moment où ouvrir et fermer les fenêtres pour permettre une ventilation naturelle.
- **Risques d'incendie** : la sécurité incendie doit être évaluée lors du choix de l'isolant. Les isolants à base de polystyrène, tels que le PSE et le XPS, sont combustibles et présentent des risques d'incendie [43]. En termes de fumée et de toxicité, le PSE présente un risque plus important que le XPS après avoir pris feu [44]. Il existe des options biosourcées résistantes au feu, telles que la laine de mouton.

E. Dans quelles circonstances ne pas utiliser cette méthode ?

L'isolant peut être utilisé dans tous les climats, mais il est généralement beaucoup plus efficace dans les climats secs. Il convient de faire preuve de vigilance en matière d'humidité et de prévention de la condensation.

F. Efficacité

L'isolation des murs est l'une des stratégies les plus fréquemment évoquées dans la littérature [48] et s'avère efficace dans de nombreux contextes.

Diverses études suggèrent que l'isolation est efficace pour réduire les températures internes de 1 à 3 °C [49], [42], [50] cité dans [49]. Certaines études ont montré que l'isolation peut réduire de 30 à 40 % la quantité de chaleur à évacuer d'un bâtiment pour maintenir une température confortable [51] cité dans [49] et [52] cité dans [49]. Cependant, ces études utilisaient généralement des matériaux isolants de meilleure qualité, tels que le polystyrène ou le polyuréthane.

La performance thermique d'un matériau isolant est évaluée à l'aide d'une mesure appelée valeur R. Plus la valeur R est élevée, plus le matériau est performant en tant qu'isolant. Par exemple, une valeur R de 4 est plus performante qu'une valeur R de 3. La valeur R augmente avec l'épaisseur du matériau. Pour plus d'informations sur les valeurs R des différents isolants, voir le [tableau 4](#).

Les études ont également démontré l'importance d'utiliser la ventilation nocturne (voir la [section 2.2.3](#)) en combinaison avec l'isolation dans les climats secs. En effet, dans certains cas, bien que les températures maximales dans le bâtiment

aient diminué après l'installation d'une isolation, les températures moyennes (qui incluaient les températures nocturnes) ont augmenté, car la chaleur était retenue à l'intérieur du bâtiment par l'isolation et qu'il n'y avait pas de ventilation efficace [42].

Pour plus de détails sur les différentes études/stratégies et leur efficacité, voir l'[annexe 3.1](#).

Comparaison avec d'autres stratégies :

1. Une étude comparant l'efficacité de différentes stratégies²⁵ dans une école à deux étages à Riyad (climat aride) a montré que l'isolation avec ventilation nocturne (voir la [section 2.2.3](#)) était l'une des stratégies les plus efficaces pour le refroidissement estival, entraînant une réduction de 1,9 °C de la température moyenne [53]. La même étude a révélé que, dans les climats chauds et secs, la ventilation nocturne est très importante pour rendre l'isolation efficace pour le refroidissement (sinon, la chaleur accumulée pendant la journée peut rester emprisonnée à l'intérieur). Voir l'[annexe 3.2](#) pour plus de détails sur l'étude. Cette conclusion a été corroborée par des essais menés dans des abris préfabriqués du HCR en Jordanie (climat aride), qui ont enregistré une hausse générale de la température lorsque l'isolation était utilisée avec une ventilation uniquement diurne (fenêtres ouvertes entre 9 h et 21 h) [42]. Voir l'[annexe 3.2](#) pour plus de détails sur l'étude.
2. Des tests réalisés dans des chambres d'hôpital à Illam (climat méditerranéen) ont montré que l'isolation du toit était la stratégie la plus efficace, permettant une réduction de près de 25 % des besoins en climatisation²⁶ [54]. Voir l'[annexe 3.2](#) pour plus de détails sur l'étude.
3. Une étude menée en Malaisie (climat tropical) a révélé que l'isolation était la stratégie la plus efficace pour réduire les températures et garantir la rentabilité²⁷ [55]. Voir l'[annexe 3.2](#).

Tableau 4 : Comparaison des différents types d'isolation

	Type d'isolation	Avantages	Inconvénients	Valeur R ²⁸ en (ft ² ·°F·h)/ BTU
i)	Laine minérale et laine de verre	<ul style="list-style-type: none"> • Très efficace en matière de résistance au feu, sans ajout de produits chimiques ignifuges. La laine minérale est plus résistante au feu que la laine de verre. • Peut également être utilisée comme coupe-feu, sauf si elle est recouverte/finie avec un matériau inflammable • Non cancérigène et rigoureusement testée pour la santé [46] • Ne favorise pas la croissance des moisissures [46] • Non corrosive • Idéale pour les projets de bricolage [56] 	<ul style="list-style-type: none"> • Les performances thermiques ne sont pas aussi bonnes que celles de la mousse PU, du XPS ou du PSE. Performances similaires à celles de la cellulose et de la laine de mouton • Peut provoquer des irritations, il est donc nécessaire de porter des gants et un masque pour la manipuler • Sensible aux infestations de parasites 	<p>Laine de verre = R2,9 - R3,8 [57]</p> <p>Laine minérale = R3,7 - R4,3 [58]</p>

	Type d'isolation	Avantages	Inconvénients	Valeur R ²⁸ en (ft ² ·°F·h)/ BTU
ii)	Mousse de PU (polyuréthane)	<ul style="list-style-type: none"> • Très haute performance thermique • Colmate très efficacement les fissures et les crevasses grâce à sa pulvérisation • Ne constitue pas une source de nourriture pour les nuisibles, ce qui réduit le risque d'attirer les parasites\ 	<ul style="list-style-type: none"> • Coûteuse • Difficile à appliquer car nécessite un équipement de pulvérisation spécialisé • Nécessite des retardateurs de flamme pour être considéré comme ignifuge [59] • Aucune preuve concluante de son innocuité pour la santé [46] • Les rongeurs peuvent la ronger pour atteindre d'autres zones. Si la mousse n'est pas installée correctement et qu'il y a des espaces, elle peut devenir un point d'entrée pour les nuisibles 	R6 - R7 [57]
iii)	Isolation en cellulose	<ul style="list-style-type: none"> • Écologique 	<ul style="list-style-type: none"> • L'isolation en cellulose non traitée présente des problèmes tels que la sécurité incendie, la prolifération de moisissures et l'attraction de nuisibles tels que les termites, les rongeurs et les insectes. Elle nécessite un traitement approprié avec des produits chimiques tels que des retardateurs de flamme et des pesticides pour éviter ces problèmes. Bien que des options appropriées soient disponibles dans le commerce sur certains marchés, ce n'est pas le cas dans de nombreux endroits. Par exemple, elle peut être corrosive si elle est traitée avec des produits chimiques corrosifs pour la rendre ignifuge [46]. 	R3.6 – R3.9 [57]

	Type d'isolation	Avantages	Inconvénients	Valeur R ²⁸ en (ft ² ·°F·h)/ BTU
iv)	Isolants réfléchissants	<ul style="list-style-type: none"> • Conviennent aux projets de bricolage [56] • Conviennent aux charpentes standard [56] • La forme alvéolaire convient bien aux charpentes irrégulières ou comportant des obstacles [56]. • Plus efficace pour empêcher la chaleur de descendre ; l'efficacité dépend de l'espacement et du nombre de films d'aluminium [56]. • Le coût dépend généralement de la disponibilité sur le marché, mais ils sont moins chers que la mousse de polyuréthane. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessitent une cavité d'air et une orientation correcte pour être efficaces. Voir les sections 2.7g et 2.7c pour plus de détails. 	La valeur R n'est pas un bon indicateur de l'efficacité de l'isolation réfléchissante. Sa réflectivité est un meilleur indicateur [60].

	Type d'isolation	Avantages	Inconvénients	Valeur R ²⁸ en (ft ² ·°F·h)/ BTU
v)	Laine de mouton	<ul style="list-style-type: none"> • Saine [61] • Écologique [61] • Ne nécessite pas de gants pour l'installation. Facile à installer • Résistante au feu. Elle ne brûle pas, mais se consume à l'écart du feu et s'éteint d'elle-même [62]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ses performances thermiques sont comparables à celles de la fibre de verre [61] • Peut être 2 à 3 fois plus cher que la fibre de verre si elle n'est pas facilement accessible [61] • Peut ne pas être facilement accessible [61] • Risque d'odeurs, en particulier dans les climats humides [61] • Risque d'infestation par des parasites [61] • Les performances thermiques diminuent avec le temps en raison de la compression [61]. 	R3,6 - R4,3 [63]

Remarque : ce tableau ne présente pas une liste exhaustive des matériaux isolants possibles.

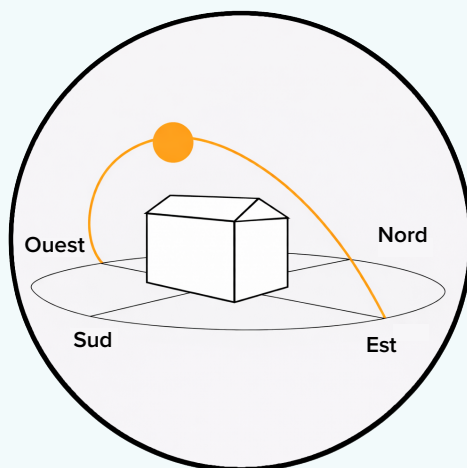
Pour plus d'informations sur la comparaison des différents types d'isolants et un bref aperçu des méthodes d'installation, voir [56].

G. Lectures complémentaires

- Guide de sélection des isolants : [46]
- Guide d'installation des isolants (laine minérale, laine de mouton, XPS, PSE, isolants réfléchissants) (PDF + vidéos) : [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70], [71]
- Guide relatif aux enduits sur isolation : [72]
- Installation d'une isolation de toiture sur un toit plat : [41]
- Guide de rénovation de l'isolation : [73]
- Où un pare-feu est-il nécessaire : [74], [75]
- Guide technique sur la conception d'une section de mur dans les climats chauds et humides avec isolation : [76]
- Conseils pour l'installation de films réfléchissants : [77]
- Pourquoi une lame d'air est-elle nécessaire pour l'isolation réfléchissante et conseils sur les lames d'air : [78]
- Problèmes de condensation dus à l'isolation : [79]

2.8 Forme des bâtiments et zonage

Figure 25 : Forme des bâtiments et zonage



Source : œuvre de l'auteur



Nouveaux bâtiments



Dispositifs permanents ET temporaires



Climats secs ET humides

Cette section traite des stratégies spécifiques aux nouveaux bâtiments.



Encadré 11 : Forme des bâtiments et zonage

Si vous construisez de nouveaux bâtiments, optimisez leur forme et leur emplacement dès la phase de conception afin de réduire les apports de chaleur solaire et d'améliorer la ventilation. Le zonage et l'agencement permettent d'organiser les espaces intérieurs de manière à maximiser le refroidissement, l'éclairage naturel et le confort dans certaines zones fonctionnelles clés telles que les salles de classe ou les salles d'hôpital.

Les côtés longs du bâtiment doivent être orientés nord-sud afin de réduire l'exposition au soleil à angle bas (le matin et le soir) sur les murs et les fenêtres : le mur long face à l'équateur (mur sud dans l'hémisphère nord) est ombragé afin de réduire l'exposition à angle élevé.

L'orientation doit également tenir compte des vents dominants, afin de capter les brises rafraîchissantes de l'été tout en protégeant contre les vents chauds à l'aide d'arbres ou de murs latéraux.

L'auto-ombrage peut être obtenu en divisant les grands bâtiments en formes plus étroites, en incorporant des cours intérieures, des balcons profonds ou des fenêtres en retrait.

Les pièces peu profondes améliorent la ventilation naturelle et l'éclairage naturel, tandis que les plafonds hauts permettent une ventilation par tirage en laissant l'air chaud monter et s'échapper. Cependant, si les pièces sont trop peu profondes, ce système peut ne pas fonctionner correctement et elles doivent donc être conçues avec soin.

Les stratégies de zonage consistent notamment à placer les zones auxiliaires, telles que les toilettes, les espaces de rangement et les escaliers, sur les façades orientées vers l'équateur ou vers l'ouest, afin qu'elles servent de tampons thermiques pour les principaux espaces fonctionnels.

Les cours intérieures améliorent à la fois la ventilation et l'éclairage naturel. Les principales zones fonctionnelles doivent être séparées des espaces auxiliaires si un système de refroidissement actif est utilisé, la priorité étant donnée aux espaces moins exposés au soleil. Les agencements qui favorisent les cours intérieures et les pièces étroites et linéaires permettent une meilleure ventilation et un meilleur éclairage naturel que les espaces profonds et massifs.

A. De quoi s'agit-il ?

- **Orientation et forme du bâtiment** : orienter le bâtiment et concevoir sa forme et sa taille de manière à minimiser le rayonnement solaire ou à améliorer la ventilation.
- **Zonage et agencement** : utiliser des stratégies pour agencer les espaces à l'intérieur d'un bâtiment et les organiser par zones afin de tirer parti des stratégies de refroidissement et d'offrir de meilleures conditions environnementales (refroidissement, éclairage naturel), au moins dans les principaux espaces fonctionnels, tels que les salles de classe, les salles d'hôpital, etc.

B. Comment ça marche ?

- **Orientation et forme du bâtiment – orientation par rapport au soleil :** le côté long du bâtiment doit être orienté nord/sud. Cela augmente la durée d'exposition au soleil de la façade, mais réduit sa durée d'exposition à un angle solaire bas, ce qui est plus difficile à éviter par l'ombrage [23]. Pour des représentations schématiques simples des formes recommandées, voir la [section 2.8g](#).

Il convient d'éviter les façades orientées vers l'est et l'ouest en raison des apports solaires élevés qui peuvent être difficiles à ombrager [106].

- **Orientation et forme du bâtiment – orientation par rapport au vent :** évaluer la direction dominante du vent sur le site en été et en hiver et orienter le bâtiment de manière à recevoir davantage les vents estivaux, sauf s'ils sont trop chauds (comme le foehn et le sirocco). Dans ce cas, il convient d'orienter le bâtiment de manière à le protéger des vents. La protection contre les vents hivernaux peut également être assurée par des feuillus ; les vents estivaux peuvent également être refroidis et canalisés par des arbres et des murs latéraux. Voir la [section 2.5](#) pour plus de détails sur les arbres et la [section 2.2.5](#) pour les murs latéraux. À noter que dans certaines régions (par exemple, près des côtes et dans les vallées montagneuses), des vents frais peuvent souffler à certains moments de la journée.
- **Orientation et forme des bâtiments - auto-ombrage :** en divisant les formes plus grandes et plus profondes (vues de dessus) en bâtiments plus petits et plus étroits, il est possible d'obtenir un auto-ombrage et un éclairage naturel : cela peut être réalisé en introduisant des cours intérieures, qui doivent être proportionnées de façon à être ombragées et/ou à contenir des éléments rafraîchissants tels que des arbres, de l'eau et un revêtement souple. Pour plus d'informations sur les cours intérieures, voir la [section 2.2.4](#). L'auto-ombrage peut également être créé par des balcons profonds ou des renforcements de fenêtres profonds.
- **Orientation et forme des bâtiments – profondeur réduite des pièces :** bien que les plans profonds soient souvent préférés aux plans linéaires peu profonds dans les cliniques (en raison de la plus grande proximité des services médicaux), les pièces moins profondes sont préférables pour une ventilation naturelle et un éclairage naturel efficaces [91].
- **Orientation et forme du bâtiment – plafonds hauts :** les espaces hauts, tels que ceux présentant des plafonds hauts, des hauteurs de deux étages ou des escaliers, favorisent la ventilation par tirage en offrant un espace pour que l'air chaud monte et s'échappe. Voir la [section 2.2.2](#) pour plus d'informations sur la ventilation par tirage.
- **Zonage – zones auxiliaires comme barrières thermiques :** les zones auxiliaires, telles que les toilettes, les espaces de stockage et les escaliers, situées dans

des zones à fort ensoleillement (façade orientée vers l'équateur et façade ouest) peuvent servir de barrières thermiques pour protéger les zones intérieures abritant les fonctions principales. Toutefois, cela n'est recommandé que si la lumière du jour et la ventilation naturelle dans les zones principales sont suffisantes. Cela peut être possible grâce à des cours intérieures.

