

LIMITER L'USAGE DES EQUIPEMENTS

Quelles solutions pour la construction bois ?

Low-tech, frugalité et bio-inspiration

#Guide Pratique



avec le soutien du

CODIFAB

comité professionnel de développement
des industries françaises de l'ameublement et du bois

FINANCEMENT

CODIFAB

comité professionnel de développement
des industries françaises de l'ameublement et du bois

Le CODIFAB - Comité professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois - fédère et rassemble 4200 PME et plus de 15 000 artisans, industriels français de l'ameublement et du bois. Le CODIFAB a pour mission de conduire et financer des actions d'intérêt général décidées par les organisations professionnelles représentatives :



Pour en savoir plus : www.codifab.fr

AUTEURS

NOBATEK INEF4

INSTITUT POUR LA TRANSITION ÉNERGETIQUE

Stéphanie ARMAND DECKER
Thomas GARNESON
Inès AEPLY
Graphisme réalisé par
Emlyne TESSARI ROSSI

NOBATEK/INEF4 est un centre de recherche technologique labellisé Institut national pour la Transition Énergétique dans le secteur de l'aménagement, de la réhabilitation et de la construction durables.

CEEBIOS
Centre Européen d'Excellence
en Biomimétisme de Senlis

Estelle CRUZ
Luce-Marie PETIT

CEEBIOS est une Association fondée par un collège d'acteurs à l'initiative de la Ville de Senlis, Ceebios est le centre d'études & d'expertises dédié au déploiement du biomimétisme en France.

COMITE DE PILOTAGE

Nous remercions les membres du Comité de Pilotage qui ont su orienter au mieux la rédaction du présent guide pour qu'elle corresponde aux attentes réelles des concepteurs et réalisateurs de bâtiments bois.

Rodolphe MAUFRONT	UMB FFB
Clément QUINEAU	UICB
Romain CANLER	UICB
Emilie FERCHAUD	CODIFAB

EXPERTS CONSULTÉS

Nous remercions les experts consultés pour leurs apports à ce guide, tant scientifiques et techniques que pratiques, sans lesquels il ne serait certainement pas aussi juste et complet.

Nous remercions tout particulièrement Renaud BLONDEAU-PATISSIER, Directeur Ingénierie et Recherche de WOODEUM-WO2, pour le suivi qu'il a effectué tout au long de la réalisation de ce guide et pour ses conseils en matière de conception de bâtiments bois à faible inertie.

Pour les retours d'expérience qu'ils ont partagés nous remercions :

Christian HACKEL	M'Cub Architectes
Samuel RIALLAND	Atlanbois
Thierry RIESER	Enertech
Stéphane COCHET	A003 Architectes
Jérémie JEAN	eGreen

Photo de couverture : [Pixabay licence](https://www.pixabay.com/) - Libre pour usage commercial - Pas d'attribution requise"

© NOBATEK/INEF4 & CEEBIOS & CODIFAB, 2020 – [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) - Sauf mention contraire cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution International. L'œuvre peut être librement utilisée, à la condition de l'attribuer aux auteurs et financeurs et à la partager dans les mêmes conditions.



ÉDITO

De tout temps, l'homme a voulu construire plus haut, plus grand, plus éternel, des bâtiments témoins de sa maîtrise de la science, de la technique et de sa puissance. Des ouvrages historiques, emblématiques et multiséculaires embellissent Paris, la France et le monde entier. En parallèle, la construction de logements s'est toujours appuyée sur les ressources de la nature à disposition. De même, les biotopes et les écosystèmes s'organisent pour tirer sobrement et efficacement le meilleur parti des matériaux en présence, des conditions naturelles et météorologiques.

Le vingtième siècle dans un souci de rapidité et d'approche court terme, a vu l'industrialisation, l'exploitation à outrance des ressources minérales et énergétiques, servir le confort et les attentes fortes en matière de construction.

La transition énergétique qui s'impose depuis des années à notre civilisation s'est d'abord tournée vers la technologie, la domotique, le numérique, l'optimisation pour résoudre l'équation : « construire moins cher et vivre mieux, en consommant moins ». Mais les résultats restent à conforter : trop de complexité, augmentation des malfaçons selon les assurances, pérennité dans le temps non assurée.

La transition environnementale a mis en avant les matériaux biosourcés, dont le bois et ses très

nombreuses vertus (renouvelable, isolant, léger, hygroscopique), sans oublier qu'il permet une préfabrication en réduisant les nuisances d'un chantier et surtout qu'il capte et stocke du CO₂ et se substitue à d'autres matériaux gros émetteurs de CO₂.

Loin d'être un retour vers le passé, ce guide recense les nombreuses réponses frugales, passives, issues de principes physiques ou naturels, expérimentées et simples à la mise en œuvre comme à l'usage, la maintenance et à la gestion de la fin de vie. Il n'occulte pas les recommandations, les précautions à prendre, l'état de l'offre et les réglementations applicables. Car à chaque matériau, à chaque mode constructif, à chaque équipement sa

“Loin d'être un retour vers le passé, ce guide recense les nombreuses réponses frugales, passives, issues de principes physiques ou naturels, expérimentées et simples à la mise en œuvre comme à l'usage, la maintenance et à la gestion de la fin de vie.”

bonne place. La construction bois dans sa pluralité (ossature, lamellé collé, CLT, panneaux...) sait apporter des solutions pour limiter le recours aux trop nombreux équipements et artifices qui rendent les ouvrages fragiles et énergivores. Les 14

bâtiments exemplaires présentés dans ce recueil viennent illustrer cette démonstration. De surcroît, ces bâtiments témoignent que construction bois, performance, bas carbone et frugalité ne s'opposent ni à la beauté, ni à l'audace esthétique et architecturale.

Merci et bravo à NOBATEK/INEF4, à CEEBIOS et à tous les experts et acteurs de la filière bois qui ont permis et contribué à ce guide.

Michel VEILLON

Président du DEFI Construction Bois
au sein du CSF BOIS

OBJECTIFS DE CE GUIDE

Face à l'urgence des enjeux environnementaux, la conception de bâtiments qui vise à limiter l'impact environnemental de leur cycle de vie donne tout son sens à l'utilisation du bois, matériau renouvelable et à faible potentiel de réchauffement climatique. Outre l'utilisation de matériaux alternatifs peu impactants, la recherche de la performance énergétique et l'augmentation des exigences environnementales se traduisent par une augmentation de la complexité des systèmes. Cela peut donner lieu à des bâtiments qui demandent des principes de fabrication, de mise en œuvre, d'usage et d'entretien complexes et ayant un besoin de ressources conséquent. Le besoin est alors d'orienter la conception vers la sélection des solutions qui répondent à ces exigences tout en limitant la complexité de leur application.

Ce guide vise à diffuser des connaissances, solutions et recommandations pour limiter le recours aux équipements techniques dans les bâtiments bois. Il s'agit des équipements d'usage nécessaire pour maintenir l'ambiance intérieure des bâtiments résidentiels et tertiaires confortable. Ces équipements concernent notamment le chauffage, la ventilation, la climatisation et l'éclairage. Réduire le nombre et la complexité de ces équipements doit permettre de diminuer les coûts de construction et d'entretien tout en limitant l'impact environnemental du bâtiment et en maintenant le confort des usagers.

STRUCTURE DU GUIDE

L'objectif final est d'inspirer le lecteur pour l'innovation frugale en orientant et guidant sa recherche vers des solutions passives et de faibles technicités adaptées à la construction bois. Pour ce faire, le guide s'articule autour de sept grandes parties :

1. **Contexte réglementaire, normatif et assurantiel** : Cette première partie traite du contexte réglementaire, normatif et assurantiel que le concepteur doit maîtriser et dans lequel les solutions proposées seront positionnées.
2. **Enjeux de la construction bois** : Le guide aborde ensuite les spécificités propres à l'usage du matériau bois dans la construction de manière à mettre en avant l'intérêt du bois pour concevoir des ouvrages qui limitent l'usage des équipements.
3. **Méthodes de conception : Bioclimatisme, Frugalité et Biomimétisme** : Les principes de la conception bioclimatique sont alors rappelés comme prérequis de la conception de bâtiments bois basse consommation. La frugalité est également définie comme principe clef à adopter pour s'assurer de limiter l'impact environnemental. Enfin la philosophie du biomimétisme est mentionnée en tant que source d'inspiration multiple permettant d'aller plus loin en matière de frugalité et d'économie des ressources employées.
4. **Solutions architecturales et techniques** : Onze solutions ont été sélectionnées pour les bâtiments bois qui visent à limiter l'usage des équipements nécessaires pour satisfaire les besoins en chauffage, refroidissement, ventilation et éclairage artificiel.
Chaque solution fait l'objet d'une fiche dont la composition est décrite dans la Figure 1. Chaque fiche est confrontée aux spécificités de la construction bois et s'attache à mettre en avant le potentiel offert par une approche bio-inspirée pour répondre aux problématiques abordées par les solutions (Figure 2). Les solutions sont également évaluées selon 8 indicateurs décrits dans le Tableau 1 : le coût, l'impact carbone, la mise en œuvre, l'entretien, l'adaptabilité, la performance, la durabilité et l'intégration architecturale. L'évaluation des solutions a été réalisée par rapport aux solutions les plus couramment mises en œuvre aujourd'hui et basée sur l'expertise des auteurs du guide.
5. **Stratégies d'implication des usagers** : Cette partie souligne l'importance de l'utilisateur dans l'atteinte de la performance énergétique et le fonctionnement du bâtiment. Des outils de sensibilisation, d'incitation douce et forte sont alors listés et décrits pour donner des pistes sur la manière d'impliquer les usagers.
6. **Intégration des solutions en conception** : Des méthodes de calcul sont ensuite décrites sous forme d'argumentaires expliquant comment prendre en compte chacune des solutions lors d'analyses environnementale et énergétique en phase de conception.
7. **Inspirations et opérations exemplaires** : Quatorze bâtiments exemplaires illustrent l'utilisation des solutions sélectionnées sur des cas réels et procurent quelques retours d'expérience. La composition des fiches bâtiment est décrite dans la Figure 3.

Toutes les solutions techniques et architecturales ainsi que les bâtiments exemplaires ont été recensés dans le Tableau 2. Ce tableau permet de visualiser rapidement les spécificités de chaque bâtiment présenté.

DESCRIPTION DES FICHES ET DES CRITERES DE CARACTERISATION DES SOLUTIONS

Nom de la solution → **SYSTÈME D'ÉCLAIRAGE NATUREL INDIRECT**

Description → Le système d'éclairage naturel indirect permet de limiter le recours à l'éclairage artificiel en diffusant à l'intérieur du bâtiment les rayons lumineux dans des zones où l'accès à l'éclairage naturel direct est insuffisant ou inadapté. Cette captation de la lumière est réalisée au moyen de différentes techniques qui font appel à des surfaces réfléchissantes qui peuvent être regroupées en quatre catégories [13,14] :

Schémas explicatifs → **Étagère à lumière (ou light shelf)** : Cette solution consiste à placer en partie haute des surfaces vitrées une surface réfléchissante horizontale (généralement au 2/3 de la hauteur). L'étagère à lumière reçoit le rayonnement lumineux qu'elle réfléchit à l'intérieur du bâtiment vers le plafond. Ce dispositif permet de profiter de la lumière naturelle tout en se préservant d'un rayonnement direct qui peut être source d'éblouissement. La partie basse de la surface vitrée peut être occultée par un store. La surface réfléchissante peut être placée à l'extérieur ou à l'intérieur du bâtiment. Placée à l'extérieur, l'étagère à lumière peut également jouer le rôle de protection solaire fixe en période estivale.

Poste concerné par la solution :

- Eclairage artificiel
- Refroidissement
- Ventilation mécanique
- Chauffage

Évaluation selon 8 critères

Avantages et inconvénients

Caractéristiques :

Étagère à lumière*	Mise en œuvre
Coût	Adaptabilité
Entretien	Durabilité
Performance	Impact Carbone
Intégration Architecturale	

LES (+)

- L'installation de réflecteurs, étagères à lumière et conduits ne nécessite pas de modification importante sur les bâtiments existants.
- Apport et amélioration de la qualité de lumière du jour et réduction des besoins d'éclairages artificiels et donc de consommation d'énergie.
- Réduction des besoins de refroidissement en limitant les apports solaires directs et les apports internes tout en maintenant les apports lumineux.

LES (-)

- L'intégration architecturale de ces dispositifs est contraignante. Dans le cas du système des étagères à lumière, la hauteur entre sol et plafond doit être suffisante.
- La maintenance est très importante pour garantir l'efficacité des systèmes : les surfaces réfléchissantes doivent être nettoyées régulièrement.
- Une conception favorisant l'accès à l'éclairage naturel direct sera toujours préférable en termes d'apport lumineux.
- La gestion thermique des puits de lumière est importante pour éviter des surchauffes par l'accès d'apports solaires.

Figure 1 : Exemple de fiche solution

Focus biomimétisme adapté à la solution → **FOCUS BIOMIMÉTISME [36-39]**

Dans le vivant, la surventilation permet également de coupler renouvellement d'air et régulation thermique. De nombreuses architectures animales des insectes sociaux ou mammifères telles que les termitières, fourmilères, nids et terriers utilisent cette stratégie. Dans la même lignée, le halètement des mammifères leur permet de réguler rapidement la température de leur corps lors de surchauffes liées par exemple à un exercice physique.

En architecture bio-inspirée, la termitière est un modèle fréquemment utilisé. Certaines termitières localisées dans les milieux tropicaux ont la capacité de ventiler naturellement leur habitat par ventilation naturelle verticale. Une surventilation peut intervenir la nuit lorsque la différence de température entre l'air à l'intérieur et extérieur de la termitière présente une importante différence. L'air capté sous terre en partie basse de la termitière est refroidi par géothermie en étant acheminé dans les espaces de culture des larves et champignons puis évacué par une cheminée centrale via un processus de tirage thermique (Figure 38).

Figure 38 : Schéma de principe des termitières à cheminée, Posthous, CC BY-SA 4.0

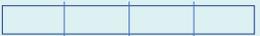
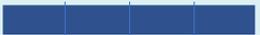
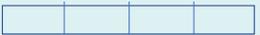
Figure 39 : Schéma des termitières appliqué au bâtiment, Fred the Oyster CC BY-SA 3.0

Ces principes d'acheminement de l'air et de surventilation nocturne ont été mis en œuvre lors de la conception de l'Eastgate Building, bâtiment de bureau et commerce à Harare au Zimbabwe construit en 1996 (Figure 40). Le bâtiment consomme 35% d'énergie de moins comparé aux bâtiments classiques en ventilation mécanique à Harare. Une surventilation nocturne est effectuée aux périodes les plus chaudes de l'année afin d'évacuer la nuit la chaleur accumulée dans les parois (Figure 39). A la livraison le bâtiment a coûté 20% moins cher que s'il avait dû intégrer un système de ventilation et climatisation classique.

Figure 40 : Eastgate Building, Harare Estelle Cruz CC BY

Figure 2 : Exemple de focus biomimétisme

Tableau 1 : Définition des 8 critères d'évaluation

NOM DE L'INDICATEUR	DESCRIPTION DE L'INDICATEUR	LEGENDE	
COUT	Le coût de la solution à l'investissement : celui-ci est noté sur 4 niveaux.	Peu couteux €	Très couteux €€€€
IMPACT CARBONE	Quantifie l'impact carbone de la solution sur son cycle de vie, de la construction au démantèlement.	Impact carbone nul ou négatif -	Impact carbone très important CCCC
MISE EN ŒUVRE	Évalue qualitativement la facilité de mise en œuvre de la solution.	Mise en œuvre facile 	Mise en œuvre difficile 
ENTRETIEN	Indique si la solution nécessite un entretien fréquent et/ou complexe.	Entretien facile 	Entretien difficile 
ADAPTABILITE	Quantifie la « flexibilité » de la solution c'est-à-dire si celle-ci s'adapte facilement à différents types de bâtiment, d'usage et à la rénovation.	Bonne adaptabilité 	Faible adaptabilité 
PERFORMANCE	Indique si la solution est énergétiquement performante dans son domaine d'application.	Bonne performance 	Faible performance 
DURABILITE	Indique si la solution est durable dans le temps.	Bonne durabilité 	Faible durabilité 
INTEGRATION ARCHITECTURALE	Explique si la solution est facile à intégrer d'un point de vue architectural, c'est-à-dire si la disposition ou l'agencement du bâtiment permettent l'intégration d'une solution ou si le PLUi (Plan Local d'Urbanisme intercommunal) le permet.	Bonne intégration architecturale 	Faible intégration architecturale 

Nom du bâtiment
exemplaire et localisation

Eventuels labels et
certifications reçus
par l'ouvrage

Caractéristiques
techniques du
bâtiment

BÂTIMENT B, NANTES



© Philippe Bault

Situé sur l'île de Nantes (44), le bâtiment « B » (pour Bois) d'une surface de 1562 m² en R+3 abrite les bureaux d'Atlanbois, de l'Office National des Forêts Pays de la Loire, de l'UNIFA, une antenne du FCBA ainsi qu'un espace d'exposition.

Démarche exemplaire

Ce bâtiment vise à montrer les potentialités du matériau bois. Le bois est présent au niveau de la structure, de l'enveloppe et de l'aménagement intérieur. Les différentes pièces proviennent pour la grande majorité de la région et ont été séchées, aboutées et transformées par des sociétés locales.

Lors de ce projet, la maîtrise d'œuvre ne souhaitait pas « appliquer les recettes des certifications mais bel et bien tester des systèmes ».