- **Zonage – cours intérieures** : les cours intérieures sont recommandées pour la ventilation et l'éclairage naturel. Voir la [section 2.2g](#) pour plus de détails sur la ventilation des cours intérieures.
- **Zonage – séparation des principaux espaces fonctionnels en cas de refroidissement actif** : il est recommandé de séparer les principaux espaces fonctionnels (par exemple, les patients ambulatoires et les patients hospitalisés dans les cliniques, les salles de classe dans les écoles) des espaces auxiliaires, tels que les couloirs. Il est important de réduire l'énergie nécessaire au système de refroidissement actif, de sorte que seuls les principaux espaces fonctionnels soient refroidis [91]. Les zones refroidies activement doivent également être celles qui reçoivent moins de rayonnement solaire direct. Pour plus d'informations sur le refroidissement actif, voir la [section 2.9](#).
- **Aménagement** : un aménagement en peigne ou en complexe est recommandé, plutôt qu'un aménagement centralisé, en particulier dans les établissements de santé [91]. En effet, les pièces étroites (aménagement en peigne) et les cours intérieures (aménagement en complexe) sont efficaces pour la ventilation et l'éclairage naturel, contrairement aux pièces plus profondes dans une construction massive (aménagement centralisé).

Tableau 5 : Comparaison des dispositions

	Style	Caractéristiques
i)	Aménagement en peigne	<ul style="list-style-type: none"> • Construction linéaire • Les pièces étroites offrent une bonne ventilation naturelle et un bon éclairage naturel • Efficace pour la ventilation naturelle
ii)	Aménagement en complexe	<ul style="list-style-type: none"> • Moins affecté par le rayonnement solaire • L'air plus frais des cours intérieures circule vers les zones fonctionnelles médicales, qui seraient autrement chaudes • La végétation et l'eau assurent le refroidissement • Efficace pour la ventilation naturelle

iii)	Aménagement centralisé	<ul style="list-style-type: none"> • Construction massive • Manque de ventilation naturelle et forte consommation d'énergie • Inefficace – à éviter
------	-------------------------------	--

C. Facilité d'application / remarques sur l'application

Toutes les stratégies de la [section 2.8b](#) sont applicables aux nouveaux bâtiments.

D. Quels en sont les inconvénients ?

Si les pièces sont trop peu profondes, elles risquent de ne pas fonctionner correctement et doivent donc être conçues avec soin.

E. Dans quelles circonstances ne pas utiliser cette méthode ?

Implantation de bâtiments dans des zones exposées aux risques climatiques : l'implantation de nouveaux bâtiments et de nouvelles infrastructures doit tenir compte des scénarios de risques climatiques, tels que l'augmentation des sécheresses, inondations, tempêtes, précipitations prolongées, vents violents, vagues de chaleur et l'élévation du niveau de la mer [92]. L'implantation doit être le premier élément à prendre en considération et peut permettre d'éviter des dommages catastrophiques [92].

F. Efficacité

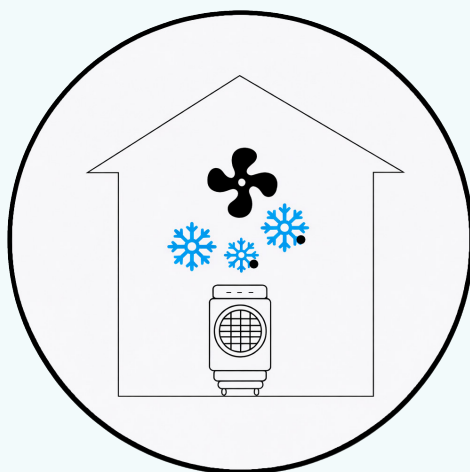
Des études menées dans des climats tropicaux et méditerranéens ont montré qu'il était possible de réduire les besoins en climatisation de 6 à 11 % en orientant le côté long du bâtiment vers le nord et le sud plutôt que vers l'est et l'ouest [55], [142]. Voir l'[annexe 3.1.8](#) pour plus de détails sur ces études.

G. Lectures complémentaires

- Orientation et forme des bâtiments - représentations schématiques des formes : [23, p. 21-25], [149]

2.9 Refroidissement actif et refroidissement par évaporation directe

Figure 26 : Systèmes de refroidissement actif



Source : œuvre de l'auteur



Nouveaux bâtiments ET rénovations



Dispositifs permanents ET temporaires



Climats secs ET humides (ne s'applique pas au refroidissement par évaporation)



Encadré 12 : Refroidissement actif

Les **systèmes de refroidissement actif** ont besoin d'énergie pour fonctionner. Ces systèmes comprennent : des ventilateurs qui soufflent de l'air pour produire un effet rafraîchissant en assurant l'évaporation de la transpiration cutanée (ventilateurs de plafond et sur pied) ; des ventilateurs qui expulsent l'air chaud et vicié du bâtiment vers l'extérieur (extracteurs d'air) ; ou des systèmes qui réduisent la température de l'air par refroidissement évaporatif direct (rafraîchisseurs d'air par évaporation). Les rafraîchisseurs d'air par évaporation se sont révélés très efficaces dans les climats chauds et secs.

Le **refroidissement par évaporation directe** peut également être obtenu à l'aide de méthodes passives, telles que la suspension de tissus humides près des fenêtres pour refroidir l'air entrant. Il ne convient qu'aux climats secs.

À l'exception des ventilateurs de plafond, la plupart des systèmes de refroidissement actifs peuvent être utilisés dans des structures temporaires ou permanentes en raison de leur portabilité, à condition toutefois qu'une source d'alimentation électrique soit disponible. Le système de refroidissement par évaporation directe, y compris les rafraîchisseurs d'air par évaporation à monter soi-même, convient également aux bâtiments temporaires et permanents, car il est simple à mettre en œuvre.

Les systèmes de refroidissement actif nécessitent une alimentation électrique continue, qui peut être fournie par des panneaux solaires, mais qui peut être coûteuse. Les grands ventilateurs peuvent être difficiles à installer et bruyants ; ils sont également inefficaces, voire dangereux, à des températures élevées. Les ventilateurs portables ne refroidissent que de petites surfaces, ce qui nécessite plusieurs appareils pour les espaces plus grands. Les ventilateurs de plafond peuvent mélanger l'air, mais peuvent réduire la qualité de l'air et nuire à la ventilation naturelle, en particulier dans les établissements de santé ; ils doivent être utilisés avec précaution en combinaison avec des extracteurs d'air.

Le refroidissement par évaporation directe augmente l'humidité, ce qui peut être inconfortable dans les climats humides et peut entraîner la formation de moisissures si le taux d'humidité devient trop élevé. Il nécessite de l'eau, ce qui peut poser problème dans les régions où l'eau est rare. Les rafraîchisseurs d'air par évaporation peuvent favoriser la prolifération des moustiques s'ils sont mal entretenus, perdre en efficacité en présence d'eau riche en calcium, de vents violents ou dans des conditions humides, et peuvent provoquer de la condensation dans les climats humides, entraînant la formation de moisissures.

A. De quoi s'agit-il ?

Le **refroidissement actif** consiste en des stratégies de refroidissement qui nécessitent de l'énergie.

Le **refroidissement par évaporation directe** utilise l'évaporation pour refroidir l'air.

B. Comment ça marche ? / Remarques sur l'application

Ventilateurs :

- **Ventilateurs portables** : ils peuvent réduire la température corporelle en remplaçant l'« enveloppe » d'air chaud qui entoure une personne (produite lorsqu'un individu dégage de la chaleur dans l'air) par de l'air plus frais provenant de l'environnement, et en favorisant l'évaporation de la transpiration. Ils peuvent améliorer la ventilation naturelle globale s'ils sont placés près des fenêtres du côté du bâtiment exposé au vent. Ils peuvent également fournir un refroidissement à des personnes spécifiques, ce qui peut être souhaitable, par exemple, dans les cliniques où les patients et le personnel, soumis à des conditions différentes, peuvent avoir des besoins différents. Il convient d'utiliser des ventilateurs de refroidissement à plusieurs vitesses, afin que les personnes puissent régler la vitesse selon leurs besoins [16].
- **Extracteurs d'air** : pour améliorer la circulation de l'air dans une pièce, l'air chaud peut être expulsé de la pièce, généralement à l'aide d'un extracteur d'air ou d'un appareil similaire. Pour un résultat optimal, l'extracteur doit être placé près d'une fenêtre, du côté du bâtiment situé à l'abri du vent. De cette façon, l'air frais de l'extérieur est aspiré pour remplacer l'air chaud, ce qui contribue à refroidir naturellement la pièce. Cette technique peut servir à augmenter le taux de ventilation dans les chambres des patients atteints d'infections transmissibles par voie aérienne [86]. Les extracteurs d'air doivent être installés à un endroit où l'air peut être évacué directement vers l'extérieur, soit par le mur, soit par le toit.
- **Ventilateurs de plafond** : en augmentant le mouvement de l'air sur la peau (comme le font les ventilateurs portables), le ventilateur de plafond fait circuler l'air dans une pièce, ce qui permet aux occupants de se sentir plus au frais, comme avec un ventilateur portable. Les ventilateurs de plafond peuvent améliorer le mélange de l'air dans la pièce afin d'éviter les zones chaudes et froides. Cette solution n'est recommandée que lorsque les taux de ventilation minimaux ont été atteints [86]. Voir la [section 2.2g](#) pour les taux de ventilation minimaux.

Refroidissement par évaporation directe :

- **Refroidisseurs par évaporation directe/rafraîchisseurs d'air par évaporation/refroidisseurs par évaporation** : les autres systèmes de refroidissement actif, tels que les ventilateurs de plafond, les ventilateurs portables et les extracteurs d'air, peuvent rafraîchir les occupants et apporter de l'air relativement plus frais de l'extérieur, mais ne sont pas capables de refroidir l'air lui-même. Les rafraîchisseurs d'air par évaporation peuvent refroidir l'air [42] et sont très

efficaces dans les climats secs. Ils ne sont pas efficaces dans les environnements humides. Ils aspirent l'air chaud et sec à travers une surface humide, transférant la chaleur à l'eau, ce qui entraîne l'évaporation de l'eau située sur la surface : l'évaporation rafraîchit l'air de la même manière que l'évaporation de la transpiration refroidit le corps humain. Ce mécanisme nécessite généralement une pompe, un bac, un ventilateur, une surface appropriée, de l'eau et une source d'électricité. Un exemple de rafraîchisseur d'air par évaporation conçu pour les environnements désertiques est présenté à la [section 2.9g](#). Parmi les exemples de surfaces, on peut citer les tampons en cellulose traités pour résister à la dégradation, avec une conception à rainures croisées augmentant la surface pour retenir l'eau, et les tampons en tremble. Pour plus de détails sur les différents matériaux des tampons filtrants, voir la [section 2.9f](#).

Il existe également des méthodes passives pour obtenir un refroidissement par évaporation directe :

- **Chiffons humides** : l'air chaud est aspiré à travers un tissu saturé d'eau. Les chiffons peuvent être placés au niveau des ouvertures de ventilation, telles que les fenêtres. Lorsque l'air passe à travers le tissu humide, l'eau s'évapore, absorbant la chaleur de l'air et réduisant ainsi sa température [150].
- **Pulvérisation d'eau** : de l'eau est pulvérisée à intervalles réguliers sur les surfaces proches des ouvertures de ventilation (comme les moustiquaires des fenêtres) afin de provoquer un refroidissement par évaporation [150].

En cas d'utilisation de techniques de refroidissement actif, l'OMS recommande des systèmes de ventilation dotés d'un dispositif d'alimentation de secours capable de répondre aux besoins pendant au moins trois jours [92]. Les générateurs de secours doivent être vérifiés régulièrement, même s'ils sont rarement utilisés [92].

C. Facilité d'application

Tous les systèmes de refroidissement actif mentionnés ci-dessus (à l'exception des ventilateurs de plafond) peuvent être utilisés dans des structures temporaires et permanentes, en raison de leur portabilité. Des panneaux solaires peuvent être utilisés pour l'alimentation électrique. Les ventilateurs sur pied peuvent également être utilisés comme extracteurs d'air près des fenêtres, s'ils sont orientés de manière à souffler l'air vers l'extérieur.

Le refroidissement par évaporation directe peut également être mis en œuvre dans des bâtiments temporaires et permanents, car il est simple. Les rafraîchisseurs d'air par évaporation sont des solutions idéales à fabriquer soi-même et peuvent être construits à partir de matériaux de quincaillerie locaux facilement disponibles [24]. Pour plus de détails, voir la [section 2.9g](#).

D. Quels en sont les inconvénients ?

- **Refroidissement actif – Alimentation électrique** : toutes les techniques de refroidissement actif nécessitent une alimentation électrique continue. Bien que l'électricité puisse être fournie par des panneaux solaires, cela peut s'avérer coûteux.
- **Refroidissement actif – Difficulté d'installation** : en particulier pour les grands extracteurs d'air.
- **Refroidissement actif – Bruit** : cela peut poser problème avec les extracteurs d'air à haute puissance.
- **Refroidissement actif – Efficacité à des températures élevées** : lorsque la température dépasse 30 °C, les ventilateurs de refroidissement ne suffisent pas à maintenir le bâtiment suffisamment frais pour ses occupants [16]. Les ventilateurs ne doivent PAS être utilisés à des températures supérieures à 35 °C, car ils peuvent en fait augmenter la température ressentie par les occupants du bâtiment. Le refroidissement par évaporation directe à faible coût est recommandé dans ce cas, en particulier dans les climats plus secs ; il est relativement peu coûteux par rapport aux mécanismes de climatisation.
- **Refroidissement actif – Ventilateurs portables – Refroidissement pour les petites surfaces** : les ventilateurs portables ne peuvent refroidir que de petites surfaces. Bien que cela présente l'avantage d'un refroidissement ciblé (voir la [section 2.9g](#)), plusieurs ventilateurs seraient nécessaires pour un espace plus grand.
- **Rafraîchisseurs d'air par évaporation – Moustiques** : les refroidisseurs évaporatifs mal entretenus peuvent devenir des lieux de reproduction pour les moustiques ou certains micro-organismes nuisibles [151].
- **Rafraîchisseurs d'air par évaporation – Efficacité réduite avec une eau à forte teneur en calcium** : si l'eau présente une concentration élevée en calcium, la calcification peut obstruer les pores des tampons des refroidisseurs évaporatifs et en réduire l'efficacité [151].
- **Rafraîchisseurs d'air par évaporation – Efficacité réduite en raison de vents violents** : dans les zones où les vents sont violents, la surface de certains filtres peut être endommagée de telle sorte qu'ils se replient sur les pores, réduisant ainsi leur efficacité [151].
- **Refroidissement par évaporation directe – Performances réduites pendant les saisons humides et dans les climats humides** : dans des conditions humides, l'efficacité des refroidisseurs par évaporation diminue. Si l'humidité relative dépasse 80 % pendant une période prolongée, cela peut entraîner un inconfort et des conditions potentiellement malsaines [107]. La teneur en humidité de l'air peut être réduite à l'aide de déshumidificateurs.

- **Refroidissement actif/rafraîchisseurs d'air par évaporation – Condensation dans les climats humides** : si le bâtiment est situé dans un climat humide et repose sur un système de refroidissement actif pour réduire la température intérieure (comme les rafraîchisseurs d'air par évaporation), il convient d'éviter la formation de condensation [47]. Il est recommandé dans ce cas de ne pas maintenir la température intérieure trop basse afin d'éviter ce phénomène²⁹.
- **Refroidissement par évaporation directe – Inconfort dû à l'augmentation de l'humidité** : le refroidissement par évaporation directe peut contribuer à augmenter le taux d'humidité, ce qui peut accroître le niveau d'inconfort.
- **Refroidissement par évaporation directe – Moisissures** : si le refroidissement par évaporation directe augmente les niveaux d'humidité, il peut causer des problèmes tels que la formation de moisissures.
- **Refroidissement actif – Ventilateurs de plafond – Effet sur la qualité de l'air** : les ventilateurs de plafond peuvent aider à brasser l'air. Cependant, si les fenêtres et autres ouvertures sont fermées, l'air deviendra plus pollué au fil du temps et sera brassé par les ventilateurs de plafond. Ce phénomène est plus important dans les établissements de santé où le risque d'infection croisée peut augmenter.
- **Refroidissement actif – Ventilateurs de plafond – Entrave à la ventilation transversale** : les ventilateurs de plafond peuvent entraver la ventilation transversale (voir la [section 2.2.1](#) pour la ventilation transversale) car ils peuvent perturber les schémas naturels de circulation de l'air. Les ventilateurs de plafond peuvent essayer de pousser l'air hors d'une fenêtre par laquelle l'air frais extérieur tente de s'engouffrer. Dans ce cas, éteindre les ventilateurs de plafond et utiliser des extracteurs d'air pour améliorer la circulation de l'air peut permettre d'améliorer la ventilation transversale.

E. Dans quelles circonstances ne pas utiliser cette méthode ?

- **Refroidissement actif – Ventilateurs portables et ventilateurs de plafond – Températures supérieures à 35 °C** : l'OMS recommande de ne pas utiliser de ventilateurs lorsque la température dépasse 35 °C, en particulier dans des conditions humides [152], car dans ces conditions, ils réchauffent les personnes au lieu de les rafraîchir.
- **Refroidissement par évaporation directe – problèmes d'humidité dans les climats humides** : si l'air est déjà trop humide, le refroidissement par évaporation directe peut ne pas être possible dans les espaces intérieurs où l'humidité ne peut pas être efficacement évacuée. Une alternative est le refroidissement par évaporation indirecte, qui n'apporte aucune humidité, mais qui est coûteux et techniquement spécialisé, et ne relève donc pas du champ d'application du présent guide.

F. Efficacité

Comparaison avec d'autres stratégies :

Une étude menée dans les abris préfabriqués du HCR à Azraq, en Jordanie (climat aride), sur différentes stratégies de refroidissement, a révélé que la stratégie la plus efficace était le rafraîchisseur d'air par évaporation. Celui-ci a permis de réduire la température moyenne de 2,4 °C et la température maximale de 5,2 °C³⁰ [42]. Voir l'[annexe 3.2](#) pour plus de détails sur l'étude.

Tableau 6 : Comparaison entre différents types de matériaux utilisés pour les filtres des rafraîchisseurs d'air par évaporation

	Matériau du tampon filtrant du rafraîchisseur d'air par évaporation	Avantages	Inconvénients
i)	Aspen	<ul style="list-style-type: none"> Moins cher [153] Assure un équilibre entre l'air et l'eau, garantissant un refroidissement efficace à l'intérieur de la maison [153] Les tampons permettent à un volume d'air plus important de passer à travers un coussin légèrement saturé, ce qui refroidit l'air intérieur [153] 	<ul style="list-style-type: none"> Durée de vie courte [153] Moins efficace que la cellulose [154]

ii)	Cellulose	<ul style="list-style-type: none"> • Très absorbante [153] • Recyclable et biodégradable [151] • Mélange efficace de l'eau et de l'air [151] • Efficace lorsque l'évaporation est rapide (en raison d'un climat plus sec ou d'un ventilateur plus rapide) [153] • Durée de vie supérieure à celle de l'Aspen [151] • Meilleur équilibre entre la facilité de passage de l'eau et la taille des pores [154] 	<ul style="list-style-type: none"> • Plus cher que l'Aspen [153]
iii)	Plastique	<ul style="list-style-type: none"> • Utile uniquement à court terme [153] 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu efficace [153] • Non absorbant [153]

Comparaison entre différents types de méthodes de refroidissement par évaporation directe :

Dans le cadre d'une étude menée à Djeddah (climat aride), des tests ont été réalisés dans un ancien bâtiment équipé de moucharabiehs installés aux fenêtres d'une pièce [150]. Les moucharabiehs sont des écrans traditionnels en bois ajouré. Pour plus d'informations, voir l'[annexe 3.1](#).

Tableau 7 : Comparaison entre différents types de méthodes de refroidissement par évaporation directe

	Technique de refroidissement par évaporation directe	Avantages	Inconvénients
i)	Chiffon en coton humide placé sur le moucharabieh	<ul style="list-style-type: none"> • Haute efficacité de refroidissement : permet d'obtenir une réduction de la température intérieure pouvant atteindre 6,8 °C, ce qui en fait la plus efficace des trois méthodes [150] • Faible coût : nécessite un minimum de matériel et aucun système mécanique • Mise en œuvre simple : facile à installer et à retirer selon les besoins 	<ul style="list-style-type: none"> • Entretien : nécessite une réhumidification régulière pour maintenir l'efficacité du refroidissement • Risque de dommages au bâtiment dus à l'humidité
ii)	Pulvérisation d'eau sur les moucharabiehs	<ul style="list-style-type: none"> • Plus efficace que les pots en terre cuite • Relativement facile à mettre en œuvre : peut être actionné manuellement ou mécaniquement 	<ul style="list-style-type: none"> • Durée d'effet limitée : le refroidissement ne dure que tant que la pulvérisation et l'évaporation se poursuivent • Consommation d'eau élevée : 4,9 litres d'eau ont été utilisés en 2,4 heures • Risque de dommages au bâtiment dus à l'humidité • Moins efficace que les chiffons humides

	Technique de refroidissement par évaporation directe	Avantages	Inconvénients
iii)	Des pots en argile poreuse ou en terre cuite placés le long de l'entrée du moucharabieh		<ul style="list-style-type: none"> • Efficacité minimale

G. Lectures complémentaires

- Refroidisseur évaporatif direct/rafraîchisseur d'air par évaporation : amélioration du confort thermique dans les abris pour réfugiés en milieu désertique [42, p. 31–33]
- Exemple de panneau de refroidissement par évaporation directe : [155]

3.1 Conclusions des études menées sur l'efficacité de stratégies spécifiques

La section suivante fournit plus d'informations sur les études qui ont examiné l'efficacité de stratégies de refroidissement spécifiques : les études complètes sont mentionnées dans la [section 5](#).

Il convient de noter que l'efficacité d'une stratégie donnée varie en fonction des circonstances locales. À noter également que différentes études utilisent des mesures d'efficacité différentes qui ne sont pas directement comparables. Il s'agit notamment :

- Réduction de la température moyenne de l'air
- Réduction de la température maximale de l'air
- Réduction de la température de surface des murs/plafonds/toits
- Réduction de la température radiante (moyenne de plusieurs températures de surface)
- Réduction de la charge de refroidissement. Il s'agit d'une mesure du degré auquel la stratégie réduit la quantité de chaleur indésirable pénétrant dans le bâtiment (souvent, mais pas toujours, dans une situation où des stratégies de refroidissement actif, telles que la climatisation, seront utilisées pour traiter la chaleur indésirable).
- Économies d'énergie. Il s'agit de la mesure de la réduction de la consommation d'énergie des systèmes de refroidissement actif grâce à la mise en place d'une stratégie de refroidissement passif.

3.1.1 Utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique

Tableau 8 : Efficacité des matériaux à haute capacité de stockage thermique

	Détails de la stratégie	Réduction de la température	Climat	Lieu
i)	Augmentation de 2 cm de l'épaisseur du plâtre de gypse intérieur [19]	Réduction de la température maximale de 2,1 °C / baisse de 5 % de la température moyenne maximale de 0,9 °C	Méditerranéen	Porto, Portugal / bâtiment provisoire
ii)	Remplissage de la cavité murale avec du sable et du gravier (3 000 kg) (6 cm d'épaisseur dans les murs principaux, 3 cm d'épaisseur dans les pignons) [42]	Réduction de la température maximale de 3,7 °C / baisse moyenne de la température de 1,2 °C	Aride	Azraq, Jordanie / abri provisoire
iii)	Sacs de sable (14 000 kg) à l'intérieur des murs extérieurs ³¹ [42]	Réduction de la température maximale de 4,7 °C / baisse de la température moyenne de 1,3 °C	Aride	Azraq, Jordanie/ abri provisoire

Avertissement : Les points ii) et iii) sont comparables car ils proviennent de la même étude, tandis que i) n'est comparable à aucun des deux.

3.1.2 Ventilation naturelle

Tableau 9 : Efficacité de la ventilation naturelle

	Détails de la stratégie	Comparé à	Économies d'énergie en %	Réduction/ augmentation de la température	Climat	Lieu
i)	Ventilation nocturne [105]	Ventilation diurne	-	Réduction de la température maximale de 2,5 °C et réduction de la température nocturne de 2 °C, par rapport à la ventilation diurne	Tropical	Malaisie/ résidentiel
ii)	Ventilation nocturne + fenêtres à persiennes (horaire fixe) [21]	Ventilation diurne + fenêtres à persiennes	-	Augmentation de la température moyenne annuelle de 0,3 °C	Tropical	Singapour / salle commune
iii)	Ventilation nocturne + fenêtres à persiennes (ventilation dès que la température intérieure est inférieure à la température extérieure, même pendant la journée) [21]	Ventilation diurne + fenêtres à persiennes	-	Réduction de la température moyenne annuelle de 0,6 °C	Tropical	Singapour / salle commune

3.1.3 Peinture thermique

Tableau 10 : Efficacité de la peinture thermique

	Détails de la stratégie	Réduction de la température	% de réduction	Climat	Lieu
i)	Toiture à double peau avec peinture réfléchissant la chaleur [172] cité dans [117]	Réduction de la température de 5 °C	Réduction des besoins en énergie de refroidissement de 66 % - 572 kWh sur un an	Aride	Beni Isguen, Algérie / maison
ii)	Peinture blanche réfléchissante sur le toit [112] cité dans [55]	Réduction moyenne de la température de 6,5 °C	-	Aride	-
iii)	Peinture thermique sur le toit [19] (équivalent à une peinture blanche)	Réduction de la température maximale à la surface de 8,9 °C	-	Méditerranéen	Porto, Portugal / bâtiment provisoire
iv)	Peinture blanche réfléchissant le soleil sur les toits [113]	Réduction de la température de 2 °C	-	Aride	Badi Bhil Basti, Inde / maison

Avertissement : En raison des différentes variables utilisées dans les différentes études, les chiffres du tableau ci-dessus sont donnés à titre indicatif et ne peuvent donc pas être utilisés à des fins de comparaison.

3.1.4 Protection du toit

Tableau 11 : Efficacité de la protection du toit

	Détails sur les barrières radiantes	Réduction de la température	Climat	Lieu
i)	Panneau MLP composé de 3 couches avec revêtement en carton [124]	Réduction de la température radiante de 3,73 °C	Tropical	Pune et Chennai, Inde
ii)	Panneau MLP composé de 3 couches avec revêtement en bâche [124]	Réduction de la température radiante de 3,68 °C	Tropical	Pune et Chennai, Inde
iii)	Panneau MLP composé de 2 couches avec revêtement en carton [124]	Réduction de la température radiante de 2,57 °C	Tropical	Pune et Chennai, Inde
iv)	Panneau MLP composé d'une couche avec revêtement en carton [124]	Réduction de la température radiante de 2,34 °C	Tropical	Pune et Chennai, Inde
v)	Papier aluminium – isolation à bulles [124]	Réduction de la température radiante de 4,19 °C	Tropical	Pune et Chennai, Inde
vi)	Papier aluminium – mousse double face [124]	Réduction de la température radiante de 2,04 °C	Tropical	Pune et Chennai, Inde

Les résultats des tests présentés dans le tableau ci-dessus sont comparables, car ils s'inscrivent tous dans la même étude.