Labels, certifications, référentiels et démarches

Le projet a appliqué volontairement les principes du label BBC.

FICHE TECHNIQUE

Maîtrise d'ouvrage
Atlanbois

Maîtrise d'œuvre
Agence Barré-Lambot

Conseil en ventilation naturelle
Jacques Gaudemer

BET Structure
AREST

BET Bois
Synergie Bois

BET Fluides
TUAL

Entreprise de construction bois
AXE 303

Surface
1 562 m² SHON

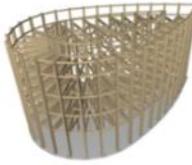
Coût de construction
4,2M€ HT (TCE)

Année de livraison
2013

Localisation
Nantes, Loire-Atlantique, France



PRIX NATIONAL
CONSTRUCTION BOIS



© Synergie Bois

Figure 3 : Exemple de fiche bâtiment exemplaire

LISTE DES SOLUTIONS ET SPECIFICITES DES BATIMENTS ETUDIÉS

Tableau 2 : Solutions utilisées dans les bâtiments exemplaires et spécificités de conception et réalisation de ces bâtiments

	BATIMENT B, NANTES	LOW CAL, PONT DE BARRET	BOIS DEBOUT, MONTREUIL	CENTRE GÉOLOGIQUE VIAVINO, SAINT-CHRISTOL	BATIMENT MAX WEBER, UNIVERSITE NANTERRE	BAITYKOOL, DUBAI, EMIRATS ARABES UNIS	GROUPE SCOLAIRE STEPHANE HESSEL / LES ZÉFIROTTES, MONTREUIL	EASTGATE BUILDING : « LE BÂTIMENT TERMITIÈRE », HARARE, ZIMBABWE	CIRC, LYON	BIBLIOTHEQUE ALCAZAR, MARSEILLE	MAISON EN PIN MARITIME, TAILLAN-MEDOC	BAÏ UNA & BAÏ ONA, BAYONNE	DAVIES ALPINE HOUSE : SERRE BOTANIQUE, LONDRES, ANGLETERRE	HYGROSKIN (ENVELOPPE BOIS ADAPTATIVE, ORLEANS)
SOLUTIONS ETUDIÉES DANS LE GUIDE ET BATIMENTS DANS LESQUELS ELLES ONT ÉTÉ APPLIQUÉES														
SYSTEME D'ÉCLAIRAGE NATUREL INDIRECT	X									X				
BRASSEUR D'AIR				X			X	X						
SURVENTILATION OU FREE-COOLING	X			X		X	X	X			X	X	X	
PUITS CLIMATIQUE				X	X						X			
VENTILATION NATURELLE & HYBRIDE	X	X		X	X	X		X				X		
VMC DOUBLE FLUX AVEC RECUPERATION DE CHALEUR		X	X				X				X			
FAÇADE DOUBLE-PEAU									X					
VITRAGES A PROPRIETES VARIABLES									X					
BRISE-SOLEIL ORIENTABLE	X	X		X			X			X				
TOIT RAFRAICHISSANT			X			X								
VEGETALISATION DU BATIMENT ET DE SES ABORDS	X		X			X	X	X	X					
SPECIFICITES PRESENTES DANS LA CONCEPTION ET REALISATION DES BATIMENTS ETUDIÉS														
ENJEUX DE LA CONSTRUCTION BOIS	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X		X
LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		
BIOMIMÉTISME								X	X				X	X
STRATEGIES D'IMPLICATION DES USAGERS	X	X	X				X				X	X		

ABREVIATIONS

ACV	Analyse de Cycle de Vie
ADEME	Agence de la transition écologique
AFNOR	Association Française de Normalisation
ATec	Avis Technique
ATEX	Appréciation Technique d'Expérimentation
BEPOS	Bâtiment à Energie Positive
BSO	Brise-Soleil Orientable
C2P	Commission Prévention Produits
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLT	Bois lamellé croisé (Cross Laminated Timber)
CODIFAB	COmité professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois
COP	Coefficient de Performance
COV	Composé Organique Volatil
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CTA	Centrale de Traitement d'Air
DTA	Document Technique d'Application
DTU	Document Technique Unifié
ESA	Ecosystem Services Analysis
ETN	Enquête de Technique Nouvelle
FDES	Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire
FLJ	Facteur Lumière Jour
GES	Gaz à Effet de Serre
MCP	Matériaux à Changement de Phase
MDEGD	Modules de Données Environnementales Génériques par Défaut
NRA	Nouvelle Réglementation Acoustique
PEP	Profil Environnemental Produit
PLU	Plan Local d'Urbanisme
R+1	Premier étage
RAGE	Règles de l'art Grenelle environnement
RDC	Rez-de-chaussée
RE 2020	Réglementation Environnementale 2020
RSDT	Règlement Sanitaire Départemental Type
RT 2012	Réglementation Thermique 2012
SCOP	Société Coopérative
SHAB	Surface Habitable
SHON	Surface Hors Œuvre Nette
SRI	Solar Reflectance Index
STD	Simulations Thermiques Dynamiques
VMC	Ventilation Mécanique Contrôlée
VRD	Voiries et Réseaux Divers

SOMMAIRE

FINANCEMENT	1
ÉDITO	2
OBJECTIFS DE CE GUIDE.....	1
STRUCTURE DU GUIDE	1
DESCRIPTION DES FICHES ET DES CRITERES DE CARACTERISATION DES SOLUTIONS.....	2
LISTE DES SOLUTIONS ET SPECIFICITES DES BATIMENTS ETUDIES	5
ABREVIATIONS	6
SOMMAIRE	7
1 CONTEXTE REGLEMENTAIRE, NORMATIF ET ASSURANTIEL	12
2 ENJEUX DE LA CONSTRUCTION BOIS	17
SPECIFICITES LIEES A L'USAGE DU MATERIAU BOIS	18
LIENS ENTRE SPECIFICITE DU BOIS ET BESOINS DU BATIMENT.....	21
3 METHODES DE CONCEPTION : BIOCLIMATISME, FRUGALITE ET BIOMIMETISME.....	22
LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE	23
RECHERCHE DE FRUGALITE	25
HABITAT ET BIOMIMETISME.....	27
4 SOLUTIONS ARCHITECTURALES ET TECHNIQUES	30
SYSTEME D'ÉCLAIRAGE NATUREL INDIRECT	32
BRASSEUR D'AIR	39
SURVENTILATION OU FREE-COOLING	43
PUITS CLIMATIQUE	52
VENTILATION NATURELLE & HYBRIDE	58
VMC DOUBLE FLUX AVEC RECUPERATION DE CHALEUR.....	64
FAÇADE DOUBLE-PEAU	69
VITRAGES A PROPRIETES VARIABLES.....	74
BRISE-SOLEIL ORIENTABLE	79
TOIT RAFRAICHISSANT.....	84
VEGETALISATION DU BATIMENT ET DE SES ABORDS	89
5 STRATEGIES D'IMPLICATION DES USAGERS.....	97
OUTILS D'INFORMATION ET DE SENSIBILISATION DE L'USAGER	99
OUTILS D'INCITATION DOUCE.....	101
OUTILS D'INCITATION FORTE.....	104
6 INTEGRATION DES SOLUTIONS EN CONCEPTION	105
ANALYSE ENVIRONNEMENTALE	106
ANALYSE ENERGETIQUE	108
SYSTEME D'ÉCLAIRAGE NATUREL INDIRECT	110
BRASSEUR D'AIR	114
SURVENTILATION, PUIITS CLIMATIQUE, VENTILATION NATURELLE & HYBRIDE ET VENTILATION DOUBLE FLUX.....	115

FAÇADE A DOUBLE PEAU	122
VITRAGE A PROPRIETES VARIABLES	124
BRISE-SOLEIL ORIENTABLE	127
TOIT RAFRAICHISSANT	129
VEGETALISATION DU BATIMENT ET DE SES ABORDS	131
7 INSPIRATIONS ET OPERATIONS EXEMPLAIRES	133
BATIMENT B, NANTES.....	134
LOW CAL, PONT DE BARRET	137
BOIS DEBOUT, MONTREUIL.....	140
CENTRE CENOLOGIQUE VIAVINO, SAINT-CHRISTOL	143
BATIMENT MAX WEBER, UNIVERSITE NANTERRE	145
BAITYKOOL, DUBAI, ÉMIRATS ARABES UNIS	148
GROUPE SCOLAIRE STEPHANE HESSEL / LES ZEFIROTTEs, MONTREUIL	151
EASTGATE BUILDING : « LE BATIMENT TERMITIERE », HARARE, ZIMBABWE.....	153
CIRC, LYON	156
BIBLIOTHEQUE ALCAZAR, MARSEILLE	157
BAÏ UNA & BAÏ ONA, BAYONNE	159
MAISON EN PIN MARITIME, TAILLAN-MEDOC	162
DAVIES ALPINE HOUSE : SERRE BOTANIQUE, LONDRES.....	166
HYGROSKIN (ENVELOPPE BOIS ADAPTATIVE), ORLEANS	168
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	169
SOURCES & REFERENCES	171

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Exemple de fiche solution	2
Figure 2 : Exemple de focus biomimétisme	2
Figure 3 : Exemple de fiche bâtiment exemplaire	4
Figure 4 : Traditionnalité, Règles de l'art et documents de référence.....	15
Figure 5 : Domaines traditionnel/non traditionnel et techniques courantes/non courantes ; d'après qualiteconstruction.com	15
Figure 6 : Schéma de principe d'un mur à ossature bois ; catalogue-bois-construction.fr.....	18
Figure 7 : Montage et vue Sud-Est de la maison Napevomo au Solar Decathlon 2010, Espagne.....	20
Figure 8 : Casquette dimensionnée pour capter le rayonnement solaire en hiver et s'en protéger en été ©Christian Maintrot	24
Figure 9 : L'importance de considérer l'énergie grise ; Source [9].....	25
Figure 10 : Stratégies de résolution d'un problème observées dans le vivant et dans les systèmes humains suivant les échelles de tailles © Julian Vincent [18]. À droite les stratégies du vivant suivant les échelles de tailles, à gauche les stratégies humaines. À l'échelle du bâtiment (rectangle noir), les sociétés humaines maximisent l'apport d'énergie, d'espace et matériaux quand le vivant maximise l'échange d'information et minimise l'utilisation d'énergie et matériaux.	28
Figure 11 : Variation de température du corps de l'organisme suivant la variation de température du milieu ©Wikimedia Commons	29
Figure 12 : Différents facteurs environnementaux auxquels est soumis l'organisme.	29
Figure 13 : Principe de l'étagère à lumière - d'après © Architecture et Climat – Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI) – Université catholique de Louvain (Belgique)	32
Figure 14 : Principe du réflecteur de lumière ©ESPACIEL	32
Figure 15 : Principe du conduit de lumière, Stefan Kühn CC BY-SA 3.0	33
Figure 16 : Principe du puits de lumière appliqué selon trois variantes de Kristi 1999 [21].....	33
Figure 17 : Réflecteur de lumière © ESPACIEL.....	34
Figure 18 : Conduit de lumière, Mimi Kotte.....	34
Figure 19 : Puits de Lumière, Centre commercial Kamppi, Juha Pallasmaa, Helsinki, 2006 CC BY-SA 3.0.....	34
Figure 20 : Tablette réfléchissante InLighten® de © KAWNEER	34
Figure 21 : Étagère à lumière - Thurston Elementary School Mahlum Architects Inc. ©Lincoln Barbour (https://www.lincolnbarbour.com)	35
Figure 22 : Réflecteur de lumière ©ESPACIEL.....	35
Figure 23 : Intégration d'une fenêtre de toit (ou puits de lumière) dans une charpente bois ; [27].....	37
Figure 24 : Schémas de principe de redirection de la lumière des ophiures © Exploration architecture	38
Figure 25 : Photo d'ophiure CC0 Creative Commons Licences.....	38
Figure 26 : Biomimetic Office Building © Atelier Ten	38
Figure 27 : Lentilles de Fresnel.....	38
Figure 28 : Schéma du mode de fonctionnement en fonction du sens de rotation – svg-clipart.....	39
Figure 29 : Exemple de brasseur d'air en bois	39
Figure 30 : Illustrations de brasseur d'air design en bois, Wikimedia CC BY-SA 4.0	41
Figure 31 : Baleine à bosse - Pixabay Licence	42
Figure 32 : Éolienne bio-inspirée des tubercules © WhalePower	42
Figure 33 : Typologie des techniques de surventilation [40]	43
Figure 34 : Grilles de ventilation et de transfert d'air d'un logement basse consommation en Pin maritime, Taillan Médoc ©Christian Maintrot	48
Figure 35 : Fenêtres motorisées VELUX INTEGRA®	48
Figure 36 : Fenêtres à ventelles « Ecoglass Premium » de Kingspan®	48
Figure 37 : Capteurs à vent du bâtiment de logements collectifs BedZED, Tom Chance CC BY-SA 2.0	48
Figure 38 : Tours à vent du bâtiment bois Max Weber de l'Université Paris Ouest Nanterre La Défense @C. Bertolin	48
Figure 39 : Atrium équipé d'un système de verrière qui s'ouvre automatiquement © Philippe Ruault	48
Figure 40 : Intégration d'un conduit d'extraction d'air dans un plancher haut bois ; [27]	50
Figure 41 : Schéma de principe des termitières à cheminée, Pashugo, CC BY-SA 4.0	50
Figure 42 : Schéma du principe des termitières appliqué au bâtiment,	50
Figure 43 : Eastgate Building, Harare Estelle Cruz CC BY	51
Figure 44 : Architecture Vue de l'église Nianing, Dmbjoob CC BY-SA 4.0	51
Figure 45 : Coupe de l'église et principe de ventilation © In Situ.....	51

Figure 46 : Principe de fonctionnement d'un puits climatique Lisa-ghi CC BY-SA 4.0	52
Figure 47 : Raccordement au système de ventilation dans le cas d'un puits climatique hydraulique ; © Helios - kit SEWT .	52
Figure 48 : Arbre décisionnel pour le choix d'un système de puits climatique, d'après [47]	53
Figure 49 : Conductivité du sol pour différentes natures de sol en fonction de la teneur en eau [47]	54
Figure 50 : Plan en méandre du puits climatique ; Maison en Pin Maritime [50]	55
Figure 51 : Arrivée d'une conduite de puits canadien coulée dans la dalle béton du RDC; Maison en Pin Maritime [50].....	55
Figure 52 : Entrée d'air d'un puits climatique ; Maison en Pin Maritime [50]	55
Figure 53 : Vue extérieure Davis Alpine House, Daniel Case CC BY-SA 3.0	57
Figure 54 : Labyrinthe thermique en cours de construction © Atelier Ten	57
Figure 55 : Schémas de fonctionnement du labyrinthe thermique © Atelier Ten	57
Figure 56 : Intérieur de la serre, Gossipguy CC BY-SA 3.0	57
Figure 57 : Principe de fonctionnement de la ventilation naturelle	58
Figure 58 : Principe de fonctionnement d'une grille de ventilation avec ouverture hygroréglable d'après © Architecture et Climat - LOCI – UCL.....	60
Figure 59 : Tourelle de ventilation naturelle Windcatcher © Kingspan [62]	61
Figure 60 : Tourelle de ventilation traditionnelle Perse, Mahdikarimi70, CC BY-SA 4.0.....	61
Figure 61 : Grenouille CC-BY	63
Figure 62 : Principe de fonctionnement d'une VMC double flux avec récupération de chaleur (schéma inspiré de © Eco2travaux.fr).....	64
Figure 63 : Éléments d'une VMC double flux	65
Figure 64 : Différents types d'échangeurs statiques [71]	65
Figure 65 : Principe d'un échangeur rotatif [71]	65
Figure 66 : Pattes d'oiseau Pixabay Licence.....	68
Figure 67 : Système d'échange de chaleur à contre-courant chez les oiseaux © Wikimedia Commons	68
Figure 68 : Principe de la façade à double peau ventilée sur l'extérieur	69
Figure 69 : Différents types de ventilation de la lame d'air	70
Figure 70 : Université de Bordeaux - photo par NOBATEK/INEF4.....	70
Figure 71 : Différents types de façade à double peau, d'après [1]	70
Figure 72 : Principe de la façade respirante (d'après © CSTB)	71
Figure 73 : Gonflement du plumage d'un rouge-gorge permettant l'augmentation de l'isolation, Pixabay Licence.....	73
Figure 74 : Composition d'un vitrage électrochrome. SageGlass®	74
Figure 75 : Composition d'un vitrage thermochimique	75
Figure 76 : Exemple de variation des apports solaires entrants au cours de l'année avec un vitrage thermochrome ©KELIOS	75
Figure 77 : Sageglass © Saint Gobain.....	76
Figure 78 : Prel-Shade © PRELCO	76
Figure 79 : © SUNCOOL™ DYNAMIC.....	77
Figure 80 : Caméléon à l'enveloppe aux propriétés variables© Flickr	78
Figure 81 : Pavillon Breathing Skin cellules dégonflées © Tobias Becker	78
Figure 82 : Pavillon Breathing Skin cellules gonflées © Tobias Becker	78
Figure 83 : Pavillon Breathing Skin, vue intérieur © Tobias Becker.....	78
Figure 84 : Types de lames des brise-soleils	79
Figure 85 : Lames en forme de Z et de C vues en coupe.....	80
Figure 86 : Brise-soleils verticaux à lames horizontales coulissants DUCOSLIDE LUXFRAME ©Duco	80
Figure 87 : Mécanisme à lacette d'un brise-soleil © Franciaflex	81
Figure 88 : Détail du système à chaîne et pantographe d'un brise-soleil métallique – © Baumann Hüppe.....	81
Figure 89 : Brise-soleil avec lames en verre et cellules photovoltaïques © Wikimedia Commons	81
Figure 90 : MiniStore Immobilade – système de brise-soleil fixe à propriétés variables intégré au vitrage	81
Figure 91 : Captation de la lumière et photosynthèse, Licence CC0.....	82
Figure 92 : Régulation du flux lumineux par la pupille, Licence Creative Commons CC0	82
Figure 93 : les stomates sont des organes à la surface des plantes permettant la régulation des échanges gazeux en surface des feuilles. Licence CC0 Creative Commons.....	83
Figure 94 : Modules de façade Pho'liage en métal s'inspirant du système d'ouverture des plantes et matériaux biologiques réactifs © ArtBuild	83
Figure 95 : Fleur oiseau de Paradis, Licence CC0 Creative Commons	83
Figure 96 : Pavillon One Ocean avec les lamelles de façade fermées ©Kim Yong-kwan.....	83
Figure 97 : Pavillon One Ocean avec les lamelles de façade ouvertes ©Kim Yong-kwan.....	83
Figure 98 : Schéma toit rafraîchissant © Futura Maison	84

Figure 99 : Systèmes d'étanchéité Renolit sur le toit de logements sociaux collectifs tout bois à Montreuil © A003 Architectes 85

Figure 100 : Papillon morpho ©Wikipédia 88

Figure 101 : Pelage de zèbre Licence Pixabay Licence 88

Figure 102 : (1) Mur à plante grimpante 90

Figure 103 : (2) Mur à support de plantation, Bosco Verticale, Milan, Italie © wikimedia commons 90

Figure 104 : (3) Mur vert Kelly Rossiter CC BY 2.0..... 90

Figure 105 : (4) Toiture verte extensive © Creative Commons 90

Figure 106 : (5) Toiture semi-intensive 90

Figure 107 : (6) Toiture intensive 90

Figure 108 : (7) Pergola végétalisée 91

Figure 109 : (8) Arbre individuel © Public domains 91

Figure 110 : (9) Forêt urbaine © Pixabay 91

Figure 111 : Protection au rayonnement solaire et aux vents dominants offerte par les arbres environnants d'après [108]92

Figure 112 : Page illustrative du guide utilisateur de la résidence Baï Una et Baï Ona à Bayonne 99

Figure 113 : Plaquette du bâtiment LowCal situé à Pont de Barret : bureaux d'Enertech 99

Figure 114 - Suivi et affichage des consommations et températures via le système CALYBOX 2020 WT ©DELTA DORE.... 101

Figure 115 : Pommeau de douche intelligent Amphiro A1 102

Figure 116 : Exemple de « green nudge » intégré à la facturation énergétique des occupants..... 102

Figure 117 : Exemple de l'interface Darwin 103

Figure 118 : Power AWARE Cord [120] 104

Figure 119 : Power Lamp Static ! [120] 104

Figure 120 : Indicateurs réglementaires de la RT 2012 108

Figure 122 : Schéma des facteurs solaires 126

Figure 122 : Caisson de ventilation avant et après pose © Enertech 138

Figure 123 : Intérieur du bâtiment en briques de terre crue © Yves Charmont pour Enertech..... 139

Figure 124 : Puits provençal 144

Figure 125 : Brasseurs d'air du centre Viavino © Atelier Philippe Madec 144

Figure 126 : Fonctionnement de la VNAC en fonction des saisons..... 146

Figure 128 : Termitières Odontotermes Transvaalensis, vue de dessus. CC0 Creative Commons, Estelle Cruz..... 153

Figure 128 : Schéma de fonctionnement des termitières et section d'un étage de l'Eastgate (© Ove Arup)..... 154

Figure 129 : Enregistrement des variations de température au sein de l'Eastgate © Ove Arup..... 154

Figure 130 : Vue en coupe du bâtiment 160

Figure 131 : MOB à gauche et MAS à droite © Christian Maintrot 163

Figure 132 : Puits canadien 163

Figure 133 : Schéma du puits canadien et des capteurs de suivi installés..... 163

Figure 134 : Photos des volets de ventilation naturelle © Christian Maintrot 164

Figure 135 : Schéma de la surventilation nocturne © Christian Maintrot..... 164

Figure 136 : Casquettes solaires photovoltaïques 164

Figure 137 : Déformation d'une lame bimatériaux après un changement d'humidité relative de l'air ; [156] 170

I

CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE,
NORMATIF ET ASSURANTIEL

REVISED

REVISED

REVISED

REVISED

LABOR
TO
LIFE
INSURANTS

LIMITATION
OF ACTIONS
TO
MOBILE
HOMES

AND RIOTS
TO
MUNICIPAL,
SCHOOL,
STATE TORT

NAME
TO

La réalisation d'un bâtiment s'inscrit dans un contexte réglementaire, normatif et assurantiel que le concepteur doit maîtriser pour anticiper d'éventuels points de blocage, d'autant plus lorsqu'il s'agit d'une conception qui sort des pratiques conventionnelles.

L'objectif de ce guide est de présenter des solutions applicables pour la conception de bâtiment bois limitant l'usage des équipements techniques de chauffage, climatisation, ventilation et éclairage artificiel. Pour faciliter la prescription de ces solutions, parfois innovantes, il semble pertinent de préciser dans quelles mesures elles s'inscrivent dans ce contexte réglementaire, normatif et assurantiel.

La confusion entre réglementation et norme est fréquente. Il s'agit pourtant de documents qui ont des objectifs différents. Les normes sont élaborées de manière consensuelle et publiées en France par l'AFNOR (Association Française de Normalisation). Elles décrivent des protocoles pour la réalisation d'opérations (par exemple pour les essais, la fabrication d'un produit) ou encore les caractéristiques attendues pour un produit et les méthodes d'évaluation de celles-ci. Les normes permettent d'harmoniser les pratiques autour d'un langage commun. Elles sont pour la majorité d'application volontaire au contraire de la réglementation qu'il est obligatoire de respecter. Les réglementations qui se rapportent aux bâtiments visent à assurer que les ouvrages apportent des garanties suffisantes en ce qui concerne la sécurité des personnes, l'accessibilité ou encore la performance thermique. Afin de garantir la performance des bâtiments, la réglementation peut rendre certaines normes d'application obligatoires.

Les principales réglementations auxquelles les bâtiments doivent répondre sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Principales réglementations relatives aux bâtiments

REGLEMENTATION	DESCRIPTION
THERMIQUE RT 2012	La RT 2012 fixe pour les nouvelles constructions des objectifs relatifs au besoin bioclimatique, à la consommation d'énergie primaire et au confort thermique estival. Cette réglementation est amenée à évoluer à l'horizon 2021 pour devenir une Réglementation Environnementale, la future RE 2020 qui s'appuie sur les conclusions de l'expérimentation menée au travers du label E+/C-.
ENVIRONNEMENT RE 2020	La Réglementation Environnementale RE 2020 est en cours d'élaboration à la date de rédaction de ce guide. Son entrée en vigueur est prévue pour mi-2021. Cette réglementation est aujourd'hui préfigurée par le label E+/C-. La RE 2020 remplacera la RT 2012 en fixant des objectifs supplémentaires relatifs notamment aux émissions de gaz à effet de serre liées à l'ensemble de cycle de vie du bâtiment.
ACOUSTIQUE	Les bâtiments d'habitation, les établissements d'enseignement et de santé ainsi que les hôtels sont soumis à des exigences acoustiques réglementaires. Ces exigences visent à assurer un confort acoustique satisfaisant pour les usagers notamment en ce qui concerne les bruits aériens intérieurs et extérieurs, les bruits d'impact et les bruits provenant des équipements.
INCENDIE	Les principales exigences relatives à la sécurité incendie concernent la réaction au feu des matériaux, la stabilité structurelle en cas d'incendie ainsi que la propagation du feu en façade.
ACCESSIBILITE	Tous les bâtiments (habitation et établissements recevant du public (ERP), bâtiments tertiaires, etc.) sont soumis à des exigences réglementaires portant sur l'accessibilité des bâtiments aux personnes handicapées.
ECLAIRAGE	La réglementation impose des valeurs minimales d'éclairage pour les locaux affectés au travail. Des exigences portent également sur l'accessibilité à l'éclairage naturel.
VENTILATION DES LOCAUX	Des exigences réglementaires portent sur les débits de renouvellement d'air dans la majorité des bâtiments (logements, locaux d'enseignement, d'hébergement, professionnels, ...).
PARASISMIQUE	Les bâtiments sont soumis à une réglementation parasismique qui vise à prévenir les risques liés aux séismes. Les règles de construction parasismique dépendent de la catégorie d'importance du bâtiment et de la zone de sismicité dans laquelle il se trouve.
QUALITE DE L'AIR INTERIEUR	La surveillance de la qualité de l'air intérieur (QAI) est obligatoire dans certains établissements recevant un public sensible dont les écoles maternelles et élémentaires, les crèches, les centres de loisirs, les collèges et les lycées.

La réglementation va donc imposer diverses exigences qui vont directement impacter les équipements techniques du bâtiment.

Chauffage

D'après l'article R111-6 du code de la construction et de l'habitation, les équipements de chauffage du logement doivent permettre de maintenir à 18°C la température au centre des pièces du logement et doivent comporter des dispositifs de réglage automatique du chauffage qui permettent notamment à l'occupant d'obtenir une température inférieure à 18°C. La réglementation acoustique fixe également des exigences vis-à-vis des bruits générés par les systèmes de chauffage. La Réglementation Thermique (RT 2012) impose une limitation de la consommation énergétique des bâtiments. Les consommations d'énergie liées au système de chauffage sont prises en compte.

Ventilation

Pour les bâtiments d'habitation (individuels et collectifs), la ventilation générale et permanente est une obligation légale depuis 1969 pour les bâtiments construits à partir de cette date (arrêté du 22 octobre 1969). En plus de cette ventilation générale et permanente, l'arrêté du 28 octobre 1983 modifiant l'arrêté du 24 mars 1982 fixe des exigences de débits d'air extrait minimum et autorise la modulation des débits. À noter également que la réglementation acoustique fixe des exigences vis-à-vis de l'isolement acoustique en façade des entrées d'air et des niveaux de pression acoustique émis par le ventilateur et les bouches d'extractions. Pour les bâtiments tertiaires, trois textes réglementaires portent sur les débits minimums de ventilation :

- Le règlement sanitaire départemental type (pour les Établissements Recevant du Public - ERP) ;
- Le Code du travail (pour les locaux affectés à une activité salariée) ;
- La loi Evin (pour les locaux spécifiques fumeurs).

La Réglementation Thermique (RT 2012) impose une limitation de la consommation énergétique des bâtiments. Les consommations d'énergie liées au système de ventilation sont prises en compte.

Climatisation

La Réglementation Thermique (RT 2012) impose que la température la plus chaude atteinte dans les locaux, au cours d'une séquence de 5 jours très chauds d'été, n'excède pas un certain seuil. Dans le même temps, la RT 2012 impose une limitation de la consommation d'énergie. L'usage de la climatisation impacte le respect de ces deux exigences.

Aussi, depuis le 1^{er} juillet 2007, les articles R.241-30 et R.241-31 du code de l'énergie limitent l'utilisation des systèmes de climatisation. Dans les locaux dans lesquels est installé un système de climatisation, celui-ci ne doit être mis ou maintenu en fonctionnement que lorsque la température intérieure des locaux dépasse 26 °C.

Éclairage

La quantité d'éclairage naturel est peu contrainte par le cadre réglementaire. Pour les bâtiments tertiaires, le Code du travail indique dans l'article R. 4223-3 que « les locaux de travail doivent autant que possible disposer d'une lumière naturelle suffisante » et dans l'article R. 4213-2 que « les bâtiments sont conçus et disposés de telle sorte que la lumière naturelle puisse être utilisée pour l'éclairage des locaux destinés à être affectés au travail, sauf dans les cas où la nature technique des activités s'y oppose ».

Pour les bâtiments d'habitation, l'Arrêté de mars 1978, indique que « toutes les pièces principales des logements et les pièces isolées sont pourvues d'ouvertures donnant accès à l'air libre ». L'article R-111-10 du code de la construction et de l'habitation spécifie que « les pièces principales doivent être pourvues d'un ouvrant et de surfaces transparentes donnant sur l'extérieur ». La RT2012 quant à elle impose que les bâtiments à usage d'habitation aient une surface minimale de parois vitrées de 1/6, soit 17% de la surface habitable.

Que ce soit pour les bâtiments tertiaires ou d'habitation, il n'y a pas de niveau minimal d'éclairement naturel fixé. L'arrêté du 24 décembre 2015 fixe des valeurs minimales d'éclairement pour les parties communes des bâtiments d'habitation. Ces exigences doivent permettre d'assurer une qualité et une quantité d'éclairage satisfaisante des circulations communes intérieures et extérieures. L'article R4223-4 du Code du travail fixe des niveaux d'éclairement minimum à respecter par types de locaux.

L'éclairage artificiel des locaux permet alors de compenser un manque ou une absence de lumière naturelle aussi bien le jour que la nuit. La qualité de l'éclairage doit permettre à l'occupant de réaliser des tâches visuelles, d'apporter un confort visuel qui contribue à la sensation de bien-être et d'apporter une visibilité suffisante pour réduire les risques d'accident.

La Réglementation Thermique (RT 2012) impose une limitation de la consommation énergétique des bâtiments. Les consommations d'énergie liées à l'éclairage artificiel sont prises en compte.

Traditionnalité des procédés de construction

Les acteurs de la construction vont distinguer les procédés de construction du **domaine traditionnel** de ceux appartenant au **domaine non traditionnel**. Les procédés dits traditionnels sont couverts par des règles de l'art codifiées dans certains documents de référence. Il s'agit des NF DTU (Document Technique Unifié), des Recommandations Professionnelles RAGE et des Règles Professionnelles acceptées par la C2P (Figure 4). L'application de ces règles de l'art est volontaire, mais très souvent exigée dans les marchés de travaux. D'autres documents de référence (également présentés sur la Figure 4) sont relatifs à des procédés constructifs, mais leur statut ne permet pas de considérer ces procédés comme traditionnels.

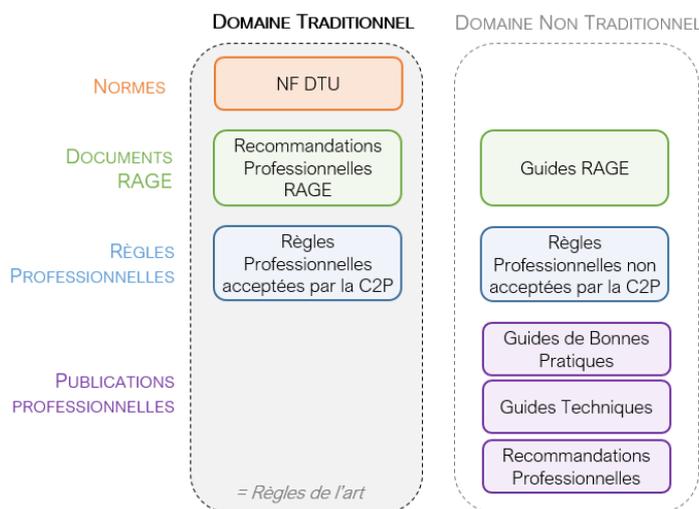
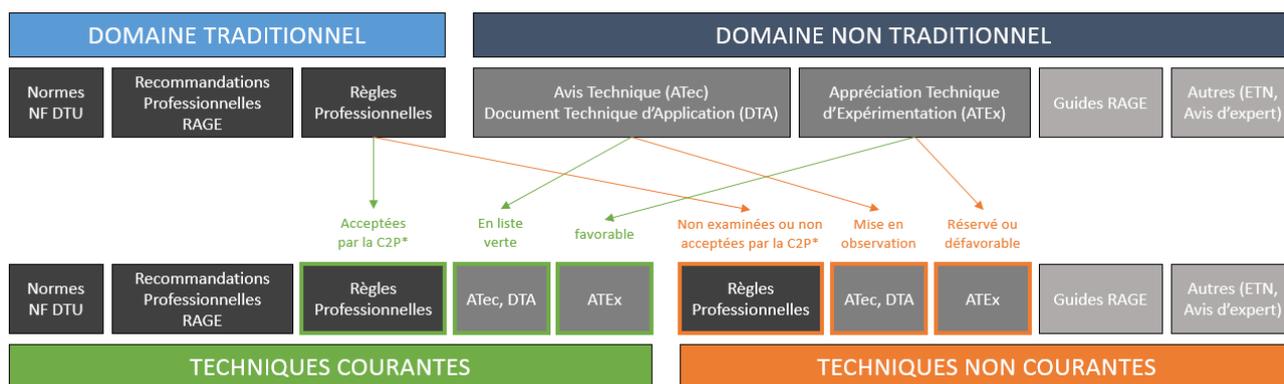


Figure 4 : Traditionnalité, Règles de l'art et documents de référence

Les procédés de construction dits traditionnels bénéficient d'un retour d'expérience conséquent et satisfaisant qui a permis la rédaction des règles de l'art correspondantes. Ces solutions constructives sont de facto considérées comme des **techniques courantes** par opposition aux **techniques non courantes**. Pour les procédés dits non traditionnels, les démarches volontaires **d'évaluation technique** que sont l'Avis Technique (ATec) et l'Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX) permettent à des groupes d'experts indépendants de formuler un avis sur la solution constructive proposée. Si le procédé non traditionnel fait l'objet d'une évaluation technique favorable alors il peut être considéré comme une technique courante (Figure 5).