3.1.5 Végétation

Tableau 12 : Efficacité de la végétation

	Détails de la stratégie	Réduction de la température	% de réduction	Climat	Lieu
i)	Ombre des arbres [14] [174]	-	Réduction de 10,3 % de la charge de refroidissement	Subtropical	Nanjing, Chine
ii)	Ombre des arbres [175] cité dans [14]	-	Réduction de 14,4 % de la charge de refroidissement	Subtropical	Auburn, États-Unis
iii)	Ombre des arbres [135] cité dans [14]	-	Réduction de 6,1 % de la charge de refroidissement	Méditerranéen	Sacramento (Californie), États-Unis / résidentiel
iv)	Plantation de végétation près des fenêtres [134] cité dans [14]	Réduction de la température de 7 °C	-	Chaud et humide	Japon / résidentiel
v)	Modification de la densité et du volume de la canopée + valeurs d'albédo (réflectivité) des matériaux au sol [136] cité dans [14]	-	Réduction de 29 % de la charge de refroidissement	Tropical	Putrajaya, Malaisie

	Détails de la stratégie	Réduction de la température	% de réduction	Climat	Lieu
vi)	Couverture végétale à feuilles caduques et persistantes sur les murs des bâtiments [176] cité dans [14]	Réduction de la température de 5 °C en été et de 3 °C en hiver	-	Méditerranéen	Pretoria, Afrique du Sud
vii)	Ombrage des arbres et albédo élevé (surfaces réfléchissantes) des toits et des trottoirs [131] cité dans [14]	-	Réduction de 20 % de la charge de refroidissement	Méditerranéen	Los Angeles, États-Unis

3.1.6 Protection des fenêtres et des murs

Tableau 13 : Efficacité de la protection des fenêtres et des murs

	Détails de la stratégie	Réduction de la température	% de réduction	Climat	Lieu
i)	Dispositif d'ombrage horizontal - avant-toit de 1,5 m [145] cité dans [55]	-	Réduction annuelle de 7 % de la charge de refroidissement	Méditerranéen	Nicosie, Chypre / maison
ii)	Dispositif d'ombrage horizontal - avant-toit de 1,0 m sur la façade sud [142]	-	14 % d'économies d'énergie dans un bâtiment non isolé, 24 % d'économies d'énergie dans un bâtiment hautement isolé	Méditerranéen	Palerme, Sicile
iii)	Dispositif d'ombrage horizontal	-	2,62 à 10,13 % d'économies d'énergie	Tropical	Singapour / résidentiel
iv)	Dispositifs d'ombrage fixes horizontaux et verticaux [178] cité dans [14]	-	6 % d'économies d'énergie	Aride	Abou Dabi / résidentiel
v)	Persiennes verticales fixes [146]	Réduction de la température de 2 °C	-	Aride	Nouvelle ville d'Assiout, Égypte / résidentiel

3.1.7 Isolation

Isolation dans les climats arides : pour les climats arides tels que celui de Riyad, une étude a recommandé d'isoler les écoles avec 5 cm d'isolant (polystyrène) pour les murs et 10 cm (polystyrène) pour les toits [53] ; il convient de noter que l'efficacité varie en fonction des matériaux et des climats.

Tableau 14 : Efficacité de l'isolation

	Détails de la stratégie	Réduction de la température	% de réduction	Climat	Lieu
i)	Isolation du toit en polyuréthane avec réflecteur en aluminium [171] cité dans [49]		Réduction de 88 % du flux thermique	Chaud	
ii)	Isolation des murs en polyéthylène aluminium à bulle unique [50] cité dans [49]	Réduction de la température de 2,7 °C		Tropical	Selangor, Malaisie / amphithéâtre universitaire
iii)	Polystyrène de 5 cm d'épaisseur sur les murs extérieurs et intérieurs [51] cité dans [49]		Réduction de 38 % de la charge de refroidissement	Subtropical	Hong Kong / immeuble d'habitation
iv)	Polyuréthane de 2 cm d'épaisseur sur les murs extérieurs [52] cité dans [49]		Réduction de 28 % de la charge de refroidissement	Arde	Qatar / maison
v)	Polystyrène de 5 cm d'épaisseur sur les murs [49]	Réduction de la température de 0,81 °C	6,7 % d'économies d'énergie mensuelles	Tropical	Malaisie / pièce dans un immeuble de bureaux typique

	Détails de la stratégie	Réduction de la température	% de réduction	Climat	Lieu
vi)	Isolation en XPS (polystyrène extrudé) de 4 cm d'épaisseur + pare-soleil à 30 cm au-dessus du toit existant [42]	Réduction de la température maximale de 3,3 °C, augmentation de la température moyenne de 0,6 °C ³²		Aride	Azraq, Jordanie / abri provisoire

Avertissement : En raison des différentes variables utilisées dans les différentes études, les chiffres du tableau ci-dessus sont donnés à titre indicatif et ne peuvent être utilisés pour établir des comparaisons entre différents types d'isolation.

3.1.8 Orientation et forme du bâtiment

Tableau d'efficacité :

Tableau 15 : Orientation et forme du bâtiment					
	Détails de la stratégie	Comparé à	% de réduction	Climat	Lieu
i)	Orientation des bâtiments face au nord et au sud [55]	Orientation des bâtiments face à l'est et à l'ouest	Réduction de 8,6 %-11,5 % de la charge de refroidissement	Tropical	Malaisie et Singapour
ii)	Orientation des bâtiments face au nord et au sud [142]	Orientation des bâtiments face à l'est et à l'ouest	Économies d'énergie de 6 à 10 %	Méditerranéen	Palerme et Milan

3.1.9 Stratégies de refroidissement par évaporation directe dans une étude menée à Djeddah (zone aride)

Les essais ont été réalisés dans un bâtiment ancien équipé de moucharabiehs aux fenêtres d'une pièce. Les moucharabiehs sont des écrans traditionnels en bois ajouré.

Moucharabiehs et pots d'eau : (voir la [section 2.6](#) pour plus d'informations sur les écrans et autres dispositifs d'ombrage des fenêtres)

- Dans le cadre de cette approche, des pots (ou jarres) en argile poreux remplis d'eau ont été placés stratégiquement le long de l'entrée des moucharabiehs pour permettre à l'air extérieur de se refroidir en passant au-dessus des pots.
- L'installation comprenait des pots exposés à des flux d'air variables : deux pots étaient presque entièrement exposés (environ 80 % de leur surface), un autre était partiellement exposé (50 %) et le dernier était protégé du flux d'air direct.
- La température de l'eau était maintenue entre 25 °C et 27 °C. Les résultats ont toutefois montré que cette méthode n'apportait pas de refroidissement significatif, en particulier pendant les heures les plus chaudes de l'après-midi, ce qui indique la nécessité d'ajuster davantage l'emplacement des pots, leur taille ou les conditions environnementales.

Vaporisateurs de refroidissement par évaporation :

- Cette méthode consistait à pulvériser de l'eau directement sur le moucharabieh à intervalles réguliers pendant les heures les plus chaudes de la journée.
- Au cours de la période d'essai, 4,9 litres d'eau au total ont été utilisés pour l'évaporation, ce qui a contribué à augmenter l'humidité et à réduire légèrement la température intérieure.
- L'étude a noté que la réduction maximale de température observée était de 8,6 °C à l'intérieur par rapport aux températures extérieures pendant les pics de chaleur, ce qui indique l'efficacité de cette technique pour obtenir un meilleur confort thermique.

Chiffons humides :

- Cette méthode consistait à placer des chiffons humides sur le moucharabieh. Le chiffon absorbait l'eau, augmentant ainsi la surface d'évaporation et renforçant l'effet rafraîchissant lorsque l'air chaud passait à travers le tissu humide.

- Bien qu'elle ne soit pas décrite en détail, cette méthode vise à assurer un refroidissement par évaporation en ajoutant de l'humidité à l'air, sans recourir de manière intensive à des systèmes de pulvérisation d'eau, qui peuvent endommager la structure en bois du moucharabieh en raison d'une hydratation excessive.

Voir la référence [150] pour plus de détails sur cette étude.

3.2 Conclusion des études sur les comparaisons et les combinaisons de stratégies

Certaines études ont explicitement comparé différentes stratégies afin d'en définir l'efficacité relative (dans un contexte particulier). Comme dans la section ci-dessus, différentes mesures d'efficacité sont utilisées. Les noms des stratégies sont les mêmes que ceux de la [section 2](#).

3.2.1 Étude comparative de différentes stratégies (climat aride)

Stratégies multiples, notamment : protection des fenêtres, végétation, ventilation naturelle, matériaux à haute capacité de stockage thermique, fenêtres améliorées, isolation, peinture thermique et protection du toit.

- **Climat (lieu) :** aride (Riyad, Arabie saoudite)
- **Référence :** [53]
- **Contexte :** L'étude a été menée dans une école à deux étages. L'école est un bâtiment carré en béton avec une cour bordée d'un couloir de 4 m de large.

Les stratégies sont classées par ordre d'efficacité (la stratégie i) étant la plus efficace).

Tableau 16 : Comparaison de différentes stratégies dans un climat aride, Riyad

	Stratégie	Détails	Réduction moyenne de la température
i)	Combinaison de toutes les stratégies	-	3,2 °C
ii)	Isolation des murs et du toit avec ventilation nocturne	Polystyrène de 50 mm d'épaisseur pour les murs et de 100 mm d'épaisseur pour le toit	1,9 °C
iii)	Matériaux à haute capacité de stockage thermique avec ventilation nocturne	Épaisseur des murs extérieurs augmentée de 200 mm à 300 mm + épaisseur du toit augmentée de 300 mm à 400 mm	1,6 °C
iv)	Ventilation naturelle	Ventilation nocturne	1,3 °C
v)	Végétation	Couvert végétal dans les cours et feuillus ombrageant les murs extérieurs	1,2 °C
vi)	Peinture thermique	Peinture blanche sur les murs et le toit	0,6 °C
vii)	Protection du toit	Placée à 1 000 mm au-dessus du toit existant	0,4 °C
viii)	Protection des fenêtres	Avant-toits et brise-soleil verticaux	0,3 °C
ix)	Fenêtres améliorées	Double vitrage	0,1 °C

x)	Matériaux à haute capacité de stockage thermique sans ventilation nocturne	Épaisseur des murs extérieurs augmentée de 200 mm à 300 mm + épaisseur du toit augmentée de 300 mm à 400 mm	0,0 °C
xi)	Isolation des murs et du toit sans ventilation nocturne	Polystyrène de 50 mm d'épaisseur pour les murs et de 100 mm d'épaisseur pour le toit	-1,3 °C (augmentation de la température)

Conclusions :

- Dans les climats chauds et secs, le chauffage en hiver est également important.
- Stratégies les plus efficaces pour le refroidissement estival : isolation avec ventilation nocturne, matériaux à haute capacité de stockage thermique avec ventilation nocturne et végétation.
- Stratégies les plus efficaces pour le chauffage en hiver : isolation sans ventilation nocturne, matériaux à haute capacité de stockage thermique sans ventilation nocturne.
- Dans les climats chauds et secs, la ventilation nocturne est très importante pour que l'isolation et les matériaux à haute capacité de stockage thermique soient efficaces pour le refroidissement. Sinon, la chaleur accumulée pendant la journée par les surfaces vitrées et autres moyens peut rester emprisonnée à l'intérieur.
- La peinture blanche s'est également avérée efficace pour le refroidissement estival.

3.2.2 Étude comparative de l'isolation et du stockage élevé de chaleur (climat méditerranéen)

- **Climat (lieu) :** méditerranéen (Ilam, Iran)
- **Référence :** [54]
- **Contexte :** L'étude a été menée dans les chambres des patients de deux bâtiments hospitaliers. Les critères retenus pour les stratégies étaient l'accessibilité financière, la praticité, la simplicité et la disponibilité.

Les stratégies sont classées par ordre d'efficacité (la stratégie i) étant la plus efficace).

Tableau 17 : Comparaison de différentes stratégies dans un contexte méditerranéen

	Stratégie	Détails	% de réduction de la charge de refroidissement
i)	Combinaison de toutes les stratégies	Mur creux avec isolation + masse thermique du sol + isolation du toit + double vitrage	27,1 %
ii)	Isolation du toit	Polystyrène (rigide) de 50 mm d'épaisseur	24,7 %
iii)	Isolation du toit	200 mm d'air + polystyrène (rigide) de 10 mm d'épaisseur suspendu	16,4 %
iv)	Isolation des murs	Polystyrène (rigide) de 60 mm d'épaisseur	8,6 %
v)	Isolation des murs creux	Brique de 220 mm (intérieur) + polystyrène (rigide) de 50 mm d'épaisseur + brique de 110 mm (extérieur)	8,3 %
vi)	Isolation des murs creux	Brique de 220 mm (intérieur) + 50 mm d'air + brique de 110 mm (extérieur)	1,5 %
vii)	Fenêtres améliorées	Double vitrage (verre de 6 mm + 30 mm d'air + verre de 6 mm)	0,1 %
viii)	Isolation du sol + matériau à haute capacité de stockage thermique dans le sol	100 mm de béton existant + 150 mm de béton supplémentaire + 50 mm de polystyrène (rigide)	-3,9 %

Conclusions :

- Solution globale la plus efficace : combinaison de toutes les stratégies
- Stratégie unique la plus efficace : isolation du toit (polystyrène de 50 mm d'épaisseur)
- Le double vitrage s'est révélé inefficace.

3.2.3 Étude comparative de plusieurs stratégies (climat aride)

- **Climat (lieu) :** aride (camp de réfugiés d'Azraq, Jordanie)
- **Référence :** [42]
- **Contexte :** L'étude a été menée dans des abris préfabriqués du HCR, dont un a servi de bâtiment contrôle et les 11 autres ont été testés avec différentes stratégies de refroidissement passif. Les fenêtres ont été ouvertes de 9 h à 21 h, à l'exception de celles équipées de matériaux à haute capacité de stockage thermique, qui ont été ouvertes de 21 h à 9 h afin de profiter de la ventilation nocturne pour refroidir les matériaux massifs. Voir les [sections 2.1](#) et [2.2.3](#) pour plus de détails sur la ventilation nocturne et les matériaux à forte capacité de stockage thermique.

Les stratégies sont classées par ordre d'efficacité (la stratégie i) étant la plus efficace).

Tableau 18 : Comparaison de différentes stratégies dans un contexte aride, Jordanie

	Stratégie	Détails	Réduction moyenne de la température	Réduction maximale de la température
i)	Rafrâchisseur d'air par évaporation	Fonctionne à l'énergie solaire. Consomme 0,6 l d'eau/heure	2,4 °C	5,2 °C
ii)	Matériaux à haute capacité de stockage thermique	Cavité murale remplie de 3 000 kg de sable et de gravier + 11 000 kg de sacs de sable recouverts à l'intérieur	1,3 °C	4,7 °C
iii)	Matériaux à haute capacité de stockage thermique	Cavité murale remplie de 3 000 kg de sable et de gravier	1,2 °C	3,7 °C

iv)	Protection du toit + capots de toit + refroidissement du sol + isolation des murs, du toit et des portes	Protection du toit placée à 150 mm au-dessus du toit existant. Ventilateurs sous les bouches d'aération au sol. Isolation des murs et du toit (15 mm d'épaisseur existante + 30 mm d'épaisseur supplémentaire de PSE recouvert d'un film aluminium). Isolation des portes (45 mm de PSE recouvert d'un film aluminium)	-0,1 °C (augmentation de la température)	3,7 °C
v)	Isolation des murs et du toit + protection du toit	Isolation XPS de 40 mm. Protection solaire placée 300 mm au-dessus du toit existant	-0,6 °C (augmentation de la température)	3,3 °C
vi)	Isolation des murs, du toit et des portes	Isolation existante de 15 mm d'épaisseur + isolation supplémentaire en PSE recouvert d'un film aluminium de 30 mm d'épaisseur pour les murs et le toit. PSE recouvert d'un film aluminium de 45 mm d'épaisseur pour la porte	0,3 °C	-1,3 °C (augmentation de la température)
vii)	Protection du toit	150 mm au-dessus du toit existant	0,3 °C	-1,2 °C (augmentation de la température)
viii)	Ventilation naturelle	Ventilations installées sur le toit et à faible hauteur	0,0 °C	0,2 °C

Conclusions :

- Meilleure performance : rafraîchisseur d'air par évaporation
- Stratégie passive la plus performante : matériaux à haute capacité de stockage thermique
- Les techniques de protection solaire n'ont pas été suffisamment étudiées pour de meilleurs résultats.
- Les techniques de protection solaire fonctionnent bien lorsqu'elles sont associées à d'autres techniques, telles que l'isolation.