*C2P : Commission Prévention Produits

Figure 5 : Domaines traditionnel/non traditionnel et techniques courantes/non courantes ; d'après qualiteconstruction.com

Une entreprise de construction est assurée pour les travaux qu'elle réalise. Elle apporte ainsi au maître d'ouvrage une **garantie décennale** qui couvre les dommages qui peuvent affecter la solidité de l'ouvrage et de ses équipements indissociables ou qui rendent la construction impropre à l'usage auquel elle est destinée. La distinction entre technique courante et non courante génère une différence au niveau de l'assurabilité des travaux. Si les travaux réalisés font appel à des procédés considérés comme techniques courantes, ils sont normalement couverts par l'assurance décennale souscrite par l'entreprise (sous réserve que le périmètre de celle-ci porte sur la catégorie de travaux réalisés). Dans le cas où les procédés utilisés sont considérés comme des techniques non courantes, l'assureur doit être averti et une surprime pourra être appliquée.

Les maîtres d'ouvrage et bureaux de contrôle accordent, eux aussi, de l'importance à la distinction entre technique courante et non courante. Les solutions constructives considérées comme non courantes sont généralement écartées des projets de construction puisqu'il est difficile d'apporter la preuve de leur fiabilité.

QUID LA TRADITIONALITE DES SOLUTIONS PRESENTEES DANS LE GUIDE ?

Les fiches présentées dans ce guide traitent la question de la traditionnalité des solutions et de leur impact sur le respect des exigences réglementaires. Il est ainsi précisé dans chaque fiche si les solutions sont considérées comme traditionnelles (et donc normalement assurables). Dans le cas contraire, il est indiqué si certains procédés font l'objet d'une évaluation technique (ATEX, ATec) qui facilite la prescription de la solution et son assurabilité. Pour chaque solution, il est également précisé le lien avec le respect des principales exigences réglementaires. Lorsque cela est pertinent, des références normatives sont également indiquées.

II

ENJEUX DE LA CONSTRUCTION BOIS



Chaque matériau a des spécificités qui lui sont propres. Celles-ci peuvent impacter les caractéristiques du bâtiment et donc ses performances, de manière positive comme négative. Il est alors primordial d'en tenir compte lors de la conception de l'ouvrage.

C'est notamment grâce à ses spécificités que le bois apparaît comme un matériau pertinent pour la conception de bâtiments limitant l'usage des équipements (chauffage, climatisation, ventilation mécanique, éclairage artificiel).

Ce chapitre dresse une liste des particularités du matériau bois pour la construction. Il est ainsi possible de croiser celles-ci avec les besoins des bâtiments de manière à mettre en avant l'intérêt du bois pour concevoir des ouvrages qui limitent l'usage des équipements. À noter que le caractère renouvelable du matériau bois et sa capacité à absorber du CO₂ dans l'atmosphère lors de sa croissance ne sont pas abordés ici. Il s'agit de caractéristiques qui en font un matériau privilégié pour répondre aux enjeux de réduction de l'empreinte environnementale du bâtiment. Toutefois, ces spécificités n'ont pas d'impact sur le recours aux équipements pour répondre aux besoins de l'ouvrage.

Spécificités liées à l'usage du matériau bois

Isolation intégrée dans l'épaisseur des parois

Certains systèmes constructifs bois permettent d'intégrer l'isolation thermique et acoustique dans l'épaisseur des parois et non en surépaisseur comme c'est par exemple le cas pour les parois pleines en béton ou en maçonnerie. Pour l'ossature bois, qu'elle soit porteuse ou non, l'isolation peut être positionnée entre les montants bois (Figure 6). C'est également le cas des structures à colombage qui peuvent recevoir un remplissage qui peut assurer totalement ou partiellement la fonction d'isolation thermique et acoustique. La construction à partir de panneaux bois lamellé croisé (CLT) ne présente pas cette spécificité. Puisqu'il s'agit de parois pleines, l'isolation est apportée en surépaisseur.

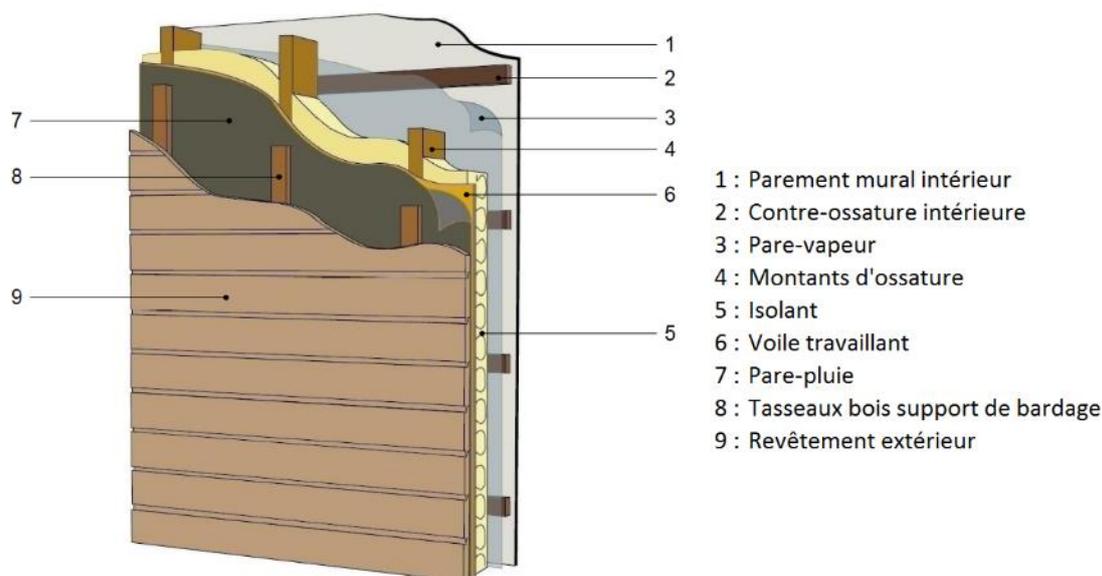


Figure 6 : Schéma de principe d'un mur à ossature bois ; catalogue-bois-construction.fr

Cette spécificité permet de réduire l'épaisseur des parois comparativement à d'autres systèmes constructifs. Il en résulte une augmentation de la surface utile du bâtiment. Pour une emprise au sol donnée, plus l'épaisseur des parois est faible moins leur emprise est importante. L'épaisseur réduite des parois offre également un meilleur accès à la lumière naturelle. Au niveau des ouvertures, moins les tableaux sont profonds plus la lumière naturelle pénètre à l'intérieur du bâtiment. L'épaisseur des parois joue également un rôle sur les apports solaires (apports de chaleur dus au rayonnement solaire) lorsque les menuiseries sont placées au nu intérieur. Plus l'épaisseur des murs sera faible plus les menuiseries seront exposées au rayonnement solaire et l'apport de chaleur à l'intérieur du bâtiment sera important. Enfin, l'intégration de l'isolant dans l'épaisseur de la paroi facilite la conception de parois dites perspirantes. Il s'agit de parois qui permettent une migration de la vapeur d'eau entre les ambiances intérieure et extérieure tout en étant parfaitement étanches à l'air. Les parois perspirantes sont ainsi réputées améliorer la régulation de l'humidité intérieure, paramètre qui joue un rôle prépondérant dans la sensation de confort.

Dans le cas des parois non pleines qui peuvent intégrer l'isolation dans l'épaisseur du système porteur, la gestion de l'étanchéité à l'air peut être plus complexe. Il est alors nécessaire de mettre en place un film pare-vapeur (élément 3 sur Figure 6) ou bien utiliser le voile travaillant comme barrière étanche à l'air (élément 6 sur Figure 6). Dans ce dernier cas, le voile travaillant est généralement placé côté intérieur. Les jonctions entre lés du pare-vapeur ou panneaux du voile travaillant doivent être soignées pour garantir l'étanchéité à l'air de la construction. Ces jonctions sont rendues étanches à l'air au moyen de ruban adhésif et d'un recouvrement suffisant entre lés pour le pare-vapeur.

Faible masse volumique

La structure d'un bâtiment faisant appel au matériau bois présente une masse plus faible comparativement aux structures béton et maçonneries. Le matériau bois est un matériau léger. Par exemple, un bâtiment en bois de 100 m² au sol et de 2 étages pèse environ 70 tonnes contre 200 tonnes pour un bâtiment de mêmes dimensions réalisé avec des matériaux traditionnels [1].

Cette faible masse va présenter un avantage lorsqu'il s'agit de construire sur des sols peu porteurs. Le système de fondation sera moins imposant et donc moins coûteux. L'isolation acoustique des parois qui présentent une masse surfacique faible est généralement moins performante. Il est alors nécessaire de mettre en œuvre des solutions permettant l'amélioration de cette performance acoustique (doublage des revêtements intérieurs, chape béton sur plancher léger ...).

Comparativement à d'autres systèmes constructifs, les structures bois apportent au bâtiment une inertie thermique réduite. Cette faible inertie thermique est due à la faible masse de bois mise en œuvre. L'inertie thermique d'une construction est sa capacité à stocker et à restituer des quantités importantes d'énergie dans la structure. Cette spécificité peut être un inconvénient en ce qui concerne le confort estival puisque le bâtiment peut très vite monter en température sous l'effet du rayonnement solaire et de la température extérieure. Associées à un climat estival chaud, les constructions bois exigent une conception soignée sous peine de générer surchauffes et inconfort thermique important. Si l'inertie thermique apportée par la structure d'un bâtiment est faible, la conception du bâtiment doit proposer des solutions permettant d'assurer le confort du bâtiment. La faible inertie peut également être un avantage lors des longues périodes caniculaires. Une forte inertie pose un problème de confort dès lors que le bâtiment est « chargé » en chaleur et que les nuits plus fraîches ne suffisent plus à le refroidir. Les bâtiments bois à faible inertie ne stockent pas de chaleur dans leur structure et pourront être plus aisément ventilés et rafraîchis. Une faible inertie peut également être un avantage pour les bâtiments à usage intermittent puisque ceux-ci pourront très vite monter en température lors de la mise en route du système de chauffage.

Recours à la préfabrication

La construction bois, filière sèche qui exploite un matériau léger offre un fort potentiel pour la préfabrication qui consiste à réaliser tout ou partie de la construction en usine, avant le montage sur site. La préfabrication permet ainsi la réalisation de parois (2D) ou bien d'éléments 3D.

Les avantages de la préfabrication sont multiples :

- Organisation efficace des différentes phases du projet : en mettant par exemple à profit le temps de préfabrication pour le terrassement ou la mise en place des fondations, en intégrant durant la préfabrication les réseaux, les isolants et éventuellement les menuiseries et revêtements intérieurs, en réduisant les déplacements, etc. ;
- Maîtrise de la qualité des ouvrages : la préfabrication des éléments permet d'éviter de nombreux travaux et modifications non contrôlés sur chantier et de travailler en atelier à l'abri des intempéries ;
- Rapidité de mise en œuvre : la préfabrication des éléments et la mise en œuvre de macro-éléments réduisent considérablement le temps de chantier. Les risques climatiques sont donc plus limités et le coût financier du projet diminue par la réduction du temps d'immobilisation des capitaux (le bâtiment entre en service plus rapidement) ;
- Diminution des nuisances sur chantier : en réduisant le bruit, les déchets et les interventions sur site.

Ces qualités ont notamment été démontrées lors des différentes éditions d'une compétition étudiante internationale, le Solar Decathlon¹, visant à construire et mettre en service un prototype de maison à énergie positive en à peine 10 jours. De nombreux projets, comme la maison Napevomo [2,3] (Figure 7), ont choisi le bois en tant que système constructif, d'une part pour ses avantages environnementaux et d'autre part pour ses facultés à être préfabriqué, transporté et mis en œuvre

¹ Créé en 2002 par le département d'État américain de l'énergie solaire, le Solar Decathlon est une compétition universitaire internationale. Des universités et grandes écoles du monde entier sont réunies autour d'un défi, celui de concevoir et réaliser un habitat à l'échelle 1:1 fonctionnel et utilisant le soleil comme seule source d'énergie.
<http://www.solardecathlon.gov>

rapidement en conservant une finition de qualité [4–7]. Plusieurs niveaux de préfabrication des solutions bois ont alors pu être recensés au cours des trois éditions européennes du concours tels que des parois 2D à assembler et des modules 3D pré-équipés [8].



©Julien Bodennec



© Gonzalo Rodriguez

Figure 7 : Montage et vue Sud-Est de la maison Napevomo au Solar Decathlon 2010, Espagne

Matériau hygroscopique

Le bois est un matériau hygroscopique, c'est-à-dire qu'il présente la particularité d'absorber une certaine quantité de l'humidité de l'air à son contact. Les matériaux hygroscopiques ligneux tels que le bois peuvent être sujets au développement de moisissures lorsque leur teneur en eau devient trop importante et que l'humidité y stagne. Néanmoins, lorsque l'humidité de l'air diminue, le matériau hygroscopique libère l'humidité précédemment absorbée. Un état d'équilibre s'établit après un certain temps entre l'humidité relative de l'air et la teneur en eau du matériau. Il est ainsi possible de tirer profit de cette particularité du matériau bois lorsque celui-ci est en contact de l'ambiance intérieure (revêtement intérieur). Dans ce cas, il peut participer à l'amélioration du confort en absorbant une partie de l'humidité de l'air qui peut être source d'inconfort et en libérant cette eau sous forme de vapeur lorsque l'air intérieur s'assèche.

LIENS ENTRE SPECIFICITE DU BOIS ET BESOINS DU BATIMENT

Le Tableau 4 présente une matrice croisant les spécificités des bâtiments bois à leurs besoins en équipement. Cette matrice permet d'identifier les interactions entre spécificités et besoins tout en mettant en avant les problématiques et enjeux associés. Elle présente la manière dont les spécificités des bâtiments bois peuvent jouer un rôle dans la limitation des besoins en équipement.

Tableau 4 : Matrice spécificités / besoins

<i>Spécificités / Besoins</i>	CHAUFFAGE	VENTILATION	CLIMATISATION	ECLAIRAGE
<i>ISOLATION INTEGREE DANS L'ÉPAISSEUR DES PAROIS</i>	Possibilité d'intégrer une forte épaisseur d'isolant pour réduire les besoins de chauffage	-	Possibilité d'intégrer une forte épaisseur d'isolant pour réduire les besoins de refroidissement	Amélioration de l'accès à l'éclairage naturel par la diminution de l'épaisseur des parois
<i>FAIBLE MASSE VOLUMIQUE</i>	Atteinte de la consigne de température rapide lors de la remise en chauffe du bâtiment et inversement lors de l'arrêt du chauffage	Évacuation rapide de la chaleur accumulée la journée par la ventilation nocturne du bâtiment	Atteinte de la consigne de température rapide lors de la climatisation du bâtiment et inversement lors de l'arrêt de la climatisation	-
<i>RECOURS A LA PREFABRICATION</i>	Facilité d'intégration du système de chauffage dans les parois	Facilité d'intégration du système de ventilation dans les parois	Facilité d'intégration du système de climatisation dans les parois	Possibilité de gérer des détails plus complexes pour l'intégration des menuiseries
<i>HYGROSCOPICITE</i>	Possibilité de réguler l'humidité de l'air intérieur pour augmenter la sensation de confort et réduire la consigne de température	Possibilité de réduire l'humidité de l'air intérieur et donc limiter les débits d'extraction	-	-

III

MÉTHODES DE CONCEPTION :
BIOCLIMATISME, FRUGALITÉ
ET BIOMIMÉTISME



Ce guide présente plusieurs solutions qui permettent de **limiter l'usage des équipements** de chauffage, climatisation, ventilation mécanique et éclairage artificiel. À elles seules ces solutions ne permettent pas de supprimer totalement l'usage des équipements. Une étape primordiale est de **réduire préalablement les besoins du bâtiment** en chauffage, refroidissement, renouvellement d'air et éclairage via la **conception bioclimatique**. Des solutions peuvent ensuite être sélectionnées pour assurer les besoins résiduels du bâtiment.

Couplée à la conception bioclimatique, une **recherche de frugalité** visera, en complément de la réduction des besoins du bâtiment, à en limiter l'impact environnemental.

Lorsque l'on parle de frugalité, il paraît pertinent de se tourner vers le monde du vivant, qui offre une multitude de fonctions et stratégies exemplaires. La sélection naturelle a amené les espèces vivantes, telles que végétaux ou animaux, à tirer le meilleur de leur environnement qui parfois offre peu de ressources. Le vivant, c'est 3,8 milliards d'années d'innovation. C'est pour cette raison que ce guide s'ouvre au concept de **biomimétisme** et en présente plusieurs exemples.

LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE

La conception bioclimatique consiste à adapter l'architecture d'un projet selon les caractéristiques et particularités du site d'implantation en tirant bénéfice des avantages qu'il peut offrir tout en se prémunissant des contraintes et inconvénients qu'il comporte. Il s'agit de travailler sur l'efficacité du bâti pour améliorer le fonctionnement passif du bâtiment tout en atteignant un confort d'ambiance satisfaisant pour les occupants. C'est ensuite que se pose la question des systèmes à utiliser pour répondre aux besoins résiduels du bâtiment.