3.2.4 Étude comparative dans trois climats différents

Protection des fenêtres, ventilation naturelle, matériaux à haute capacité de stockage et peinture thermique

- **Climat (lieu) :** tropical (Mumbai, Inde), subtropical (Nairobi, Kenya), méditerranéen (Porto, Portugal)
- **Référence :** [19]
- **Contexte :** L'étude a été menée dans un bâtiment préfabriqué dans trois climats différents.

Tableau 19 : Comparaison des stratégies dans trois climats différents

	Stratégie	Détails	Réduction moyenne de 5 % des températures maximales		
			Tropical	Subtropical	Méditerranéen
i)	Protection des fenêtres		2,9 °C	2,6 °C	2,8 °C
ii)	Ventilation naturelle	Ventilation par effet de cheminée et par le vent. Les fenêtres ont été ouvertes.	2,4 °C	3,8 °C	2,9 °C

iii)	Matériaux à haute capacité de stockage thermique	Augmentation de l'épaisseur du plâtre (10 mm d'épaisseur existante + 20 mm supplémentaires)	1,0 °C	1,0 °C	0,9 °C
iv)	Peinture thermique	Peinture des toits et des murs (la réflectance de la peinture était similaire à celle de la peinture blanche)	1,2 °C	0,9 °C	1,0 °C
v)	Combinaison de toutes les stratégies		5,2 °C	5,7 °C	5,5 °C

Conclusions :

- La stratégie la plus performante était une combinaison de toutes les stratégies.
- La stratégie la plus performante pour chaque climat est la suivante :
 - **Tropical** : protection des fenêtres
 - **Subtropical** : ventilation naturelle
 - **Méditerranéen**³³ : augmentation de l'épaisseur du plâtre
- La peinture thermique s'est avérée très efficace pour réduire la température de surface : la température maximale de surface a été réduite de 8,9 °C à Porto. Aucune donnée n'est disponible pour les autres climats. Il convient de noter que les valeurs indiquées dans le tableau représentent la température de l'air.

3.2.5 Étude comparative de l'isolation et de la peinture thermique (climat tropical)

Isolation des murs, fenêtres améliorées, peinture thermique

- **Climat (lieu)** : tropical (Malaisie)
- **Référence** : [55]
- **Contexte** : L'étude a été menée dans une salle de séminaire équipée de climatiseurs allumés et accueillant 20 personnes.

Les stratégies sont classées par ordre d'efficacité (la stratégie i) étant la plus efficace).

Tableau 20 : Comparaison des stratégies dans un contexte tropical

	Stratégie	Détails	Réduction de la température	Retour sur investissement / mois
i)	Combinaison de toutes les stratégies		0,98 °C	
ii)	Isolation des murs	Polystyrène de 50 mm d'épaisseur	0,81 °C	25
iii)	Fenêtres améliorées	Vitrage à faible émissivité	0,36 °C	25
iv)	Peinture thermique	Toit peint en blanc	0,11 °C	58

Conclusions :

- **Efficacité** dans la réduction de la température : combinaison de toutes les stratégies > Isolation des murs > Vitrage à faible émissivité > Toit peint en blanc
- **Coût de mise en œuvre le plus bas** : combinaison de toutes les stratégies > Toit peint en blanc > Vitrage à faible émissivité > Isolation des murs
 - La peinture blanche doit être repeinte tous les 5 ans.
- **Meilleur rapport coût-efficacité et réduction de température la plus importante** : isolation des murs
- **Meilleure performance** : combinaison de stratégies

3.2.6 Étude comparative de quatre stratégies en Chine (région subtropicale)

- **Climat (lieu) :** subtropical (ville de Chengdu, Chine)
- **Référence :** [126]
- **Contexte :** L'étude a été menée dans une maison préfabriquée destinée à l'aide humanitaire.

L'étude porte sur quatre stratégies : des stores extérieurs, des écrans d'ombrage sur les murs nord et sud, des protections de toit et des ombrages muraux utilisant des tissus fins et hautement réfléchissants pouvant être retirés en hiver.

Les stratégies sont classées par ordre d'efficacité (la stratégie i) étant la plus efficace).

Tableau 21 : Comparaison de quatre études dans un contexte subtropical

	Stratégie	Détails	Réduction en % des heures insupportables (température supérieure à 28 °C)
i)	Protection des fenêtres + Protection des murs + Protection du toit	Stores + écran + toile pour murs + toile pour toiture	38,6 %
ii)	Protection des fenêtres + Protection des murs + Protection du toit	Stores + toile pour murs + toile pour toiture	38,2 %
iii)	Protection des murs + Protection du toit	Écran + toile pour murs + toile pour toiture	35,9 %
iv)	Protection des murs + Protection du toit	Toile pour murs + toile pour toiture	28,6 %

v)	Protection des fenêtres + Protection des murs	Stores + écran + toile pour murs	27,7 %
vi)	Protection des fenêtres + Protection des murs	Stores + toile pour murs	26,4 %
vii)	Protection des murs	Écran + toile pour murs	25,3 %
viii)	Protection des fenêtres + Protection des murs + Protection du toit	Stores + Écran + toile pour toiture	20,0 %
ix)	Protection des murs + Protection du toit	Écran + Toile pour toiture	17,3 %
x)	Protection des fenêtres + Protection du toit	Stores + Toile pour toiture	17,3 %
xi)	Protection des murs	Toile pour murs	18,6 %
xii)	Protection des fenêtres + Protection des murs	Stores + écran	12,3 %
xiii)	Protection du toit	Toile pour toiture	9,1 %
xiv)	Protection des murs	Écran	9,1 %
xv)	Protection des fenêtres	Stores	8,6 %

Conclusions :

- **Stratégie la plus performante** : combinaison de toutes les stratégies
- **Stratégie unique la plus performante** : protection des murs (avec toile pour murs)

3.3 Méthodologie

Présentation :

Une analyse documentaire approfondie a été menée à partir de publications (principalement recherchées via le moteur de recherche Google Scholar) et de documents non publiés provenant de sources fiables. Les sources fiables étaient des organisations telles que l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), ONU-Habitat, l'Alliance mondiale pour la réduction des risques de catastrophe et la résilience dans le secteur de l'éducation (GADRESS) et le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), entre autres. D'autres sources, partagées par les experts du groupe d'experts, sont également incluses (voir les Remerciements).

En conséquence, le document s'appuie sur un large éventail de sources, notamment des articles de revues évaluées par des pairs et des actes de conférences présentant des recherches empiriques (par exemple, Energy and Buildings, Applied Thermal Engineering), ainsi que des documents provenant d'organisations gouvernementales (par exemple, le ministère américain de l'Énergie) et non gouvernementales fournissant des lignes directrices sur la consommation d'énergie et les impacts sur la santé. En outre, il comprend des ressources et des outils en ligne pour l'analyse des performances (par exemple, Ubakus, ShelTherm) et des lignes directrices industrielles provenant d'organisations professionnelles.

Plus de 170 sources sont citées, dont certaines sont des citations indirectes référencées dans d'autres sources. À l'exception des pages web, au moins 60 citations directes ont été étudiées de manière approfondie et référencées. Les ressources ont été organisées à l'aide de Zotero et sur un tableau Miro à des fins d'analyse.

Processus de recherche :

1. Le champ d'application initial a été élargi pour inclure brièvement les stratégies de refroidissement actif ainsi que celles destinées aux installations temporaires. Au cours des premières étapes, les mots-clés ont été ciblés de manière à couvrir un large éventail et à obtenir ainsi une idée générale de toutes les stratégies de refroidissement passif mentionnées dans la littérature. Cette approche ne visait pas à entrer dans les détails des stratégies, mais seulement à donner un aperçu des différentes stratégies. L'approche consistait à examiner les articles de synthèse sur le refroidissement passif. Voici quelques-uns des mots-clés initiaux (liste non exhaustive) : *passif, refroidissement, stratégies, méthodes, écoles, cliniques, hôpitaux, établissements de santé, conseils, revue, orientations, faible coût.*

- 2.** Les critères de recherche ont ensuite été précisés en fonction de stratégies spécifiques et d'autres contraintes telles que le climat, le faible coût, etc., par exemple, *ventilation naturelle dans les hôpitaux*.
- 3.** Une fois les différentes stratégies clarifiées, des recherches supplémentaires ont été nécessaires pour répondre à des questions spécifiques liées à chaque stratégie, par exemple, *condensation dans les climats chauds et humides*.
- 4.** Cette analyse documentaire a donné lieu à un projet de document. Celui-ci a été examiné par un groupe consultatif d'experts, qui s'est particulièrement intéressé à l'exactitude du contenu. Les suggestions du groupe consultatif ont été intégrées au projet.
- 5.** Le projet de document révisé a ensuite été testé sur le terrain à deux endroits (au Mali et en République centrafricaine) par une organisation médicale (International Medical Corps) dans le cadre d'un projet dans lequel elle a choisi des stratégies passives et les a intégrées dans des bâtiments. L'essai sur le terrain visait principalement à vérifier la pertinence, l'intelligibilité et l'utilité du document. Les suggestions du groupe pilote ont ensuite été intégrées dans la version finale du document.

4 Glossaire

Barrière radiante	Matériau hautement réfléchissant utilisé pour réfléchir la chaleur rayonnante
Besoins en refroidissement	Degré de refroidissement nécessaire pour assurer un environnement confortable dans un bâtiment. Dans le présent document, les besoins en refroidissement ont été principalement utilisés comme indicateur de l'efficacité de la stratégie de refroidissement
Chaleur rayonnante	Chaleur qui se propage sous forme d'ondes, comme la lumière du soleil qui réchauffe la peau ou un feu de camp qui réchauffe sans avoir à le toucher.
Conduction	Processus par lequel l'énergie thermique est transmise par collision entre des molécules voisines, nécessitant un contact direct entre les matériaux
Convection	Transfert de chaleur à travers un fluide (liquide ou gaz) causé par le mouvement moléculaire, se produisant souvent dans l'air à l'intérieur des bâtiments
Différence de température diurne	Différence entre les températures nocturnes et diurnes
Émissivité	Capacité d'un matériau à émettre de l'énergie thermique
Gain solaire / apport de chaleur	Augmentation de la température dans un espace résultant du rayonnement solaire
Isolation	Matériaux utilisés pour réduire le taux de transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment, améliorant ainsi l'efficacité énergétique et le confort
Masse thermique	Capacité d'un matériau à absorber, stocker et libérer de la chaleur. Les matériaux à masse thermique élevée (comme le béton et la brique) peuvent stabiliser les températures intérieures en modérant les variations de température.

Puits thermique	Élément qui absorbe et évacue la chaleur afin de maintenir la fraîcheur
Rayonnement	Transfert de chaleur sous forme d'ondes électromagnétiques, qui peut se produire même dans le vide (par exemple, la chaleur du soleil atteignant la Terre)
Température radiante moyenne	Température moyenne de toutes les surfaces entourant une personne, y compris les murs, les sols et les objets
Transfert de chaleur	Mouvement de l'énergie thermique d'un objet ou d'un milieu à un autre, généralement par conduction, convection ou rayonnement
Zone de basse pression	Caractéristique de l'air chaud. L'air dans une zone de haute pression est plus léger et moins dense, il s'élève donc
Zone de haute pression	Caractéristique de l'air froid. L'air dans une zone de haute pression est plus dense et plus lourd, il descend donc vers le sol

Bibliographie

1. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1e éd. Cambridge University Press, 2023. doi : 10.1017/9781009157896.
2. Z. Xu, G. FitzGerald, Y. Guo, B. Jalaludin et S. Tong, « Impact of heatwave on mortality under different heatwave definitions: A systematic review and meta-analysis », *Environment International*, vol. 89–90, p. 193–203, avril 2016, doi: 10.1016/j.envint.2016.02.007.
3. H. Green, J. Bailey, L. Schwarz, J. Vanos, K. Ebi et T. Benmarhnia, « Impact of heat on mortality and morbidity in low and middle income countries: A review of the epidemiological evidence and considerations for future research », vol. 171, p. 80–91, avril 2019, doi: 10.1016/j.envres.2019.01.010.
4. V. Lee, F. Zermoglio et K. L. Ebi, « Emerging Evidence and Experience to Inform Risk Management in a Warming World ». USAID, 2019.
5. S. Mohamed, H. Al-Khatiri, J. Calautit, S. Omer et S. Riffat, « The impact of a passive wall combining natural ventilation and evaporative cooling on schools' thermal conditions in a hot climate », vol. 44, p. 102624, décembre 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102624.
6. « Heat Forecast Tools », National Weather Service. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.weather.gov/safety/heat-tools>
7. S. Kumar, J. Mathur, S. Mathur, M. K. Singh et V. Loftness, « An adaptive approach to define thermal comfort zones on psychrometric chart for naturally ventilated buildings in composite climate of India », vol. 109, p. 135–153, novembre 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.09.023.
8. S. Kurvers et J. Leyten, « Adaptive Thermal Comfort ».
9. N. M. A. Rahman, L. C. Haw et A. Fazlizan, « A Literature Review of Naturally Ventilated Public Hospital Wards in Tropical Climate Countries for Thermal Comfort and Energy Saving Improvements », vol. 14, n° 2, p. 435, janvier 2021, doi : 10.3390/en14020435.
10. « Heat Transfer: Conduction, Convection and Radiation », Science Ready. [En ligne]. Disponible sur : https://scienceready.com.au/pages/conduction-convection-and-radiation?srsId=AfmBOootR7CR9MMpIGVFPS6S0gQyznBBzylNDSwuUEQVa_EMBi7ts16w
11. M. W. T. Salih, « Insulation Materials », 2016, doi : 10.13140/RG.2.2.36009.03681.