Une conception bioclimatique peut aller jusqu'à la réalisation d'un bâtiment passif qui ne nécessite aucun système actif pour son fonctionnement (ou presque aucun système, car l'éclairage artificiel et un système de production d'ECS sont toujours nécessaires). Sans aller jusqu'à concevoir un bâtiment passif, l'efficacité du bâti permet tout de même de fortement limiter le nombre d'heures de fonctionnement des équipements ou de réduire la puissance installée et donc les consommations énergétiques et impacts environnementaux associés.

La démarche de conception bioclimatique se compose des principes développés dans les paragraphes suivants. À ceux-là sont parfois ajoutés des principes relatifs au choix des matériaux et aux solutions permettant de répondre aux besoins résiduels du bâtiment qui font le lien avec la notion de frugalité (voir paragraphe suivant).

Les objectifs de confort et d'implication des usagers

En premier lieu, pour assurer la réussite d'un projet de conception ou de réhabilitation, les objectifs à atteindre doivent être définis. Les exigences de bien-être des usagers qui comprennent le confort thermique et hygrométrique, le confort visuel, l'acoustique et la qualité de l'air doivent être explicitées en tenant compte de multiples facteurs d'ambiance (température, humidité, vitesse de l'air, etc.), de données psychologiques et culturelles. Au-delà de la définition des critères de confort et de bien-être, le rôle de l'utilisateur doit également être pleinement intégré depuis la définition de ses exigences jusqu'à celle de son rôle passif ou actif dans l'usage du bâtiment. L'implication de l'utilisateur dans la gestion et l'utilisation du bâtiment doit être considérée comme élément majeur de l'adaptation du bâtiment à son environnement et également comme garantie de l'atteinte des performances visées. Plusieurs stratégies d'implication des usagers peuvent être mises en œuvre et sont définies dans le chapitre 5.

L'analyse du site

La base d'une conception bioclimatique consiste à examiner le site qui accueille le projet et à assurer l'adéquation entre le lieu, la forme architecturale et les matériaux. Ainsi, les conditions climatiques (microclimat et macroclimat) doivent être analysées afin de déterminer les expositions au rayonnement solaire et aux vents dominants, les évolutions de température du sol et de l'atmosphère, l'humidité, les masques solaires de l'environnement proche, etc.

La forme architecturale

Outre le fait que la forme doit être conçue pour répondre aux fonctionnalités requises par les usagers celle-ci sera déterminante sur les performances thermiques du bâtiment. Elle doit tenir compte de l'ambiance thermique recherchée dans les différentes zones qui composent le bâtiment, tirer parti des caractéristiques du site, être optimisée selon les principes intrinsèques à la thermique de l'enveloppe et servir de support à des systèmes spécifiques tels que des systèmes double-peau ou des brise-soleil fixes ou orientables.

En premier lieu, la forme architecturale doit être conçue à partir des caractéristiques morphologiques et climatiques du site. L'optimisation énergétique passe alors par la gestion des apports solaires et des apports internes. Selon les conditions climatiques et la saison, il s'agit de capter ou de se protéger de la chaleur pouvant provenir de l'énergie solaire (Figure 8) et

de celle apportée par les activités intérieures des usagers. Les points à travailler sont alors la compacité, la forme du bâtiment, son orientation, l'orientation des façades et des ouvertures, l'organisation des espaces intérieurs, la surface et le type de baies vitrées, la protection contre le vent, les systèmes de protection solaires, l'emploi d'autres systèmes de captage solaire, etc.

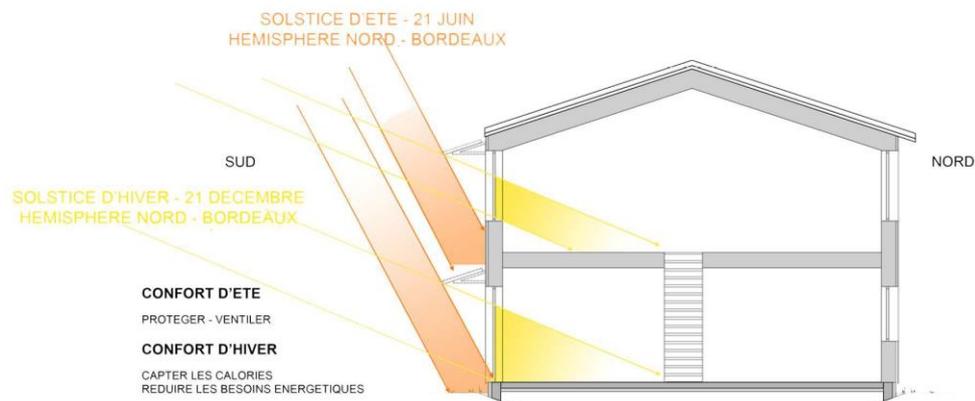


Figure 8 : Casquette dimensionnée pour capter le rayonnement solaire en hiver et s'en protéger en été ©Christian Maintrot

CONSTRUCTION BOIS ET BIOCLIMATISME

Le recours au bois est particulièrement intéressant lorsqu'il s'agit d'appliquer les principes du bioclimatisme.

Enveloppe faiblement déperditive : l'ossature bois est une technique constructive qui permet d'intégrer l'isolant thermique au sein du système porteur formé par des montants espacés généralement de 600mm. La possibilité de mettre en œuvre de fortes épaisseurs d'isolant tout en limitant l'épaisseur de la paroi permet de concevoir une enveloppe faiblement déperditive limitant ainsi les besoins de chauffage et de refroidissement du bâtiment.

Faible inertie thermique : Les systèmes constructifs présentent une inertie faible comparativement aux structures en béton ou maçonnées. Il est ainsi possible d'ajuster le niveau d'inertie en fonction de la nature du bâtiment (logement, bureau) et de son occupation. Pour un bâtiment de bureaux par exemple, l'inertie thermique sera intéressante puisque pendant les journées chaudes elle aura tendance à décaler dans le temps la montée en température du local. La température limite de confort est ainsi dépassée plus tard et de préférence après la période d'occupation. Dans ce cas il sera possible d'ajouter de la masse à la structure bois, par exemple avec une chape béton sur le plancher. En revanche, une faible inertie sera préférable pour une chambre où il faudra pouvoir décharger rapidement la chaleur dès que la température extérieure diminue en fin de journée.

Matériau léger et facile à travailler : Le bois est également largement utilisé pour la fabrication de plusieurs éléments permettant le contrôle des apports solaires : casquettes, volets, brise-soleil. Il s'agit d'un matériau léger et facile à travailler qui est apprécié pour la réalisation de ces éléments.

Lorsque les principes précédemment cités sont appliqués, la part des énergies pour atteindre les objectifs thermiques est alors minimisée, voire même annulée. Les solutions sont alors conçues en termes d'appoint énergétique et peuvent faire l'objet d'une recherche de frugalité.

RECHERCHE DE FRUGALITE

La conception bioclimatique d'un bâtiment tend à réduire les besoins de l'ouvrage lors de son utilisation. Convenablement appliqué, ce concept peut amener à un bâtiment dit passif, c'est-à-dire un bâtiment dont les besoins sont faibles, voire quasiment nuls. L'objectif d'une telle conception est alors évident : limiter au strict minimum l'énergie consommée par le bâtiment pendant sa vie en œuvre.

Ce type de conception laisse de côté les étapes de vie du bâtiment que sont sa construction et sa déconstruction qui elles aussi amènent une consommation d'énergie importante, notamment au travers de l'énergie grise². Pour un bâtiment dont la consommation énergétique est faible à l'usage, la part de l'énergie grise devient d'autant plus importante puisqu'elle peut représenter une part prépondérante de l'énergie totale consommée par le bâtiment sur tout son cycle de vie (Figure 9). La notion de bâtiment passif ne tient également pas compte de l'énergie consommée pour produire l'ECS, pour les usages domestiques, la ventilation ... D'ailleurs la consommation d'énergie ne doit pas être le seul indicateur observé.

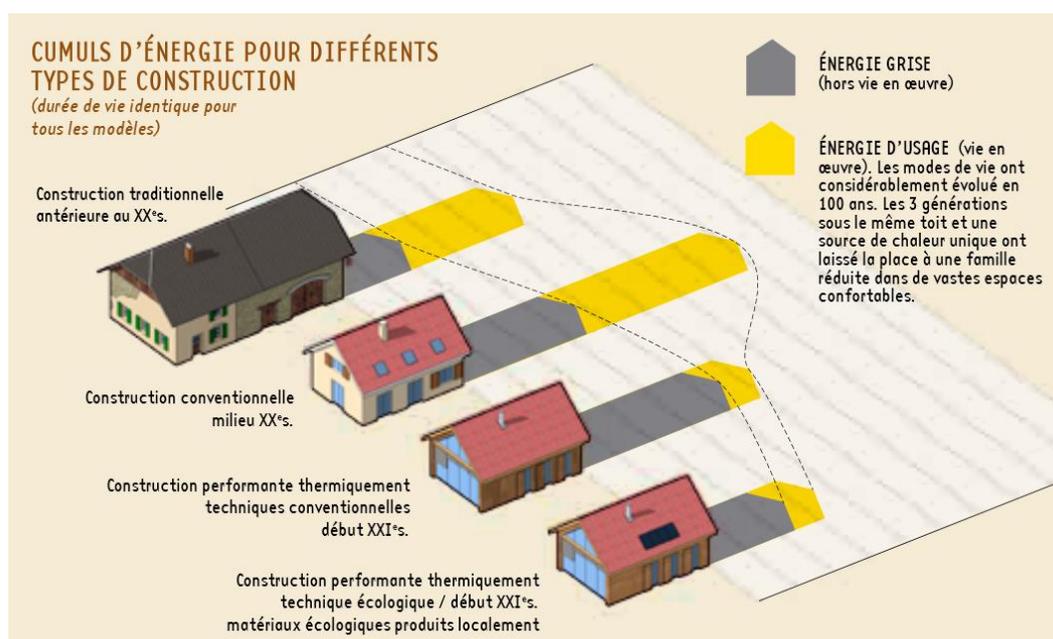


Figure 9 : L'importance de considérer l'énergie grise ; Source [9]

L'impact environnemental d'un ouvrage s'étudie de manière plus large que du seul point de vue de l'énergie consommée sur tout son cycle de vie. Plusieurs indicateurs permettent d'évaluer l'impact d'un ouvrage. Dans la norme NF EN 15978 relative à l'évaluation de la performance environnementale des bâtiments, ils sont classés en quatre catégories : impacts environnementaux (réchauffement climatique, appauvrissement de la couche d'ozone ...), utilisation de ressources (matières et énergie primaire renouvelables/non renouvelables, eau, ...), déchets et flux sortants (par exemple composants destinés à la réutilisation ou au recyclage). Ces indicateurs sont évalués sur l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage « du berceau à la tombe ». On parle alors d'Analyse en Cycle de Vie (ACV).

C'est davantage la notion de bâtiment frugal qui semble définir le mieux la vision d'une conception pertinente comme défendue dans ce guide. La définition d'un bâtiment frugal généralement admise est la suivante : il s'agit d'un ouvrage conçu de manière à réduire au strict minimum ses besoins (notion de conception bioclimatique) et à assurer les besoins résiduels en limitant les consommations énergétiques tout en maîtrisant l'impact environnemental de l'ouvrage sur tout son cycle de vie. La notion de frugalité n'est pas contradictoire avec celle de confort. Un bâtiment frugal se doit d'apporter à l'utilisateur un confort (hygrothermique, visuel, acoustique ...) satisfaisant. Enfin, la frugalité défend l'implication de l'utilisateur à l'inverse de la vision techniciste qui voudrait que les systèmes prennent la main sur la gestion du bâtiment.

Les solutions présentées dans ce guide visent à alimenter la conception d'un bâtiment frugal. Elles permettent de limiter l'usage des équipements et leurs consommations énergétiques. Ces solutions ont également été sélectionnées, car elles

² L'énergie « grise » d'un bâtiment est l'énergie nécessaire à l'extraction des matières premières et leur transformation (transport compris) pour obtenir les matériaux nécessaires à la construction de l'ouvrage. L'énergie « grise » inclut également l'énergie consommée pour traiter les déchets produits par le bâtiment en fin de vie.

nécessitent peu d'entretien, sont faciles à réparer et peu coûteuses au regard des bénéfices apportés. Elles pourraient plus simplement être qualifiées de Low-Tech.

CONSTRUCTION BOIS ET FRUGALITE

Utiliser le bois pour la construction présente plusieurs avantages lorsqu'il s'agit de concevoir un bâtiment frugal.

Matériaux renouvelables : Le bois issu d'une forêt gérée durablement est considéré comme renouvelable. Ainsi, l'utilisation du bois pour la construction ne participe que de façon très limitée à l'épuisement des ressources naturelles (il faut tout de même un peu de carburant pour la machine qui va récolter le bois en forêt et d'énergie pour la machine qui va le transformer en matériau de construction).

Matériau léger : Les bâtiments à structure bois sont plus légers que leur équivalent en béton ou en maçonnerie. Utiliser le bois permet ainsi de réduire le transport de matériaux lourds qui est source d'émissions de GES. Un bâtiment plus léger nécessite également des fondations moins imposantes et donc moins gourmandes en matière.

Préfabrication : Un bâtiment frugal consomme peu d'énergie, peu de matière et également produit peu de déchets. La construction bois fait largement appel à la préfabrication. Celle-ci limite fortement la production de déchets. Les découpes de matériaux sont optimisées, les erreurs moins nombreuses et les matériaux subissent moins de dommage qui nécessite de les remplacer. De plus, les déchets produits sont plus facilement triés en usine que sur chantier facilitant ainsi leur recyclage. Sur sa plateforme OPTIGEDE (<https://www.optigede.ademe.fr/>), l'ADEME présente la préfabrication comme un levier de prévention des déchets.

REFERENCES UTILISEES POUR LA REDACTION DE CE CHAPITRE : [10][11] [12]

HABITAT ET BIOMIMÉTISME

La nature offre de nombreuses sources d'inspirations frugales. Chaque fiche solution souligne des exemples basés sur le biomimétisme afin de donner au lecteur de nouvelles pistes d'exploration et de développement. Ces transferts technologiques bio-inspirés sont les premiers pas de cette démarche d'innovation responsable et durable.

Le biomimétisme est une philosophie et approche conceptuelle interdisciplinaire prenant pour modèle la nature afin de relever les défis du développement durable (social, environnemental et économique) [13].

Appliqué à l'architecture, l'objectif du biomimétisme est de réintégrer l'habitat au sein des écosystèmes existants en s'inspirant du fonctionnement du vivant. L'ensemble des espèces contribue au maintien de l'écosystème dans lequel elles se trouvent (équilibre du cycle de l'eau, du carbone, des nutriments, etc.) par leur alimentation, reproduction, mode d'habitat, etc. L'objectif est donc la conception de bâtiments qui permettent le maintien et la restauration des écosystèmes existants en harmonie avec le vivant. Par exemple, ce type d'habitat bio-inspiré doit s'intégrer dans les cycles géochimiques de l'eau et du carbone, être support de biodiversité (stockage du carbone, pollinisation, etc.), ou contribuer à l'enrichissement et maintien des sols. [14].

Le biomimétisme étant une approche récente et actuellement en développement, nous recensons peu de solutions matures et largement commercialisées dans le secteur du bâtiment. La plupart des solutions existantes sont implémentées dans le cadre d'opérations emblématiques de bâtiments tertiaires ou publics (bureaux, musées, etc.) ou dans le cadre de recherches académiques. Dans ce guide, deux types d'intégration du biomimétisme seront présentés :

- Des innovations de rupture correspondant au développement de nouveaux systèmes de façade ou d'équipement qui ont nécessité des phases de R&D approfondies (cf. 7. Opérations exemplaires HygroSkin et CIRC) ;
- Des innovations incrémentales qui améliorent des systèmes existants développés en architecture bioclimatique ou frugale (cf. 7. Opérations exemplaires Eastgate Building et Davies Alpine House).

Outils, méthodes et processus

Il existe deux processus principaux en biomimétisme à ce jour homologués par la norme ISO TC 18458 [13] :

- *Poussée biologique* = processus de développement biomimétique dans lequel les connaissances acquises grâce à la recherche fondamentale dans le domaine de la biologie servent de point de départ et sont appliquées au développement de nouveaux produits techniques. Le projet *Façade One Ocean* présenté dans la partie « 6. Focus biomimétisme » correspond à cette démarche de *poussée biologique*. Les connaissances acquises sur les mécanismes d'ouverture et fermeture des plantes ont permis d'imaginer une adaptation en façade.
- *Attrait technologique* = processus de développement biomimétique dans lequel un produit technique fonctionnel existant est pourvu de fonctions nouvelles ou améliorées grâce au transfert et à l'application de principes biologiques. Les projets Biomimetic Office Building ; Eglise Nianing et Davies Alpine House présentés dans la partie « 6. Focus biomimétisme » correspondent à cette approche. Les équipes de conception ont dans un premier temps formulé un cahier des charges (lumière naturelle, ventilation passive) avant de chercher des exemples biologiques (termitières).

Il existe une grande diversité d'outils et de méthodes d'intégration du biomimétisme. À ce jour, il existe plus de 50 outils avec différents degrés de maturité et d'accessibilité tous secteurs d'application confondus. Dans le secteur de l'habitat, les principaux outils développés sont les suivants :

- Outils d'évaluation de la réintégration des bâtiments dans les écosystèmes existants. Par exemple, le bâtiment doit contribuer à la bonne santé des écosystèmes proches de celui-ci (contribution au stockage du carbone, à l'accueil de la biodiversité, à la purification de l'eau, etc). Les travaux les plus avancés à ce jour sont synthétisés dans le cadre de l'action de recherche européenne du COST RESTORE [15].
- Outils de conception suivant les fonctions recherchées au sein du bâtiment (chauffage, ventilation, gestion de l'énergie, optimisation structurelle, confort acoustique, etc.). Les outils existants actuels permettent d'identifier des fonctions et propriétés similaires dans le vivant puis de les abstraire pour répondre à un problème technologique. Il s'agit par exemple des outils KARIM et BioGen [16,17].