12. Zebar [En ligne]. *ShelTherm*. Disponible sur : <https://www.zebra-model.org/humanitarian-tools/#Sheltherm>
13. A. Balali et A. Valipour, « Prioritization of passive measures for energy optimization designing of sustainable hospitals and health centres », *Journal of Building Engineering*, vol. 35, p. 101992, mars 2021, doi : 10.1016/j.jobbe.2020.101992.
14. D. K. Bhamare, M. K. Rathod et J. Banerjee, « Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones–The state of art », *Energy and Buildings*, vol. 198, p. 467-490, septembre 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.06.023.
15. Polimi OpenKnowledge, YouTube. Roof and walls design by climatic zone (mass, insulation, solar protection) (Claudio Del Pero). [Vidéo en ligne]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=Ouvk9t5T9X4>
16. Organisation mondiale de la Santé, « Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings », 2009, consulté le 29 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://iris.who.int/handle/10665/44167>
17. E. Van den Ham, « Draft for Comment, Expert Group », 20 mars 2025.
18. M. S. Al-Homoud, « The Effectiveness of Thermal Insulation in Different Types of Buildings in Hot Climates », *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. 27, n° 3, p. 235-247, janvier 2004, doi : 10.1177/1097196304038368.
19. P. Samani, V. Leal, A. Mendes et N. Correia, « Comparison of passive cooling techniques in improving thermal comfort of occupants of a pre-fabricated building », vol. 120, p. 30-44, mai 2016, doi : 10.1016/j.enbuild.2016.03.055.
20. Y. Chen, Z. Tong et A. Malkawi, « Investigating natural ventilation potentials across the globe: Regional and climatic variations », vol. 122, p. 386-396, septembre 2017, doi : 10.1016/j.buildenv.2017.06.026.
21. L. Lan, W. Tushar, K. Otto, C. Yuen et K. L. Wood, « Thermal comfort improvement of naturally ventilated patient wards in Singapore », *Energy and Buildings*, vol. 154, p. 499-512, novembre 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.07.080.
22. V. Gilani, « FC_ThermIC_R&D_Roadmap_Nov2024.pdf ». FairConditioning.
23. V. Gilani, « FC_Training_PassiveDesign_MASTER.pdf ». FairConditioning.
24. V. Gilani, « FC_ThermIC_SolutionDescriptions_v0.2.pdf ». FairConditioning.

25. « How Does Mineral Wool Handle Fire? », Architecture Courses.org. [En ligne]. Disponible sur : <https://architecturecourses.org/sustainability/how-does-mineral-wool-handle-fire>
26. F. Blondin, P. Blanchet, C. Dagenais, Z. Triantafyllidis et L. Bisby, « Fire hazard of compressed straw as an insulation material for wooden structures », *Fire and Materials*, vol. 44, n° 5, p. 736-746, août 2020, doi : 10.1002/fam.2851.
27. J. Orr, « Is Cork Heat Resistant? », CorkSol. [En ligne]. Disponible sur : <https://corksolut.com/corksol/is-cork-heat-resistant/>
28. Y. W. Shewalul, N. F. Quiroz, D. Streicher et R. Walls, « Fire behavior of hemp blocks: A biomass-based construction material », *Journal of Building Engineering*, vol. 80, p. 108147, décembre 2023, doi : 10.1016/j.job.2023.108147.
29. « Astrofield reflective insulation », Innovative Energy Inc. [En ligne]. Disponible sur : <https://innovativeenergy.com/astroshield/>
30. S. Pongsuwan, « The Miracle of Insulation in Hot-Humid Climate Building », vol. 4, n° 1, 2009.
31. « Sheep Wool Insulation Optimal Rolls », Chimney Sheep. [En ligne]. Disponible sur : <https://chimneysheep.co.uk/products/sheep-wool-insulation-optimal-rolls?variant=46000521478450>
32. A. Ringler, « How to Insulate Existing Walls », Retrofoam Michigan. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.retrofoamofmichigan.com/blog/how-to-insulate-existing-walls>
33. « Foam Cladding vs Brick: Which Rendered Foam Insulation Option is Right for Your Home? », Foam Technologies. [En ligne]. Disponible sur : <https://foamtechnologies.com.au/foam-cladding-vs-brick/>
34. « Multi-purpose Insulation », YBS insulation. [En ligne]. Disponible sur : <https://ybsinsulation.com/diy-products-application/multi-purpose-insulation-diy-product/>
35. A. A. Bailes, « Fiberglass Insulation Manufacturer Tackles Installation Quality », Green Building Advisor. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.greenbuildingadvisor.com/article/fiberglass-insulation-manufacturer-tackles-installation-quality>
36. Jrisberg, « What is Spray Foam Insulation? », Family Handyman. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.familyhandyman.com/article/spray-foam-insulation/>
37. « Why you should insulate your shed? », EcoHome. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ecohome-insulation.com/news/why-you-should-insulate-your-shed/>

38. « Installation Instructions for Reflectix, Inc. Double Reflective Insulation », Lowe's. [En ligne]. Disponible sur : <https://pdf.lowes.com/productdocuments/c549231a-a65d-4fa1-bb49-5d7c911b1639/01379168.pdf>
39. ASIRI Designs, « Air Barriers vs Vapor Barriers | You NEED To Know the Difference », YouTube. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=yrHjqOMAZno>
40. J. Lstiburek, « A Crash Course in Roof Venting », Fine Home Building. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.finehomebuilding.com/project-guides/roofing/a-crash-course-in-roof-venting>
41. « Insulating a flat roof », Insulation Superstore. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.insulationsuperstore.co.uk/help-and-advice/project-guides/insulation/insulating-a-flat-roof/>
42. F. Moran, D. Fosas, D. Coley, S. Natarajan, J. Orr et O. B. Ahmad, « Improving thermal comfort in refugee shelters in desert environments », *Energy for Sustainable Development*, vol. 61, p. 28–45, avril 2021, doi: 10.1016/j.esd.2020.12.008.
43. A. Hofmann, S. Kaudelka et S. Hauswaldt, « Fire safety of FAÇADES with polystyrene foam insulation », *Fire and Materials*, vol. 42, n° 5, p. 466-474, août 2018, doi : 10.1002/fam.2662.
44. M. D. Hossain *et al.*, « Fire Behaviour of Insulation Panels Commonly Used in High-Rise Buildings », *Fire*, vol. 5, n° 3, p. 81, juin 2022, doi : 10.3390/fire5030081.
45. « Benefits of Vapor Permeable Insulation in Hot-Humid Climates: Exterior Assemblies and Masonry Walls », Fi-Foil. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.fifoil.com/articles/benefits-of-vapor-permeable-insulation-in-hot-humid-climates-exterior-assemblies-and-masonry-walls/>
46. « Home Insulation Health and Safety », Insulation Institute. [En ligne]. Disponible sur : <https://insulationinstitute.org/im-a-homeowner/about-insulation/health-safety/>
47. M. Tenpierik, « Advice on Passive Cooling Guidelines », 31 janvier 2025.
48. A. Carratt, G. Kokogiannakis et D. Daly, « A critical review of methods for the performance evaluation of passive thermal retrofits in residential buildings », *Journal of Cleaner Production*, vol. 263, p. 121408, août 2020, doi : 10.1016/j.jclepro.2020.121408.
49. V. K. Venkiteswaran, J. Liman et S. A. Alkaff, « Comparative Study of Passive Methods for Reducing Cooling Load », *Energy Procedia*, vol. 142, p. 2689-2697, décembre 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.212.

50. M. W. Muhieldeen, N. M. Adam et B. H. Salman, « Experimental and numerical studies of reducing cooling load of lecture hall », *Energy and Buildings*, vol. 89, p. 163-169, février 2015, doi : 10.1016/j.enbuild.2014.12.026.
51. M. Bojić et F. Yik, « Cooling energy evaluation for high-rise residential buildings in Hong Kong », *Energy and Buildings*, vol. 37, n° 4, p. 345-351, avril 2005, doi : 10.1016/j.enbuild.2004.07.003.
52. M. Kharseh et M. Al-Khawaja, « Retrofitting measures for reducing buildings cooling requirements in cooling-dominated environment: Residential house », *Applied Thermal Engineering*, vol. 98, p. 352-356, avril 2016, doi : 10.1016/j.applthermaleng.2015.12.063.
53. W. Abanomi et P. Jones, « Passive cooling and energy conservation design strategies of school buildings in hot, arid region: Riyadh, Saudia Arabia », 2005.
54. J. Khodakarami, I. Knight et N. Nasrollahi, « Reducing the demands of heating and cooling in Iranian hospitals », *Renewable Energy*, vol. 34, n° 4, p. 1162-1168, avril 2009, doi : 10.1016/j.renene.2008.06.023.
55. « Comparative Study of Passive Methods for Reducing Cooling Load.pdf ».
56. « Types of insulation », Ministère de l'énergie des États-Unis. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.energy.gov/energysaver/types-insulation>
57. A. Ringler, « What is the Highest R-Value Insulation? (Ratings/Types/Charts) », Retro Home of Michigan. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.retrofoamofmichigan.com/blog/what-is-the-highest-r-value-insulation-ratings/types/charts>
58. « Mineral Wool Insulation Comparison Charts », Johns Manville. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.jm.com/content/dam/jm/global/en/building-insulation/Files/BI%20Toolbox/MineralWoolProductComparisonChart.pdf>
59. « Is PU Foam Fire Resistant? », Homey. [En ligne]. Disponible sur : <https://homeycons.com/is-pu-foam-fire-resistant/>
60. R. Franklin, « What is the R-Value of Double Bubble Insulation? », Radiant Guard. [En ligne]. Disponible sur : <https://radiantguard.com/blogs/reflective-insulation-blog/what-is-the-r-value-of-double-bubble-insulation>
61. M. Reynolds, « The Pros and Cons of Sheep Wool Insulation for Homes », EcoHome. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ecohome.net/guides/4013/the-pros-and-cons-of-sheep-wool-insulation-for-homes/>
62. « The Benefits of Sheep Wool Insulation Sound Insulation & Fire Protection », Sheep Wool Insulation. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.sheepwoolinsulation.com/about/sound-insulation-fire-protection/>

63. « Sheep Wool Insulation R Value », Havelock Wool. [En ligne]. Disponible sur : <https://havelockwool.com/fiberglass-insulation-vs-wool-insulation/>
64. « Installation Guides », Rockwool. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.rockwool.com/uk/resources-and-tools/product-documentation/installation-guides/?selectedCat=downloads#pdf>
65. « How to Install Your Insulation », Johns Manville. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.jm.com/en/homeowner-insulation/how-to-install-your-insulation/>
66. « Roof Insulation Installation Guide », Rockwool. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.rockwool.com/siteassets/o2-rockwool/documentation/technical-guides/commercial-roofing/roofing-installation-guide---technical-guide.pdf>
67. « How to Install EPS Insulation Foam Board? », EPSOLE. [En ligne]. Disponible sur : <https://epssole.com/how-to-install-eps-insulation-foam-board/>
68. « Insulation Installation Guide: FOAMULAR® Extruded Polystyrene (XPS) Insulation for Basement Walls », Youtube. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=QeNA2YuepuM>
69. « How to Install Thermafleece British Wool Insulation », Thermafleece. [En ligne]. Disponible sur : <https://thermafleece.com/resources/how-to-install-thermafleece-insulation>
70. « How to Install Reflective Insulation », Radiant Guard. [En ligne]. Disponible sur : <https://radiantguard.com/pages/how-to-install-reflective-insulation>
71. « What Tools Do I Need When Installing Reflective Insulation? » [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ecofoil.com/blogs/news/what-do-i-need-to-use-when-installing-reflective-insulation>
72. « A Complete Guide to EWI – Render on to Insulation », EWI Store. [En ligne]. Disponible sur : <https://ewistore.co.uk/render-onto-eps-insulation/>
73. « Rockwool Renovation Guide », Rockwool. [En ligne]. Disponible sur : https://p-cdn.rockwool.com/contentassets/8395edb300b44141a6c6d5ee016462d3/rockwool_craftsman-renovation-brochure.pdf?f=20210126072537
74. « Where is Firestopping required? », Life Safety Services. [En ligne]. Disponible sur : <https://info.lifesafetyservices.com/where-is-firestopping-required>
75. « Understanding Fire Stopping Regulations in Buildings », CLM Fireproofing. [En ligne]. Disponible sur : <https://clmfireproofing.com/fire-stopping-regulations/>
76. « Exterior Wall Solutions for Hot-Humid Climates », Rockwool.

77. « A Comprehensive Guide to Reflective Insulation », Fi-Foil. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.fifoil.com/articles/reflective-insulation-types/>
78. « Will Air Gaps Make Reflective Insulation More Effective? », SuperFoil. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.superfoil.co.uk/will-air-gaps-make-reflective-insulation-more-effective/>
79. M. Keane, « Can Insulation Make Condensation Worse », BuildPro. [En ligne]. Disponible sur : <https://buildpro.ie/blog/can-insulation-make-condensation-worse>
80. T. Pullen, «The Importance of Thermal Mass – By Eco-Expert Tim Pullen », Allan Corfield Architects. [En ligne]. Disponible sur : <https://acarchitects.biz/self-build-blog/thermal-mass>
81. E. Krüger, E. González Cruz et B. Givoni, « Effectiveness of indirect evaporative cooling and thermal mass in a hot arid climate », *Building and Environment*, vol. 45, n° 6, p. 1422-1433, juin 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.12.005.
82. S. Amos-Abanyie, F. O. Akuffo et V. Kutin-Sanwu, « Effects of Thermal Mass, Window Size, and Night-Time Ventilation on Peak Indoor Air Temperature in the Warm-Humid Climate of Ghana », *The Scientific World Journal*, vol. 2013, n° 1, p. 621095, janvier 2013, doi : 10.1155/2013/621095.
83. « Table 6 Thermal Conductivity, Specific Heat Capacity and Density », IES. [En ligne]. Disponible sur : https://help.iesve.com/ve2021/table_6_thermal_conductivity_specific_heat_capacity_and_density.htm
84. L. Ižvolt et P. Dobeš, « Test Procedure Impact for the Values of Specific Heat Capacity and Thermal Conductivity Coefficient », *Procedia Engineering*, vol. 91, p. 453-458, 2014, doi : 10.1016/j.proeng.2014.12.025.
85. G. A. Abanto, M. Karkri, G. Lefebvre, M. Horn, J. L. Solis et M. M. Gómez, « Thermal properties of adobe employed in Peruvian rural areas: Experimental results and numerical simulation of a traditional bio-composite material », *Case Studies in Construction Materials*, vol. 6, p. 177-191, juin 2017, doi: 10.1016/j.cscm.2017.02.001.
86. Roadmap to Improve and Ensure Good Indoor Ventilation in the Context of COVID-19, OMS, 1e éd. Genève : Organisation mondiale de la Santé, 2021.
87. A. Chel et G. Kaushik, « Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building », *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, n° 2, p. 655-669, juin 2018, doi : 10.1016/j.aej.2017.02.027.