Concepts clés de biologie appliqués à la construction

La **“gestion de l’énergie” dans le vivant** : la principale source d’énergie utilisée dans le vivant est l’énergie solaire. Tout organisme sur Terre consomme de l’énergie qu’elle soit sous forme primaire (apport solaire direct) ou secondaire (matière organique consommée par la digestion, décomposition ou dégradation). Les stratégies observées dans le vivant ont globalement tendance à privilégier l’échange d’informations et la structuration de la matière à toutes les échelles plutôt que l’utilisation d’énergie (cf. Figure 10 comparative de l’utilisation des ressources dans le vivant : à gauche la répartition de l’utilisation des ressources par les sociétés humaines, à droite l’utilisation des ressources disponibles dans le vivant, J. Vincent, 2006). Par analogie, la construction doit maximiser les échanges d’informations et la structuration de la matière (matériaux, agencement des systèmes constructifs) et ainsi réduire l’apport énergétique [18].

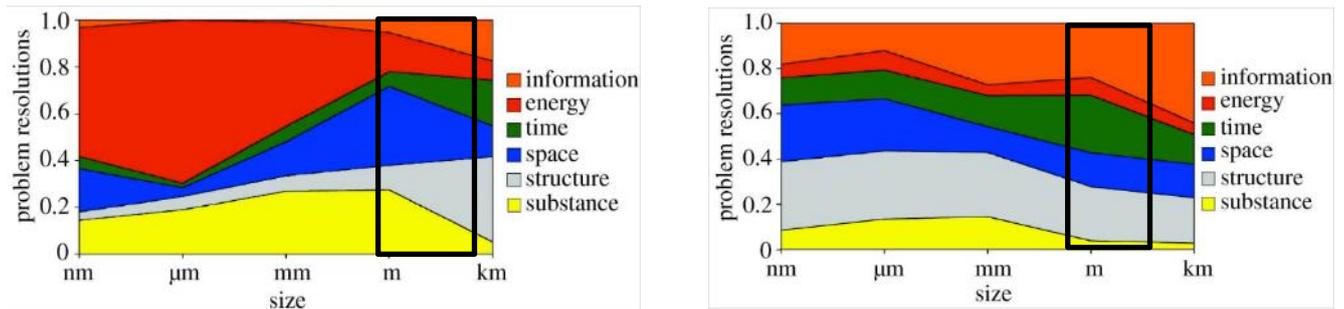


Figure 10 : Stratégies de résolution d’un problème observées dans le vivant et dans les systèmes humains suivant les échelles de tailles © Julian Vincent [18]. À droite les stratégies du vivant suivant les échelles de tailles, à gauche les stratégies humaines. À l’échelle du bâtiment (rectangle noir), les sociétés humaines maximisent l’apport d’énergie, d’espace et matériaux quand le vivant maximise l’échange d’information et minimise l’utilisation d’énergie et matériaux.

Le **“sans équipement” dans le vivant** : Un équipement dans le vivant et dans le cas de cette étude, peut être défini comme un système interne de régulation de la température (système de chauffage ou climatisation), du renouvellement d’air (système de ventilation), de gestion de la luminosité (porosité de l’enveloppe), etc. Le « fonctionnement » de ces systèmes requiert une consommation d’énergie que doit fournir l’organisme. Elle est plus ou moins importante suivant les organismes : les organismes considérés comme les plus “énergivores” dans le règne du vivant sont les animaux dits “à sang chaud” tels que les mammifères et oiseaux devant maintenir constante leur température corporelle quelles que soient les variations de l’environnement. À l’inverse, les organismes considérés comme les moins “consommateurs d’énergie” sont les animaux dits “à sang froid” tels que les reptiles et insectes dont la température corporelle varie suivant les variations de température de l’environnement (Figure 10). Quel que soit le “système énergétique” de l’organisme, ses besoins énergétiques sont adaptés aux ressources disponibles du milieu dans lequel il évolue.

Ces régulations sont effectuées soit par les « équipements centralisés » tels que poumons, branchies pour les échanges gazeux ; cœur pour la régulation thermique des mammifères, soit par des « équipements décentralisés » tels que la peau des batraciens ou les exosquelettes des insectes qui permettent les échanges gazeux et la respiration. Dans la suite de cette étude seront présentées différentes stratégies du vivant permettant de répondre aux problématiques de régulation thermique, ventilation, régulation lumineuse dans le bâtiment bois. Quelles que soient les stratégies biologiques, les « équipements » sont toujours existants en étant centralisés ou décentralisés et avec une consommation énergétique variée.

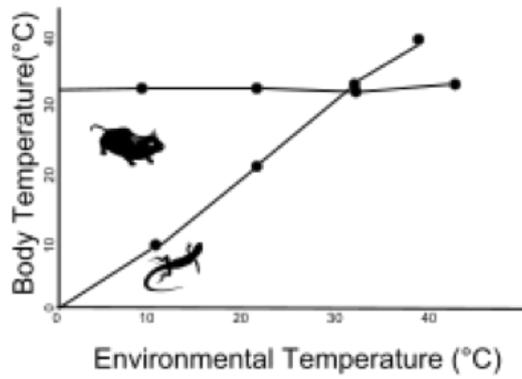


Figure 11 : Variation de température du corps de l'organisme suivant la variation de température du milieu ©Wikimedia Commons

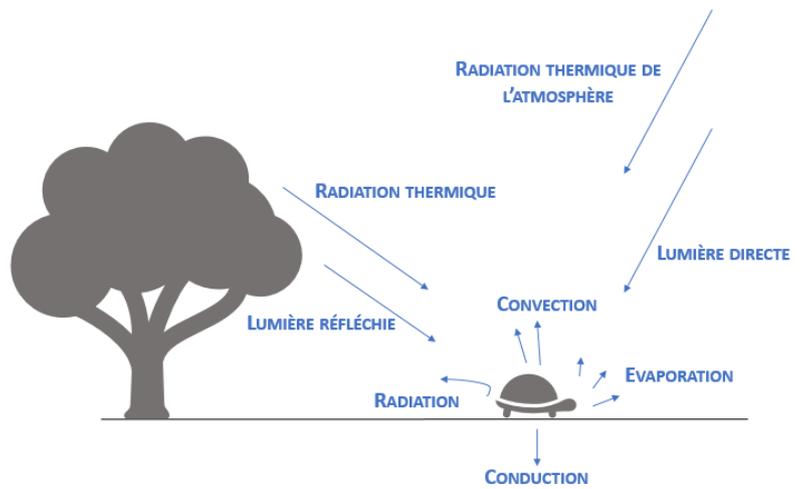


Figure 12 : Différents facteurs environnementaux auxquels est soumis l'organisme.

IV

SOLUTIONS
ARCHITECTURALES
ET TECHNIQUES



Ce chapitre présente 11 solutions pour les bâtiments bois qui visent à limiter l'usage des équipements nécessaires pour satisfaire les besoins en chauffage, refroidissement, ventilation et éclairage artificiel. Chacune de ces solutions fait l'objet d'une fiche descriptive :

- Système d'éclairage naturel indirect ;
- Brasseur d'air ;
- Surventilation ou free-cooling ;
- Puits climatique ;
- Ventilation naturelle et hybride ;
- VMC double flux avec récupération de chaleur ;
- Façade double peau ;
- Vitrage à propriétés variables ;
- Brise-soleil orientable (BSO) ;
- Toit rafraichissant ;
- Végétalisation du bâtiment et de ses abords.

Afin de répondre aux objectifs du guide et proposer des solutions pertinentes, celles-ci ont été sélectionnées au regard des critères présentés dans le [Tableau 5](#).

Tableau 5 : Critères de sélection des solutions présentées dans le guide

LIMITER L'USAGE DES EQUIPEMENTS	Les solutions ne doivent pas seulement réduire les consommations d'énergie en améliorant la performance d'une solution (par exemple une pompe à chaleur avec un COP élevé). Elles doivent limiter les besoins du bâtiment ou bien assurer un besoin sans consommer d'énergie (par exemple la ventilation naturelle).
RETOUR D'EXPERIENCE	A minima une démonstration est nécessaire pour prouver la faisabilité technique des solutions.
SYSTEMES ACTIFS / PASSIFS	Les solutions peuvent être actives, mais la consommation d'énergie doit être réduite et ne pas servir à la production de chaud ou de froid.
HIGH-TECH / LOW-TECH	Les solutions peuvent faire appel à des matériaux high-tech à condition qu'elles restent low-tech dans l'usage (par exemple les vitrages à propriétés variables).
NECESSITE D'ENTRETIEN	Les solutions ne doivent pas nécessiter un entretien trop fréquent et/ou complexe.
MATURITE	Le niveau de maturité des solutions doit être suffisant pour qu'elles soient applicables sans contrainte particulière.
COMPATIBILITE AVEC LE CONTEXTE FRANÇAIS	Les solutions doivent être compatibles avec le contexte réglementaire et climatique français.

Les solutions retenues ne permettent pas à elles seules de concevoir un bâtiment qui limite au strict minimum l'usage des équipements. Leur usage doit être lié à une démarche de conception bioclimatique et frugale du bâtiment comme présenté au chapitre 3 Méthodes de conception : Bioclimatisme, Frugalité et Biomimétisme.

SYSTEME D'ÉCLAIRAGE NATUREL INDIRECT

Le système d'éclairage naturel indirect permet de limiter le recours à l'éclairage artificiel en diffusant à l'intérieur du bâtiment les rayons lumineux dans des zones où l'accès à l'éclairage naturel direct est insuffisant ou inadapté. Cette captation de la lumière est réalisée au moyen de différentes techniques qui font appel à des surfaces réfléchissantes qui peuvent être regroupées en quatre catégories [19,20] :

Étagère à lumière (ou light-shelf) : Cette solution consiste à placer en partie haute des surfaces vitrées une surface réfléchissante horizontale (généralement au 2/3 de la hauteur). L'étagère à lumière reçoit le rayonnement lumineux qu'elle réfléchit à l'intérieur du bâtiment vers le plafond. Ce dispositif permet de profiter de la lumière naturelle tout en se préservant d'un rayonnement direct qui peut être source d'éblouissement. La partie basse de la surface vitrée peut être occultée par un store. La surface réfléchissante peut être placée à l'extérieur ou à l'intérieur du bâtiment. Placée à l'extérieur, l'étagère à lumière peut également jouer le rôle de protection solaire fixe en période estivale.

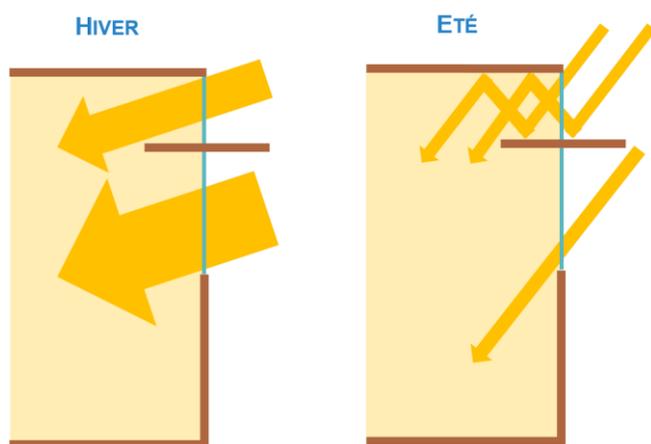


Figure 13 : Principe de l'étagère à lumière - d'après © Architecture et Climat – Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI) – Université catholique de Louvain (Belgique)

Réflecteur de lumière : Cette solution se compose d'une surface réfléchissante placée à l'extérieur, en partie basse des surfaces vitrées. La surface réfléchissante reçoit un rayonnement lumineux qui est alors réceptionné puis redirigé vers l'intérieur du bâtiment via la surface vitrée.

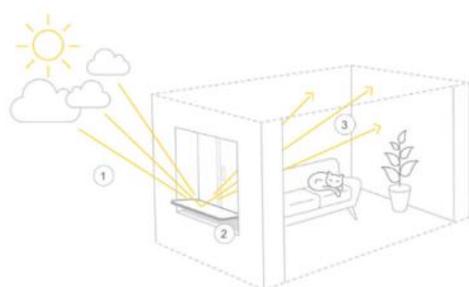


Figure 14 : Principe du réflecteur de lumière ©ESPACIEL



CARACTERISTIQUES

Etagère à lumière*

Coût

€€

Impact Carbone

ccc

Mise en œuvre



Entretien



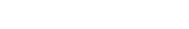
Adaptabilité



Performance



Durabilité



Intégration Architecturale



*voir le détail de toutes les solutions en fin de fiche

LES (+)

- L'installation de réflecteurs, étagères à lumière et conduits ne nécessite pas de modification importante sur les bâtiments existants.
- Apport et amélioration de la qualité de lumière du jour et réduction des besoins d'éclairages artificiels et donc de consommation d'énergie.
- Réduction des besoins de refroidissement en limitant les apports solaires directs et les apports internes tout en maintenant les apports lumineux.

LES (-)

- L'intégration architecturale de ces dispositifs est contraignante. Dans le cas du système des étagères à lumière, la hauteur entre sol et plafond doit être suffisante.
- La maintenance est très importante pour garantir l'efficacité des systèmes : les surfaces réfléchissantes doivent être nettoyées régulièrement.
- Une conception favorisant l'accès à l'éclairage naturel direct sera toujours préférable en termes d'apport lumineux.
- La gestion thermique des puits de lumière est importante pour éviter des surchauffes par l'excès d'apports

Conduit de lumière : Ce dispositif permet de transporter et distribuer la lumière naturelle dans les zones du bâtiment où l'éclairage est insuffisant (pièces sans surfaces vitrées ou zone éloignée d'une surface vitrée) tout en minimisant la perte de lumière. Le conduit de lumière se compose de trois éléments fonctionnels : (1) un conduit, rigide ou flexible, dont la surface intérieure est réfléchissante. (2) Un collecteur de lumière est placé en toiture ou en façade du bâtiment. Le conduit réfléchit le rayonnement lumineux jusqu'à (3) un diffuseur généralement disposé au niveau du plafond de la zone à éclairer.

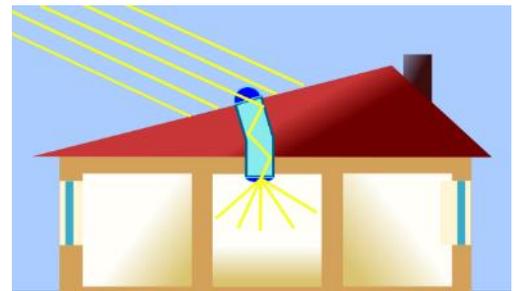


Figure 15 : Principe du conduit de lumière, Stefan Kühn [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

Puits de lumière : Ce système couramment employé permet de diffuser la lumière naturelle captée en toiture ou en façade en la faisant transiter au travers de différentes pièces pour la répandre jusqu'à des zones aveugles qui n'ont pas d'accès direct à la lumière du jour. Il s'appuie sur une sélection et un agencement de matériaux et de surfaces favorisant le transport et la réflexion de la lumière jusqu'à l'espace souhaité. À la différence du conduit de lumière, le puits de lumière est bien plus volumineux et ne possède pas de « gouttière » réfléchissante. Son flux lumineux est nettement plus important et concentré. Les atriums sont des puits de lumière de très grande dimension.

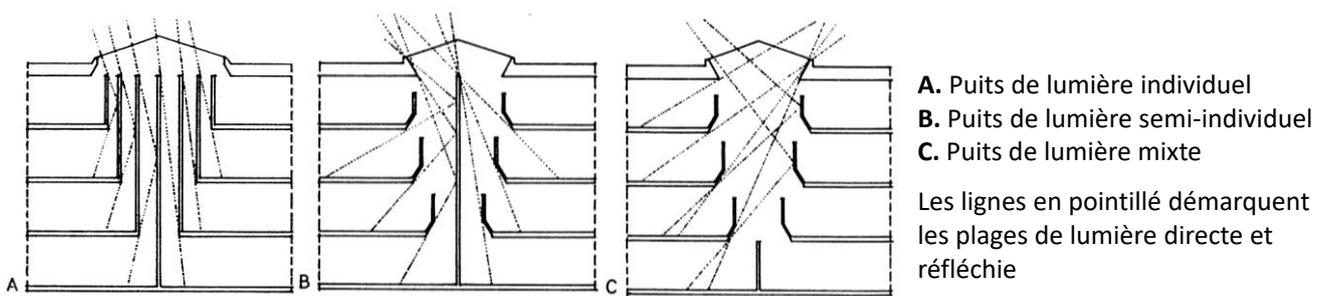


Figure 16 : Principe du puits de lumière appliqué selon trois variantes de Kristi 1999 [21]

Domaine d'emploi

L'ETAGERE A LUMIERE	Solution plutôt destinée aux bureaux où elle permet de profiter de la lumière naturelle en écartant les risques d'éblouissement. Elle s'installe plus favorablement sur les façades sud où le rayonnement du soleil peut être capté par la surface réfléchissante tout au long de la journée.
REFLECTEUR DE LUMIERE	S'installe généralement sur les bâtiments d'habitation, notamment en partie basse des bâtiments où la lumière naturelle peut être difficilement accessible.
CONDUIT DE LUMIERE	Destiné à tout type de bâtiment.
PUITS DE LUMIERE	Se retrouve généralement dans les cages d'escalier et autres zones de circulations de bâtiments tertiaires et collectifs et plus rarement dans des bâtiments d'habitation individuels bien qu'il existe des solutions adaptées.