88. T. Chen, Z. Feng et S.-J. Cao, « The effect of vent inlet aspect ratio and its location on ventilation efficiency », *Indoor and Built Environment*, vol. 29, n° 2, p. 180-195, février 2020, doi : 10.1177/1420326X19865930.
89. J. I. Perén, T. Van Hooff, B. C. C. Leite et B. Blocken, « CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric opening positions: Impact of roof angle and opening location », *Building and Environment*, vol. 85, p. 263-276, février 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.12.007.
90. F. Allard, *Natural Ventilation in Buildings - A Design Handbook*. Londres : James & James, 1998.
91. C. Zhang, J. Guo et D. Peng, « Study on the Passive Design Strategies of Hospital Building in South China – Take Guangdong as an Example ».
92. Établissements de santé résilients face au changement climatique et écologiquement viables – Orientations de l'OMS, 1e éd. Genève : Organisation mondiale de la Santé, 2020.
93. « Avoiding falls from windows or balconies in health and social care premises », Health and Safety Executive. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.hse.gov.uk/healthservices/falls-windows.htm>
94. V. Chetan, K. Nagaraj, P. S. Kulkarni, S. K. Modi et U. N. Kempaiah, « Review of Passive Cooling Methods for Buildings », *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1473, n° 1, p. 012054, février 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1473/1/012054.
95. M. Alwetaishi, « Impact of glazing to wall ratio in various climatic regions: A case study », *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 31, n° 1, p. 6-18, janvier 2019, doi : 10.1016/j.jksues.2017.03.001.
96. K. J. Lomas et Y. Ji, « Resilience of naturally ventilated buildings to climate change: Advanced natural ventilation and hospital wards », *Energy and Buildings*, vol. 41, n° 6, p. 629-653, juin 2009, doi : 10.1016/j.enbuild.2009.01.001.
97. « How to Protect Your Building from Hurricane Season », Unicel Architectural. [En ligne]. Disponible sur : <https://unicelarchitectural.com/how-to-protect-your-building-from-hurricane-season/>
98. « Durable School Glazing Safety Guide 2021 », Durable. [En ligne]. Disponible sur : https://durable.co.uk/wp-content/uploads/2022/11/Durable_School_Glazing_Safety_Guide_2021.pdf
99. « Building Stack Ventilation System », Civil Construction Tips. [En ligne]. Disponible sur : <https://civilconstructiontips.blogspot.com/2017/10/building-stack-ventilation-system.html>

100. MSF (Médecins Sans Frontières), « Environmental measures to prevent TB transmission in resource-limited settings having a high TB-HIV burden ». Médecins Sans Frontières, 2011.
101. « Ventilation », Layak Architect. [En ligne]. Disponible sur : <https://layakarchitect.com/ventilation/>
102. « Whirlybird Installation: What It Is, Costs, and Process », Evo Build. [En ligne]. Disponible sur : <https://evobuild.com.au/whirlybird-installation-what-it-is-costs-and-process/>
103. « Whirlybird Roof Ventilation Guide », Roo Roofing. [En ligne]. Disponible sur : <https://blog.rooroofting.com.au/whirlybird-roof-ventilation-guide>
104. « Whirly bird installation instructions », Top Shield. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.topshieldproducts.com/siteassets/ts-documents/ventilation/whirlybird/beb-bib-installation-instructions.pdf>
105. T. Kubota, D. T. H. Chyee et S. Ahmad, « The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia », *Energy and Buildings*, vol. 41, n° 8, p. 829-839, août 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.03.008.
106. C. A. Short et S. Al-Maiyah, « Design strategy for low-energy ventilation and cooling of hospitals », *Building Research & Information*, vol. 37, n° 3, p. 264-292, juin 2009, doi : 10.1080/09613210902885156.
107. E. Van den Ham, « Draft_for_comment_expert-group_25-02-25 », 6 mars 2025.
108. « Cool Paints », Université nationale de Singapour - Faculté de design et d'ingénierie. [En ligne]. Disponible sur : <https://maintainability.com.sg/defect-library/green-tech/facade-coatings/cool-paint/>
109. J. Pockett, « HEAT REFLECTING PAINTS AND A REVIEW OF THEIR ADVERTISING MATERIAL ».
110. R. F. De Masi, S. Ruggiero et G. P. Vanoli, « Acrylic white paint of industrial sector for cool roofing application: Experimental investigation of summer behavior and aging problem under Mediterranean climate », *Solar Energy*, vol. 169, p. 468-487, juillet 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.05.021.

- 111.** T. Aoyama, T. Sonoda, H. Takebayashi, 1 KANEKA CORPORATION, 1-8, Miyamae-cho, Takasago-cho, Takasago Hyogo 676-8688, Japon, et 2 Département d'architecture, École supérieure d'ingénierie, Université de Kobe, Kobe Hyogo 657-8501, Japon, « Influence of dirt and coating deterioration on the aging of solar reflectance of high-reflectance paint », *AIMS Materials Science*, vol. 6, n° 6, p. 997-1009, 2019, doi : 10.3934/matersci.2019.6.997.
- 112.** E. H. Amer, « Passive options for solar cooling of buildings in arid areas », *Energy*, vol. 31, n° 8-9, p. 1332-1344, juillet 2006, doi : 10.1016/j.energy.2005.06.002.
- 113.** K. Vandana, « The white roofs cooling women's homes in Indian slums », BBC. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.bbc.com/future/article/20230628-the-white-roofs-cooling-womens-homes-in-indian-slums>
- 114.** L. Zhang, X. Meng, F. Liu, L. Xu et E. Long, « Effect of retro-reflective materials on temperature environment in tents », *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 9, p. 122-127, mars 2017, doi : 10.1016/j.csite.2017.02.001.
- 115.** T. Sartori et J. L. Calmon, « Analysis of the impacts of retrofit actions on the life cycle energy consumption of typical neighbourhood dwellings », *Journal of Building Engineering*, vol. 21, p. 158-172, janvier 2019, doi : 10.1016/j.jobe.2018.10.009.
- 116.** M. Pellegrino, M. Simonetti et G. Chiesa, « Reducing thermal discomfort and energy consumption of Indian residential buildings: Model validation by in-field measurements and simulation of low-cost interventions », *Energy and Buildings*, vol. 113, p. 145-158, février 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.12.015.
- 117.** Y. A. Basyouni et H. Mahmoud, « Affordable green materials for developed cool roof applications: A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 202, p. 114722, septembre 2024, doi : 10.1016/j.rser.2024.114722.
- 118.** « How to Apply? », LuminX. [En ligne]. Disponible sur : <https://lumincoat.com/how-to-apply/>
- 119.** J. Yuan, K. Emura et C. Farnham, « A method to measure retro-reflectance and durability of retro-reflective materials for building outer walls », *Journal of Building Physics*, vol. 38, n° 6, p. 500-516, mai 2015, doi : 10.1177/1744259113517208.
- 120.** P. Keegan et B. Thiessen, « Understanding the Value of Radiant Barriers ». [En ligne]. Disponible sur : <https://www.carolinacountry.com/departments/energy-sense/understanding-the-value-of-radiant-barriers>
- 121.** « Radiant Barrier: A Comprehensive Guide », Innovative Solutions Inc. [En ligne]. Disponible sur : <https://radiantbarrier.com/radiant-barrier-a-comprehensive-guide/>

- 122.** V. Gilani, « Advice on Cooling Guidelines », 3 février 2025.
- 123.** « Why is an Air Space Required? », AtticFoil. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.atticfoil.com/pages/why-is-an-air-space-required?srsId=AfmBOopG6CKv9Yt7dQ8wDb1Caca5XhquNPAXLDmu1SIWhikldWMtEq2d>
- 124.** V. Gilani, « FC_Beneficial reuses of MLP.pdf ». FairConditioning.
- 125.** G. M. Zaki, A. Al-Turki et A. S. Al-Lhayyib, « A study of reducing heat loads on tents due to solar insolation », *Energy and Buildings*, vol. 17, n° 1, p. 13-19, janvier 1991, doi: 10.1016/0378-7788(91)90067-D.
- 126.** Y. Wang, E. Long et S. Deng, « Applying passive cooling measures to a temporary disaster-relief prefabricated house to improve its indoor thermal environment in summer in the subtropics », *Energy and Buildings*, vol. 139, p. 456-464, mars 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.081.
- 127.** Y. Jiang et X. Chen, « An experimental study on the improvement of indoor thermal environment of tents by shading in summer », *J. Phys. : Conf. Ser.*, vol. 1176, p. 042087, mars 2019, doi : 10.1088/1742-6596/1176/4/042087.
- 128.** J. Liu, Y. Jiang et X. Ma, « A Shading-technology to Improve the Thermal Environment of Tents », présenté lors de la 6e Conférence internationale sur la mécatronique, l'informatique et l'informatisation de l'éducation (MCEI 2016), Shenyang, Chine, 2016. doi : 10.2991/mcei-16.2016.199.
- 129.** « Shading », Greenspec. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.greenspec.co.uk/building-design/windows/>
- 130.** « Mitigate Wind Damage BEFORE The Storm », National Weather Service. [En ligne]. Disponible sur : https://www.weather.gov/mob/wind_mitigation
- 131.** H. Akbari, M. Pomerantz et H. Taha, « Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas », *Solar Energy*, vol. 70, n° 3, p. 295-310, 2001, doi: 10.1016/S0038-092X(00)00089-X.
- 132.** T. B. Randrup, « A review of tree root conflicts with sidewalks, curbs, and roads ».
- 133.** « The Challenge of Tree Roots and Infrastructure », Plateau Trees. [En ligne]. Disponible sur : <https://plateautrees.com.au/the-challenges-of-tree-roots-and-infrastructure/?form=MG0AV3#>
- 134.** T. Lee, T. Asawa, H. Kawai, T. Nemoto, R. Sato et Y. Hirayama, « Passive cooling techniques in an outdoor space and its effects on the indoor climate », PLEA 2014 - 30^e conférence internationale PLEA, 2014, p. 1-7.

- 135.** J. R. Simpson, « Improved estimates of tree-shade effects on residential energy use », *Energy and Buildings*, vol. 34, n° 10, p. 1067-1076, novembre 2002, doi : 10.1016/S0378-7788(02)00028-2.
- 136.** M. F. Shahidan, P. J. Jones, J. Gwilliam et E. Salleh, « An evaluation of outdoor and building environment cooling achieved through combination modification of trees with ground materials », *Building and Environment*, vol. 58, p. 245-257, décembre 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.07.012.
- 137.** B. J. Green, E. Levetin, W. E. Horner, R. Codina, C. S. Barnes et W. V. Filley, « Landscape Plant Selection Criteria for the Allergic Patient », *The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice*, vol. 6, n° 6, p. 1869-1876, novembre 2018, doi: 10.1016/j.jaip.2018.05.020.
- 138.** M. Madden, « Avoid Pipe Problems Caused by Invasive Plants », Sanitation District No.1. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.sd1.org/444/Avoid-Pipe-Problems-Caused-by-Invasive-P#:~:text=The%20following%20tree%20species%20could,silver%20maples%2C%20and%20boxelder>.
- 139.** J. Ngungui, « Sun Shading Catalogue – Adequate Shading: Sizing Overhangs and Fins ». ONU-Habitat, 2018.
- 140.** F. De Luca, A. Sepúlveda et T. Varjas, « Static Shading Optimization for Glare Control and Daylight », présenté lors de la conférence eCAADe 2021 : Towards a New, Configurable Architecture, Novi Sad, Serbie, 2021, p. 419-428. doi: 10.52842/conf.ecaade.2021.2.419.
- 141.** Q. Al-Yasiri et M. Szabó, « A short review on passive strategies applied to minimise the building cooling loads in hot locations », *Anal. Tech. Szeged.*, vol. 15, n° 2, p. 20-30, déc. 2021, doi : 10.14232/analecta.2021.2.20-30.
- 142.** L. Bellia, F. De Falco et F. Minichiello, « Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates », *Applied Thermal Engineering*, vol. 54, n° 1, p. 190-201, mai 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.01.039.
- 143.** « DAYLIGHTING FOR SUSTAINABILITY LEARNING FROM VERNACULAR », GÖKNUR KAYIR. [En ligne]. Disponible sur : <https://goknurkayir.com/Daylighting-for-Sustainability-Learning-From-Vernacular>
- 144.** Lechner, N. 2015. « Heating, Cooling, Lighting. Sustainable Methods for Architects ». John Wiley and Sons 2015.

- 145.** G. A. Florides, S. A. Tassou, S. A. Kalogirou et L. C. Wrobel, « Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness », *Applied Energy*, vol. 73, n° 3-4, p. 299-328, novembre 2002, doi: 10.1016/S0306-2619(02)00119-8.
- 146.** A. A. E.-M. M. Ali Ahmed, « Using simulation for studying the influence of vertical shading devices on the thermal performance of residential buildings (Case study: New Assiut City) », *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 3, n° 2, p. 163-174, juin 2012, doi: 10.1016/j.asej.2012.02.001.
- 147.** C. Gronbeck, « Design Tools ». [En ligne]. Disponible sur : <https://susdesign.com/tools.php>
- 148.** « How Solar Screen Shades Work », Insolroll. [En ligne]. Disponible sur : <https://insolroll.com/how-solar-screen-shades-work/>
- 149.** Integrated Green Design for Urban & Rural Buildings in Hot Dry-Climate Zone. Département central des travaux publics, gouvernement indien, 2013.
- 150.** J. K. Calautit, B. R. Hughes et D. S. Nasir, « Climatic analysis of a passive cooling technology for the built environment in hot countries », *Applied Energy*, vol. 186, p. 321-335, janvier 2017, doi : 10.1016/j.apenergy.2016.05.096.
- 151.** « Things To Know About Evaporative Cooler and Its Filter Pads », DBG Refrigeration. [En ligne]. Disponible sur : <https://dgbrefrigeration.com.au/things-to-know-about-evaporative-cooler/>
- 152.** R. D. Meade, S. R. Notley, N. V. Kirby et G. P. Kenny, « A critical review of the effectiveness of electric fans as a personal cooling intervention in hot weather and heatwaves », *The Lancet Planetary Health*, vol. 8, n° 4, p. e256-e269, avril 2024, doi: 10.1016/S2542-5196(24)00030-5.
- 153.** « What are the Different Types of Cooling Pad Materials? », Evapoler. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.evapoler.com/different-types-cooling-pad-materials/>
- 154.** Z. Duan, M. Wang, X. Dong, J. Liu et X. Zhao, « Experimental and numerical investigation of wicking and evaporation performance of fibrous materials for evaporative cooling », *Energy and Buildings*, vol. 255, p. 111675, janvier 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111675.
- 155.** « CELdek® 7090-15 », Munters Slovenija. [En ligne]. Disponible sur : <https://munters.sies.si/images/pdf/celdek7090.pdf>
- 156.** Barts NHS Trust, « Changing energy behaviours in the NHS: Operation TLC », SDU.health.org.uk. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.sduhealth.org.uk/news/214/barts-health-nhs-trust-saves-100000-with-a-bit-of-tlc/>

- 157.** « SAM », Zebra. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.zebra-model.org/humanitarian-tools/#SAM>
- 158.** « Ubakus Tool », Ubakus. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ubakus.de/en-ca/r-value-calculator/index.php?>
- 159.** S. You, W. Li, T. Ye, F. Hu et W. Zheng, « Study on moisture condensation on the interior surface of buildings in high humidity climate », *Building and Environment*, vol. 125, p. 39-48, nov. 2017, doi : 10.1016/j.buildenv.2017.08.041.
- 160.** « What is Thermal Bridging? », Kingspan. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.kingspan.com/gb/en/knowledge-articles/what-is-thermal-bridging/>
- 161.** « What are the Benefits of Bespoke Detailing? », Kingspan. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.kingspan.com/gb/en/knowledge-articles/what-are-the-benefits-of-bespoke-detailing/>
- 162.** « How to Identify and When to Select a Commercial Vapor Barrier », Henry. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.henry.com/knowledge-center/commercial-blog/how-to-identify-and-when-to-select-a-commercial-vapor-barrier/>
- 163.** S. D. Gatland II, « Vapour Retarders Play Crucial Role in Building Envelope Moisture Management Settings.pdf », Institut international des consultants en enveloppe du bâtiment (IIBEC). [En ligne]. Disponible sur : <https://iibec.org/wp-content/uploads/2010-04-gatland.pdf>
- 164.** L. Joseph, « BSD-106 : Understanding Vapor Barriers », Building Science Corporation. [En ligne]. Disponible sur : <https://buildingscience.com/documents/digests/bsd-106-understanding-vapor-barriers?form=MG0AV3>
- 165.** « Vapour Barriers or Vapour Retarders », Ministère de l'énergie des États-Unis. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.energy.gov/energysaver/vapor-barriers-or-vapor-retarders>
- 166.** Seeley International Europe, Moyen-Orient et Afrique du Nord, « New submission from EMEA – Contact Us – Indirect Evaporative Cooling Query », 6 février 2025.
- 167.** « Indirect Evaporative Cooling », Evapoler. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.evapoler.com/product-category/indirect-evaporative-air-cooling-two-stage-cooling/>
- 168.** « Climate Wizard Cooling », Seeley International. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.seeleyinternational.com/eu/commercial/brands/climate-wizard/cooling-products/>
- 169.** V. Gilani, « FC_Sustainable Cooling Technologies ». FairConditioning.

- 170.** V. Gilani, « Direct Evaporative Cooling advice », 14 février 2025.
- 171.** J. L. Alvarado, W. Terrell et M. D. Johnson, « Passive cooling systems for cement-based roofs », *Building and Environment*, vol. 44, n° 9, p. 1869-1875, septembre 2009, doi : 10.1016/j.buildenv.2008.12.012.
- 172.** M. Kadri, A. Bouchair et A. Laafer, « The contribution of double skin roof coupled with thermo reflective paint to improve thermal and energy performance for the "Mozabit" houses: Case of Beni Isguen's Ksar in southern Algeria », *Energy and Buildings*, vol. 256, p. 111746, février 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111746.
- 173.** Hasan ul Banna Khan, « frame-roof joinery details », 11 février 2025.
- 174.** C.-M. Hsieh, J.-J. Li, L. Zhang et B. Schwegler, « Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use », *Energy and Buildings*, vol. 159, p. 382-397, janvier 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.045.
- 175.** R. Pandit et D. N. Laband, « Energy savings from tree shade », *Ecological Economics*, vol. 69, n° 6, p. 1324-1329, avril 2010, doi : 10.1016/j.ecolecon.2010.01.009.
- 176.** D. Holm, « Thermal improvement by means of leaf cover on external walls — A simulation model », *Energy and Buildings*, vol. 14, n° 1, p. 19-30, janvier 1989, doi : 10.1016/0378-7788(89)90025-X.
- 177.** S. Chungloo et C. Tienchutima. « The Effect of Wing-Walls and Balcony on Wind Induced Ventilation in High-Rise Residential Units ». september 2018. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies (JARS)*. Do - 10.56261/jars.v8i1.168671
- 178.** O. Awadh et B. Abuhijleh, « The Impact of External Shading and Windows' Glazing and Frame on Thermal Performance of Residential House in Abu-Dhabi ».
- 179.** « Path », outil pratique humanitaire. [En ligne]. Disponible sur : <https://hhot.cbm.org/en/card/path>
- 180.** « Building Access », outil pratique humanitaire. [En ligne]. Disponible sur : <https://hhot.cbm.org/en/card/building-access>
- 181.** Y. Rahmayati *et al.*, « Designing the temporary dental clinic in the Covid-19 global pandemic », *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1026, n° 1, p. 012023, mai 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1026/1/012023.
- 182.** D. Woldemichael, « Passive cooling for clinics », 22 janvier 2025.
- 183.** « CBF », studio FARE. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.farestudio.it/cbf/>

- 184.** « Women's Health Centre / FAR », Archdaily. [En ligne]. Disponible sur : https://www.archdaily.com/8319/womens-health-centre-fare/501011b628ba0d422200089a-womens-health-centre-fare-image?next_project=no
- 185.** M. Murdie, « Bangladesh's Friendship Hospital reimagines functional and sustainable infrastructure », Knowledge Hub. [En ligne]. Disponible sur : <https://knowledge-hub.circle-economy.com/article/22880?n=Bangladesh%27s-Friendship-Hospital-reimagines-functional-and-sustainable-infrastructure>
- 186.** « Friendship Hospital Satkhira / Kashef Chowdhury/URBANA », Archdaily. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.archdaily.com/926305/friendship-hospital-satkhira-kashef-chowdhury-urbana>
- 187.** GADRRRES, « Emergency Decision Tree and Standard Operating Procedures for Disasters and Emergencies at Schools », Youtube. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=ZFzkqnUaBII>
- 188.** « Classroom », outil pratique humanitaire. [En ligne]. Disponible sur : <https://hhot.cbm.org/en/card/classroom>
- 189.** « School », outil pratique humanitaire. [En ligne]. Disponible sur : <https://hhot.cbm.org/en/card/school>
- 190.** « Inclusive Education », outil pratique humanitaire. [En ligne]. Disponible sur : <https://hhot.cbm.org/en/card/inclusive-education>
- 191.** « Seat », outil pratique humanitaire. [En ligne]. Disponible sur : <https://hhot.cbm.org/en/card/seat>
- 192.** « Hygiène », outil pratique humanitaire. [En ligne]. Disponible sur : <https://hhot.cbm.org/en/card/hygiene>
- 193.** « Water », outil pratique humanitaire. [En ligne]. Disponible sur : <https://hhot.cbm.org/en/card/water>
- 194.** « Sustainability: Building from the Ground Up ». GADRRRES. [En ligne]. Disponible sur : https://gadrrres.net/files/towardssaferschoolconst-case-study_5-sustainable_design_ghana.pdf
- 195.** « Putting Play at The Heart of Kindergarten », Sabre Education. [En ligne]. Disponible sur : <https://sabre.education/our-work/transforming/>
- 196.** « Sabre Schools Gallery », Archilovers. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.archilovers.com/projects/127872/sabre-schools-gallery?998028>

- 197.** « Gando Primary School », Architecture in Development. [En ligne]. Disponible sur : <https://architectureindevelopment.org/project/6>
- 198.** « "We don't need air con": how Burkina Faso builds schools that stay cool in 40C heat », Guardian. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.theguardian.com/environment/2024/feb/29/we-dont-need-air-con-how-burkina-faso-builds-schools-that-stay-cool-in-40c-heat>
- 199.** I. Block, « Diébédo Francis Kéré says school that launched his career is "not a traditional African building" », Dezeen. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.dezeen.com/2017/10/17/movie-diebedo-francis-kere-gando-school-burkina-faso-interview-video/>
- 200.** « Gando Primary School », Kere Architecture. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.kerearchitecture.com/work/building/gando-primary-school-3>

Notes de fin

1. Le rapport AR6 du GIEC prévoit une multiplication par plus de 8 des épisodes de chaleur extrême (qui, à l'époque préindustrielle, se seraient produits une fois tous les 50 ans) lorsque les températures moyennes mondiales atteindront 1,5 degré au-dessus de la moyenne préindustrielle - ce qui devrait se produire au cours des années 2030, selon les prévisions actuelles. GIEC 2021.
2. Des cartes du monde montrant les différentes zones de Koppen sont facilement accessibles sur Internet, par exemple à l'adresse <https://koppen.earth/>.
3. La catégorie «transitoire» englobe les bâtiments provisoires à ossature en bambou/briques d'adobe.
4. Une capacité élevée de stockage thermique et une bonne isolation sont particulièrement efficaces lorsqu'elles sont associées à une ventilation stratégique. Il convient toutefois de noter que l'isolation peut ne pas être compatible avec un stockage élevé de la chaleur.
5. Une capacité élevée de stockage thermique et une bonne isolation sont particulièrement efficaces lorsqu'elles sont associées à une ventilation stratégique. Il convient toutefois de noter que l'isolation peut ne pas être compatible avec un stockage élevé de la chaleur.
6. Une capacité élevée de stockage thermique et une bonne isolation sont particulièrement efficaces lorsqu'elles sont associées à une ventilation stratégique. Il convient toutefois de noter que l'isolation peut ne pas être compatible avec un stockage élevé de la chaleur.
7. Les sacs de sable sont généralement peu coûteux. Cependant, lors d'essais sur le terrain au Mali, les sacs en toile de jute n'étaient pas disponibles, ce qui en faisait dans ce contexte un «intrant spécialisé» très coûteux.
8. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une stratégie de refroidissement passif, les rafraîchisseurs d'air par évaporation (voir la [section 2.9](#)) se sont révélés très efficaces dans les climats chauds et secs.
9. Les différentes stratégies comparées étaient la protection solaire des fenêtres, la végétation, la ventilation naturelle, l'utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique, les fenêtres améliorées, l'isolation, la peinture thermique et la protection solaire du toit.
10. La seule stratégie qui a donné de meilleurs résultats était une stratégie de refroidissement actif, à savoir un refroidisseur à évaporation directe/rafraîchisseur d'air par évaporation.
11. Les différentes stratégies comparées étaient la protection solaire des fenêtres (meilleures performances dans les climats tropicaux), la ventilation naturelle

(meilleures performances dans les climats subtropicaux), l'utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique (meilleures performances dans les climats méditerranéens) et les peintures thermiques.

12. Plus la capacité de stockage thermique d'un matériau est élevée, plus ce matériau est efficace pour stocker la chaleur. Le tableau fournit des valeurs pour des épaisseurs typiques afin de faciliter la comparaison. Si une épaisseur différente de celle indiquée est requise, diviser la capacité de stockage thermique par l'épaisseur typique du matériau indiquée et la multiplier par l'épaisseur requise (en millimètres). Par exemple, si, au lieu d'un enduit de ciment de 20 mm (épaisseur typique mentionnée), un enduit de ciment de 10 mm est requis : capacité de stockage thermique = $30 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K}) \times 10 \text{ mm} / 20 \text{ mm}$, ce qui donne $15 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$ pour un enduit de ciment de 10 mm. Les unités sont exprimées en $\text{kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$, ce qui mesure la quantité d'énergie thermique, en kilojoules (kJ), nécessaire pour modifier la température d'un mètre carré d'un matériau (m^2) de 1 Kelvin (K).
13. L'air chaud crée une zone de basse pression tandis que l'air froid crée une zone de haute pression. Le vent souffle d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression.
14. Les différentes stratégies comparées étaient la protection solaire des fenêtres (meilleures performances dans les climats tropicaux), la ventilation naturelle (meilleures performances dans les climats subtropicaux), l'utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique (meilleures performances dans les climats méditerranéens) et les peintures thermiques.
15. Dans l'étude, la fenêtre à auvent avait un angle d'ouverture maximal de 30 degrés.
16. Une humidité élevée peut avoir deux causes principales : l'air extérieur humide aspiré pendant la nuit dans les climats humides, et la chaleur et l'humidité provenant des occupants piégés à l'intérieur pendant la journée lorsque les fenêtres sont fermées [21] – cette dernière cause est particulièrement vraie pour les lieux très fréquentés tels que les salles d'hôpital.
17. Les stratégies comparées étaient les suivantes : protection solaire des fenêtres, végétation, ventilation naturelle, utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique, fenêtres améliorées, isolation, peinture thermique et protection solaire du toit.
18. Plus précisément, les peintures sont des revêtements élastomères, tandis que les enduits sont des revêtements à base de ciment. Pour plus de détails, voir [108].
19. Les stratégies les plus efficaces étaient (par ordre d'efficacité) : l'isolation avec ventilation nocturne, l'utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique avec ventilation nocturne, la ventilation nocturne (seule) et la végétation.
20. Les stratégies les plus efficaces étaient (par ordre d'efficacité) : l'isolation avec ventilation nocturne, l'utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique avec ventilation nocturne, la ventilation nocturne (seule), la végétation et les peintures thermiques.

21. Les stratégies les plus efficaces étaient (par ordre d'efficacité) : l'isolation avec ventilation nocturne, l'utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique avec ventilation nocturne et la ventilation nocturne (seule).
22. Les stratégies les plus efficaces étaient (par ordre d'efficacité) : l'isolation avec ventilation nocturne, l'utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique avec ventilation nocturne, la ventilation nocturne (seule), la végétation, les peintures thermiques et la protection solaire du toit.
23. Les différentes stratégies comparées étaient les suivantes : la protection solaire des fenêtres (meilleures performances dans les climats tropicaux), la ventilation naturelle (meilleures performances dans les climats subtropicaux), l'utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique (meilleures performances dans les climats méditerranéens) et les peintures thermiques.
24. Toutes les stratégies comparées dans l'étude étaient des stratégies de protection solaire : la protection des murs avec toile pour murs, les stores extérieurs, les écrans d'ombrage sur les murs orientés nord et sud et la protection solaire du toit à l'aide de toiles fines et hautement réfléchissantes pouvant être retirées en hiver.
25. Les différentes stratégies comparées étaient les suivantes : la protection des fenêtres, la végétation, la ventilation naturelle, l'utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique, les fenêtres améliorées, l'isolation, les peintures thermiques et la protection solaire du toit.
26. Les différentes stratégies comparées étaient les suivantes : différents types d'isolation du toit et des murs, les fenêtres améliorées et l'isolation des sols combinée à l'utilisation de matériaux à haute capacité de stockage thermique dans le sol.
27. Les différentes stratégies comparées dans l'étude étaient l'isolation, les peintures thermiques et les fenêtres améliorées.
28. Les valeurs R indiquées dans ce document sont les valeurs R pour une épaisseur de matériau de 25 mm. Bien que la valeur R soit une unité impériale et que ce document utilise des unités métriques, la valeur R est une unité plus reconnue à l'échelle mondiale que son équivalent métrique (la valeur RSI) et est plus susceptible d'être rencontrée par les travailleurs humanitaires. Les unités sont $\text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h} / \text{BTU}$, où ft^2 = pieds au carré (surface), $^\circ\text{F}$ = degrés Fahrenheit (température), h = heures (temps), BTU = British Thermal Units (énergie).
29. Par exemple, voir [159], « Study on moisture condensation on the interior surface of buildings in high humidity climate ».
30. Toutes les stratégies comparées dans l'étude étaient l'isolation, les matériaux à haute capacité de stockage thermique, la protection solaire du toit et un système de refroidissement actif.
31. Il n'y a qu'une légère amélioration lorsque la masse thermique est multipliée par 4, passant de 3 000 kg (ii) à 14 000 kg (iii); le retour sur investissement est donc meilleur pour 3 000 kg que pour 14 000 kg.

32. L'isolation a augmenté la température moyenne car elle a réduit l'efficacité de la ventilation nocturne ([section 2.3.3](#)), ce qui met en lumière l'importance de combiner différentes stratégies [42].
33. Les climats semi-arides peuvent être comparables aux climats méditerranéens, car ils présentent également une variation diurne de température plus importante et des hivers froids. Ainsi, même si les matériaux à haute capacité de stockage thermique n'ont pas permis d'obtenir la plus forte réduction de température, ils ont également contribué au confort hivernal.

ADAPT