Caractéristiques et données techniques

Paramètres de conception

La performance des étagères, réflecteurs, puits et conduits de lumière dépend en grande partie du pouvoir réfléchissant des matériaux utilisés et donc de leur facteur de réflexion. Il est défini comme le rapport entre le flux lumineux réfléchi et le flux lumineux incident et s'exprime généralement sous la forme d'un pourcentage. Ce coefficient est étroitement lié à la couleur et rugosité des matériaux. La réflectivité totale d'un réflecteur de lumière de type Espaciel en revêtement céramique lisse est de 99% et sa réflectivité spéculaire est de 93% [19].

Un conduit de lumière peut facilement atteindre une longueur de 15 mètres [20]. Le pouvoir réfléchissant de la surface interne du conduit est d'autant plus important que la longueur sur laquelle doit être acheminée la lumière est grande. Par exemple, l'aluminium anodisé de qualité optique est un matériau permettant par exemple de réfléchir plus de 95 % de la lumière incidente et pouvant être utilisé pour réaliser des conduits de plusieurs mètres en minimisant les pertes par absorption [22]. En effet, après 6 réflexions sur un miroir présentant un facteur de réflexion de 80% la quantité de lumière à l'arrivée n'est plus que de 26% contre 74% avec un aluminium anodisé de qualité optique. Ainsi un conduit de lumière d'un diamètre de 25cm peut se substituer la journée à l'utilisation d'un néon pour éclairer une surface de 10m² et un conduit de 60 cm peut apporter la même lumière que 3 néons à un espace de 60m² [23].

Dans le cas des puits de lumière la conception architecturale a un rôle majeur au niveau de l'agencement des espaces et des surfaces servant à la transmission et à la réflexion de la lumière du jour et fait appel à des produits de construction traditionnels. Ils doivent être correctement dimensionnés pour atteindre un compromis entre les apports lumineux qu'il procure et le maintien d'un confort thermique estival en évitant des surchauffes estivales. De même, les étagères à lumière et réflecteurs demandent une certaine attention quant au choix de revêtements et de l'inclinaison des plafonds puisqu'ils jouent un rôle de distributeur de la lumière vers l'intérieur. Les revêtements des murs et des plafonds utiles à la diffusion de la lumière du jour doivent ainsi être aussi clairs que possible pour bien redistribuer la lumière naturelle.

Plus une couleur est claire, plus son coefficient de réflexion est important (Tableau 6). Le coefficient de réflexion d'un matériau bois varie selon l'essence et la finition. Ainsi un bois clair, de type Bouleau et Érable possède un coefficient de réflexion élevé (55 à 65%), proche d'une peinture blanche (70 à 80%) et supérieur à celui d'un revêtement en béton (40 à 50%). Par ailleurs, en réduisant la rugosité on augmente la réflectivité. En effet, plus une surface est rugueuse, plus la réflexion sur celle-ci est diffuse. Par exemple, le verre généralement utilisé pour les miroirs, a une surface bien plus lisse et uniforme que le métal même lorsqu'il est poli. La rugosité se mesure en microns et atteint presque 0 micron pour un miroir contre 0,5 micron pour une surface polie. Un chêne verni clair permet ainsi d'obtenir un coefficient de réflexion allant jusqu'à 50%.



Figure 17 : Réflecteur de lumière © ESPACIEL

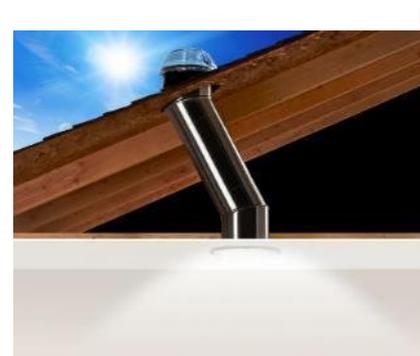


Figure 18 : Conduit de lumière, Mimi Kotte



Figure 19 : Puits de Lumière, Centre commercial Kamppi, Juha Pallasmaa, Helsinki, 2006 [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)



Figure 20 : Tablette réfléchissante InLighten® de © KAWNEER

Tableau 6 : Coefficients de réflexion de quelques matériaux (source [24] sauf mention contraire)

PEINTURES ET MATERIAUX DE CONSTRUCTION	COEFFICIENT DE REFLEXION	BOIS	COEFFICIENT DE REFLEXION	AUTRES MATERIAUX REFLECHISSANTS	COEFFICIENT DE REFLEXION
Peinture, plâtre, crépis blanc	0,70 à 0,80	Bouleau clair, Érable	0,55 à 0,65	Aluminium poli	0,6 à 0,75
Crépis blanc usagé	0,3 à 0,6	Chêne vernis clair	0,4 à 0,5	Aluminium anodisé de qualité optique [22]	> 0,95
Noir	0,04	Chêne vernis foncé	0,15 à 0,40	Email blanc	0,65 à 0,75
Béton neuf	0,4 à 0,5	Acajou, Noyer	0,15 à 0,40	Aluminium, revêtement argent et protection céramique anti-rayure Espaciel [19]	0,93 à 0,99

Les paramètres de conception de l'étagère à lumière dépendent majoritairement de la géométrie et de la disposition de la pièce. En dehors des matériaux et de la surface des étagères, il est possible de faire varier les paramètres suivants [25] pour lesquels il s'agit de trouver un compromis entre la quantité de lumière naturelle apportée et les risques d'éblouissement :

- La position : Plus l'étagère sera haute, moins il y aura de risque d'éblouissement. Plus elle sera basse plus il y aura de lumière réfléchie vers le plafond.
- La profondeur : Plus la profondeur sera importante plus l'éblouissement sera limité, mais cela diminue également la pénétration de la lumière naturelle. Il doit être 1,25 à 1,5 fois la hauteur de la fenêtre à claire-voie pour les façades orientées au sud et 1,5 à 2 fois la hauteur de claire-voie pour les angles d'azimut de façade supérieurs à 20 et inférieurs à 160 [25].
- L'inclinaison : Il est également possible de faire varier l'inclinaison de l'étagère. Orientée vers l'extérieur il y aura moins d'apports lumineux et d'éblouissement alors qu'orienté vers l'intérieur il y aura un apport lumineux plus important.

Les réflecteurs de lumière donnent de meilleurs résultats lorsqu'ils sont installés sur des façades orientées sud. Les réflecteurs de lumière sont généralement placés au-dessus du niveau des yeux afin d'éviter l'éblouissement. Cependant, au collège la Vanoise à Modane, en France, les appuis de fenêtre sud sont utilisés comme des étagères de lumière spéculaire ayant une inclinaison vers le sud afin éviter l'éblouissement. En raison de cette inclinaison, le réflecteur présente une sélectivité saisonnière à la lumière du soleil réfléchi.

Paramètres de régulation

Les réflecteurs et les étagères à lumière peuvent être conçus de manière à être inclinables, permettant ainsi de limiter l'éblouissement ou d'augmenter l'éclairage naturel selon les besoins. L'inclinaison de ces systèmes peut alors être conçue pour être réglée manuellement par les utilisateurs ou automatiquement avec un système de gestion du bâtiment selon un programme défini.



Figure 21 : Étagère à lumière -
Thurston Elementary School

Mahlum Architects Inc.

©Lincoln Barbour

(<https://www.lincolnbarbour.com>)



Figure 22 : Réflecteur de lumière
©ESPACIEL

CARACTERISTIQUES DES SOLUTIONS

<i>Réflecteurs de lumière</i>			
<i>Coût</i>	<i>Impact Carbone</i>	<i>Mise en œuvre</i>	<i>Entretien</i>
€	cc		
<i>Adaptabilité</i>	<i>Performance</i>	<i>Durabilité</i>	<i>Intégration Architecturale</i>

<i>Conduits de lumière</i>			
<i>Coût</i>	<i>Impact Carbone</i>	<i>Mise en œuvre</i>	<i>Entretien</i>
€€€	ccc		
<i>Adaptabilité</i>	<i>Performance</i>	<i>Durabilité</i>	<i>Intégration Architecturale</i>

<i>Puits de lumière</i>			
<i>Coût</i>	<i>Impact Carbone</i>	<i>Mise en œuvre</i>	<i>Entretien</i>
€€€	c		
<i>Adaptabilité</i>	<i>Performance</i>	<i>Durabilité</i>	<i>Intégration Architecturale</i>

OFFRE INDUSTRIELLE

État de l'offre

Les conduits de lumière ont été mis au point à la fin des années 80 et sont communément commercialisés. Ce type de produit est fourni par des marques comme ©VELUX, ©FAKRO, ©SOLARSPOT et ©Lightway.

L'entreprise ©ESPACIEL créée en 2013 fournit une grande gamme de réflecteurs de lumière.

©ESPACIEL propose également un système d'étagère à lumière. D'autres entreprises comme ©H&H METALS (BRIGHTSHELF®) et ©KAWNEER fabriquent également ces produits.

Données économiques

Les réflecteurs proposés par ESPACIEL sont vendus aux alentours de 200 € TTC l'unité.

Le coût d'un conduit de lumière avec conduit flexible est d'environ 300 € HT (donnée BATIPRIX).

NORMES & REGLEMENTATION

Normes

Les réflecteurs et puits de lumière ne font pas l'objet d'une norme produit. Ils ne sont donc pas soumis à l'obligation de marquage CE.

Traditionnalité

Les solutions d'éclairage indirect ne font l'objet d'aucun NF DTU, Recommandations Professionnelles RAGE et Règles Professionnelles. Il s'agit donc d'un procédé du domaine non traditionnel.

L'entreprise ©SOLARSPOT dispose d'un Avis Technique (ATec) pour un procédé de conduit de lumière naturelle (puits de lumière). Cette solution est donc considérée comme une technique courante.

Réglementation

Les solutions d'éclairage indirect peuvent participer au respect des exigences réglementaires concernant les valeurs minimales d'éclairement pour les locaux affectés au travail (article R4223-4 du Code du Travail).

INTEGRATION AUX OUVRAGES BOIS

Les réflecteurs et puits de lumière ne présentent pas de difficulté particulière vis-à-vis de leur intégration aux ouvrages bois. À noter que la couche réfléchissante d'un miroir reflète les ultraviolets, et que la couche de verre qui recouvre le miroir peut en bloquer une partie seulement. Ainsi lorsque la lumière est réfléchie sur un support les conséquences possibles de décoloration du support due à la lumière naturelle seront vraisemblablement les mêmes que toutes surfaces intérieures en contact direct avec le rayonnement solaire non réfléchi. Il s'agit donc de concevoir l'espace intérieur en tenant compte des surfaces sur lesquelles sera réfléchi le rayonnement solaire. Dans le cas de revêtements bois, en raison de la sensibilité du bois aux rayons UV, il peut s'assombrir dans un premier temps avant de se dépigmenter dans un second temps. Les bois exotiques (Merbau, Iroko, Wengé) ont une grande sensibilité aux UV et réagissent rapidement. Le Hêtre étuvé se dépigmente dès le début de l'exposition à la lumière. Enfin, l'Érable a tendance à jaunir. Ce phénomène naturel doit alors être considéré lors de la conception architecturale. Pour les applications intérieures (vieillessement sec), il existe des produits absorbeurs UV qui permettent de protéger le bois en offrant une photostabilisation relativement faible [26].

L'intégration des puits de lumière est facilitée dans les charpentes et planchers bois (intégration entre fermettes, chevrons, pannes et solives) pour lesquels il n'y a pas d'incidence sur la structure. Il faut toutefois veiller à garantir la continuité de l'étanchéité à l'air comme présenté sur la Figure 23. L'intégration d'un puits de lumière se traite de façon similaire à celle d'une fenêtre de toit en ce qui concerne l'étanchéité à l'air.

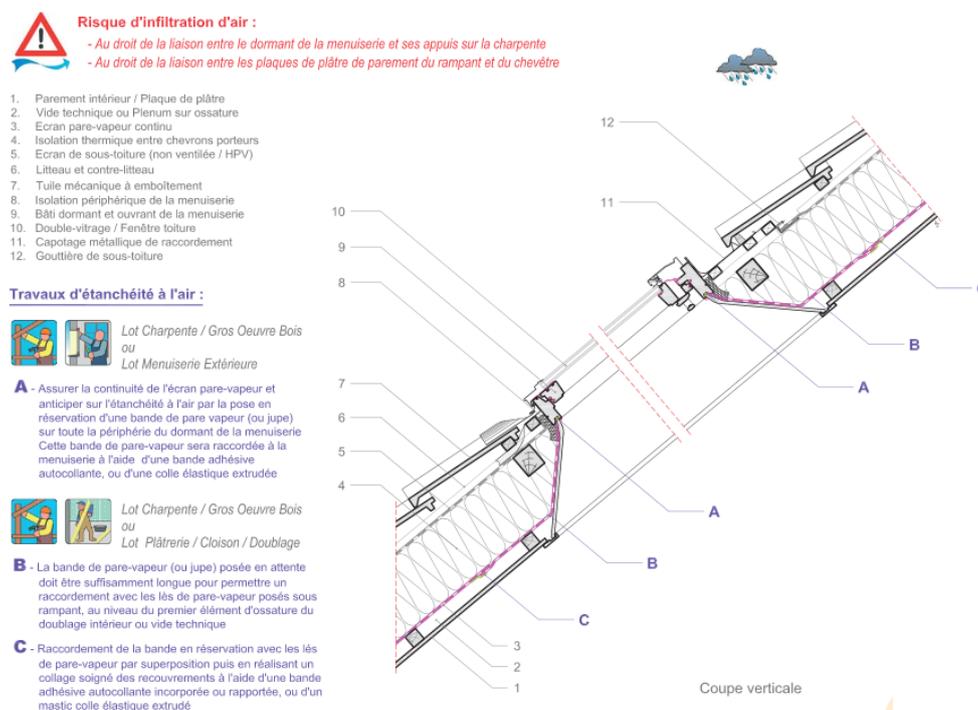


Figure 23 : Intégration d'une fenêtre de toit (ou puits de lumière) dans une charpente bois ; [27]



FOCUS BIOMIMÉTISME [28]

La lumière est essentielle, quels que soient les règnes du vivant. Elle permet la création de la couleur suivant l'interaction entre le flux lumineux et la surface éclairée, la photosynthèse ou encore la vision de jour et de nuit. Les organismes vivants dans des zones sombres ont développé de nombreuses adaptations afin de capter le peu de lumière disponible dans leur milieu.

Par exemple, certaines étoiles de mer (les ophiures) sont recouvertes de cristaux de calcite qui agissent comme des lentilles et font converger le flux lumineux de sorte que tout le corps de l'animal perçoive la lumière (Figure 24 et Figure 25). Certaines plantes des forêts tropicales ne reçoivent pas de lumière directe et ont développé des lentilles optiques faisant converger la lumière diffuse en un point donné. Ces systèmes biologiques ont la particularité d'être fabriqués dans des conditions de température et pression ambiantes.

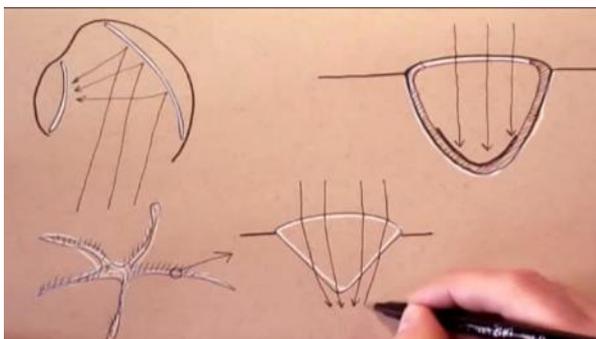


Figure 24 : Schémas de principe de redirection de la lumière des ophiures © Exploration architecture



Figure 25 : Photo d'ophiure [CCO Creatives Commons Licences](#)

Ces principes ont été mis en œuvre dans le cadre de la conception du Biomimetic Office Building par le chercheur Julian Vincent et agence d'architecture Exploration à Londres. Dans le cadre de ce projet à l'état de concept depuis 2013, les équipes ont proposé d'installer des lentilles de verre courbe en toiture pour concentrer la lumière diffuse dans des tubes à fibres optiques, de sorte que la lumière diurne soit conduite au sein du bâtiment vers les endroits où elle est nécessaire. Ainsi, ce système bio-inspiré propose une distribution et conduite de la lumière comme alternative aux éclairages artificiels fréquemment utilisés dans les bâtiments publics. (Figure 26)



Figure 26 : Biomimetic Office Building © Atelier Ten



Figure 27 : Lentilles de Fresnel

L'adaptation de ce concept à la construction bois est possible grâce au recours à un système de lentilles de Fresnel en toiture permettant de capter la lumière diffuse en toiture (Figure 27), et pouvant ensuite être redirigée par des systèmes de fibres optiques. Plus performant qu'un puits de lumière avec entrée plate, ce système de lentilles existe sous deux marques, présentes en France : le suédois Parans et le français Echy. Dans les deux cas, un module de lentilles de Fresnel à l'extérieur capte et concentre la lumière naturelle.

REFERENCES DE LA FICHE : [19,20,30,21–26,28,29]

BRASSEUR D'AIR

Le **brasseur d'air fixé au plafond** permet de limiter le recours à la climatisation en diminuant la température ressentie en été via des mouvements d'air.

Il permet également de limiter le recours au chauffage en homogénéisant la température au sein d'une pièce. Dans les bâtiments de grande hauteur, l'air chaud va naturellement se concentrer en partie supérieure. Moins dense que l'air froid, l'air chaud monte alors que l'air froid stagne au sol. Ce phénomène est appelé « stratification thermique ». Pour contrer cela, le brasseur d'air, aussi appelé destratificateur d'air, grâce à la rotation de ses pales, crée un mouvement d'air qui homogénéise à la fois la température et l'humidité de l'air dans la pièce. Certains modèles permettent d'inverser le sens de rotation des pales et de faire ainsi descendre plus efficacement l'air chaud en hiver afin d'obtenir une meilleure répartition dans la pièce.

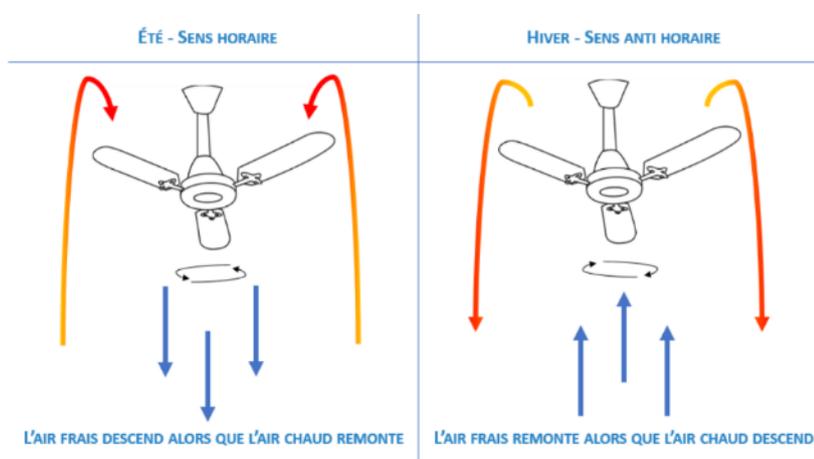


Figure 28 : Schéma du mode de fonctionnement en fonction du sens de rotation – [svg-clipart](#)

Domaine d'emploi

La solution convient aux bâtiments d'habitation ainsi qu'aux petites pièces de type bureaux. Elle peut être également mise en œuvre dans de grands espaces (hangars, garages, entrepôts ...) en adaptant la longueur des pales.



Figure 29 : Exemple de brasseur d'air en bois



CARACTÉRISTIQUES

Coût

€

Mise en œuvre



Adaptabilité



Durabilité



Impact Carbone

CC

Entretien



Performance



Intégration

Architecturale



LES (+)

- Le brasseur d'air est un système de très faible technicité qui améliore efficacement le confort estival et hivernal.
- La consommation d'un brasseur d'air est très faible.
- Pas ou peu d'entretien requis.
- Le brasseur d'air s'adapte facilement à tous types de bâtiments.
- Peut constituer un élément original de la décoration d'une pièce.

LES (-)

- Certains brasseurs d'air peuvent être bruyants à grande vitesse. Leur nuisance sonore peut atteindre jusqu'à 40 dB (niveau sonore d'un bureau tranquille). Ces nuisances sonores dépendent de la conception du système et peuvent être évitées.
- La fixation du brasseur d'air peut s'avérer délicate en fonction de la composition du plafond.

Caractéristiques et données techniques

Paramètres de régulation

Le brasseur d'air permet généralement de moduler la vitesse de déplacement d'air selon les besoins. Plus la vitesse de l'air est élevée, plus les déperditions de chaleur sont grandes ce qui diminue la température ressentie. En effet, l'air en mouvement accélère les échanges thermiques par convection au niveau de la peau. À titre d'exemple, une vitesse d'air de 1 m/s équivaut à un refroidissement ressenti de l'ordre de -4°C [10].

Paramètres de conception

À pleine puissance, un brasseur d'air de bureaux ou logements consomme entre 50 et 75 W et génère une vitesse de déplacement d'air d'environ 1 m/s. À puissance minimale, il consomme entre 20 et 30 W [31].

Les grands brasseurs d'air de type industriel de diamètre de plus de 160 cm (adaptés pour les fermes, hangars, entrepôts) peuvent obtenir une vitesse d'air très élevée de 1,7 m/s pour une consommation de 70 W [32].

Les produits disponibles sur le marché offrent un débit d'air allant de 100 à 150 m³ / min. Le nombre de pales varie entre 3 et 6 en fonction des modèles.

Le brasseur d'air pèse entre 3 et 12kg [33]. Le diamètre du brasseur d'air doit être choisi en fonction de la taille de la pièce. Plus la pièce est grande, plus les pales du brasseur d'air devront être longues. Le choix d'un brasseur d'air en fonction de la pièce se fait suivant 3 étapes : choix de l'amplitude du brasseur d'air, du type de fixation et de la tige d'extension (cf. Tableau 7). La taille des pales varie ainsi entre 73 cm pour une pièce de moins de 9 m² et 180 cm pour une pièce de plus de 40 m² [34].

Par sécurité, les fournisseurs conseillent une distance minimale de 2,3 m entre le sol et les pales du ventilateur. Les extrémités des pales doivent quant à elles se situer à une distance de 50 cm minimum de tout élément qui pourrait gêner son bon fonctionnement [33].

Tableau 7 : Étapes d'un choix de brasseur d'air d'après [34]

PREMIERE ETAPE : DETERMINER L'AMPLITUDE EN FONCTION DE LA SURFACE						
SURFACE DE LA PIECE (M ²)	< 9m ²	9 à 13 m ²	13 à 20 m ²	20 à 40 m ²	> 40 m ²	
AMPLITUDE DU BRASSEUR D'AIR (CM)	73 - 90 cm	90 - 110 cm	110 - 135 cm	125 - 180 cm	Prévoir plusieurs brasseurs d'air de 125 cm à 180 cm	
DEUXIEME ETAPE : DETERMINER LE TYPE DE FIXATION APPROPRIEE						
HAUTEUR SOUS PLAFOND <2,5M	Choisir un modèle de plafond "Bas"					
HAUTEUR SOUS PLAFOND >2,8M	Prévoir une tige d'extension. Si la pièce mesure plus de 30 m ² , prévoir un second ventilateur					
TROISIEME ETAPE : CHOISIR LA BONNE TIGE D'EXTENSION						
HAUTEUR SOUS PLAFOND (M)	2,5 m	2,75 m	3 m	3,3 m	3,6 m	4 m
LONGUEUR DE LA TIGE D'EXTENSION (CM)	8 cm ou moins	8 -15 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm

N. B. Il faut toujours laisser un espace minimum de 45 cm entre le bout des pales et le mur

OFFRE INDUSTRIELLE

État de l'offre

Il existe de nombreux fournisseurs de brasseurs d'air tels que Westinghouse, Faro, Lucci Air, Fanaway, Hunter, Atlas Fan, Casafan, Helios VORTICE, Kichler, MinkaAire... Les industriels offrent une large gamme de produits dont certains sont notables par leur design travaillé.



Figure 30 : Illustrations de brasseur d'air design en bois, Wikimedia [CC BY-SA 4.0](#)

Données économiques

Le prix est d'environ 300 euros pour un petit brasseur d'air de bureaux ou d'habitation et peut varier de 70 euros pour les plus petits à 1500 euros pour les plus haut de gamme (possédant des options telles qu'un thermostat connecté, wifi, etc.). Il faut compter au moins 130 euros pour la pose [35,36]. À titre d'exemple :

- Le fournisseur français Airchaud Diffusion propose des brasseurs d'air de plafond variant entre 200 € pour les simples à trois pales et 1000 € pour les plus évolués à 6 pales en bois.
- La marque espagnole Palao Brun propose des ventilateurs design en bois de 40 W adaptés aux petites pièces. Les prix varient entre 100 et 300 euros.
- La marque VITRUST ainsi que la marque allemande Casa fan propose aussi des brasseurs d'air bois de 20 W dont les prix sont aux alentours des 500 euros.

NORMES ET RÉGLEMENTATION

Normes

Les brasseurs d'air font l'objet d'un marquage CE et sont fabriqués conformément aux normes harmonisées et spécifications techniques relatives aux directives Basse Tension et aux directives de Compatibilité Electromagnétique.

Traditionnalité

Les brasseurs d'air sont des équipements fixes de l'ouvrage sans toutefois être considérés comme des procédés de construction. Ils ne sont donc considérés par aucun NF DTU, Recommandations Professionnelles RAGE et Règles Professionnelles et ne font l'objet d'aucune évaluation technique.

Réglementations

Malgré leur impact sur le confort estival, les brasseurs d'air ne sont pas considérés par la Réglementation Thermique RT2012. La RE 2020 quant à elle prévoit d'intégrer les brasseurs d'air dans le calcul de la DIES [37].

Les brasseurs d'air sont concernés par la réglementation acoustique vis-à-vis du bruit des équipements.



FOCUS BIOMIMÉTISME [28]

Les échanges gazeux sont essentiels dans le vivant pour permettre la régulation thermique et la respiration de nombreuses espèces. Ces échanges peuvent se faire de différentes manières et de nombreux insectes ont recours au brassage d'air de leur habitat pour permettre la ventilation et thermorégulation tels que les abeilles et guêpes en se positionnant à l'entrée de la ruche.

À ce jour, le transfert technologique le plus abouti concerne des pales rotatives bio-inspirées plus silencieuses et économes que les ventilateurs et éoliennes classiques. Des chercheurs canadiens et américains se sont inspirés des nageoires de la baleine à bosse qui se déplace rapidement pour capturer ses proies. Les tubercules sur ses longues nageoires lui permettent de se déplacer rapidement offrant ainsi un meilleur écoulement de l'eau. En effet, ces tubercules améliorent l'hydrodynamisme des nageoires. L'adaptation de ce principe aux pales d'éoliennes a permis la réduction du bruit généré ainsi qu'une efficacité de 20% supérieure. Il n'existe pas encore d'adaptation pour les brasseurs d'air dans le bâtiment.



Figure 31 : Baleine à bosse - [Pixabay Licence](#)

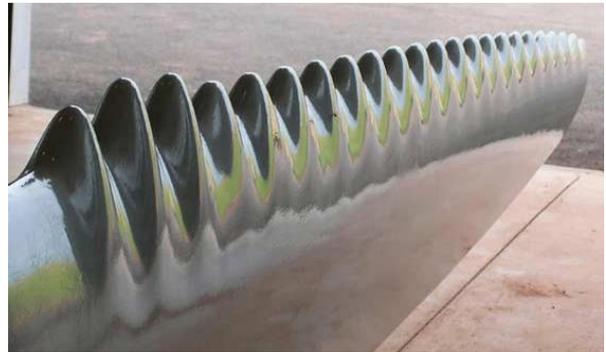


Figure 32 : Éolienne bio-inspirée des tubercules © WhalePower

REFERENCE DE LA FICHE : [31–39]

SURVENTILATION OU FREE-COOLING

La **surventilation** des bâtiments couramment appelée « free-cooling » est une solution permettant de limiter ou d'éviter le recours à la climatisation en renouvelant l'air intérieur par de l'air extérieur en vue de décharger le bâtiment de la chaleur accumulée en journée lorsque la température ambiante du bâtiment est supérieure à la température extérieure. Cette solution regroupe deux techniques distinctes : la surventilation naturelle et la surventilation mécanique.

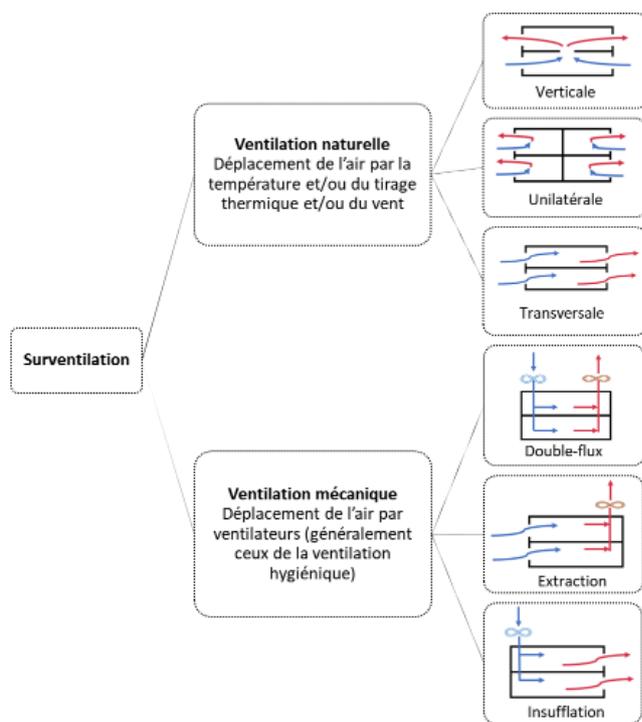


Figure 33 : Typologie des techniques de surventilation [40]

La technique de surventilation naturelle vise à faciliter le passage de l'air entre l'intérieur et l'extérieur et donc à accélérer le processus de renouvellement d'air sans que celui-ci ne soit pour autant forcé ou garanti. Cette solution peut faire appel à trois techniques présentées par ordre croissant d'efficacité :

- La ventilation unilatérale : le flux d'air provenant de l'extérieur transite de la partie basse à la partie haute d'une même façade. La force motrice est due à l'effet de tirage thermique appelé aussi « effet cheminée » qui est induit par la différence de températures. Il s'agit par exemple du cas des zones thermiques qui n'ont qu'une seule paroi en contact avec l'extérieur.
- La ventilation transversale : le flux d'air traverse le bâtiment dans sa profondeur d'une façade à l'autre. La force motrice est due à l'effet du vent qui engendre une différence de pression entre les façades.
- La ventilation verticale : le flux d'air entrant par la façade transite verticalement par des cages d'escaliers, des atriums, des conduits dédiés, etc. La force motrice est celle du tirage thermique.

La surventilation mécanique, également appelée ventilation intensive, fait appel à des entrées d'air et/ou extractions d'air mécaniques. Elle peut être couplée à un réseau de ventilation hygiénique. Trois systèmes se distinguent :



CARACTÉRISTIQUES

Surventilation mécanique*

Coût

€€

Impact Carbone

ccc

Mise en œuvre



Entretien



Adaptabilité



Performance



Durabilité



Intégration Architecturale



*voir le détail de toutes les solutions en fin de fiche

LES (+)

- La surventilation naturelle permet de rafraîchir efficacement le bâtiment sans consommation énergétique additionnelle.
- Possibilité de couplage avec des solutions d'éclairage naturel indirect (puits de lumière) et avec les solutions de ventilation naturelle, hybride et double flux.

LES (-)

- Connaissances nécessaires à la conception de la ventilation naturelle limitées (vitesse du vent, impact de la morphologie urbaine, pertes de charges, etc.).
- Conception qui nécessite un dimensionnement précis des amenées et extraction d'air.
- Efficacité qui dépend d'une parfaite conception architecturale.
- Procédures de mise en service et réception importantes.
- Vigilance à apporter sur l'étanchéité à l'air du bâtiment, les risques d'intrusion, la pluie, la qualité de l'air et l'acoustique.
- Augmentation des consommations électriques de la ventilation dans le cas de la surventilation mécanique.

- La surventilation mécanique double flux : il s'agit généralement de dimensionner et de piloter le réseau de ventilation hygiénique pour cet usage.
- La surventilation mécanique sur extraction : ce système de surventilation hybride combine une entrée d'air réalisée de manière naturelle avec une extraction mécanique qui peut être couplée au réseau de ventilation hygiénique simple flux.
- La surventilation mécanique sur insufflation : ce système de surventilation hybride combine une entrée d'air mécanique avec une extraction réalisée naturellement.

Domaine d'emploi

Cette solution est applicable à tous les bâtiments hors usage spécifique (santé, pharmaceutique, etc.). Selon la localisation, le type et l'usage des bâtiments, le dimensionnement, les contraintes de mise en œuvre et l'efficacité de la solution varient. Les techniques de surventilation naturelle peuvent être mises en œuvre individuellement ou collectivement. La ventilation verticale est plus couramment employée dans les bâtiments tertiaires et collectifs de grande dimension que dans des bâtiments d'habitation individuelle.

Caractéristiques et données techniques

Paramètres de conception

L'efficacité des solutions de surventilation dépend de paramètres non maîtrisés de l'environnement ainsi que de paramètres de conception précisés dans le Tableau 8. Les techniques de surventilation naturelle visent à créer des mouvements d'air importants en utilisant deux phénomènes qui peuvent être cumulés : l'effet du vent et l'effet cheminée.

Tableau 8 – Principaux paramètres de conception des systèmes de surventilation³

TECHNIQUE	PARAMETRES NON MAITRISES	PARAMETRES DE CONCEPTION
SURVENTILATION NATURELLE UNILATERALE	<ul style="list-style-type: none"> - Températures intérieures au niveau des entrées et sorties d'air - Température extérieure 	<ul style="list-style-type: none"> - Niveau d'inertie du bâtiment - Surface libre d'ouverture - Dimensions des ouvertures - Profondeur de la pièce
SURVENTILATION NATURELLE TRANSVERSALE	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse du vent (m/s) - Direction du vent - Morphologie urbaine 	<ul style="list-style-type: none"> - Niveau d'inertie du bâtiment - Surface libre d'ouverture - Emplacement des ouvertures - Aménagement intérieur pour faciliter la transition du flux d'air - Profondeur du bâtiment - Forme du bâtiment
SURVENTILATION NATURELLE HORIZONTALE		<ul style="list-style-type: none"> - Niveau d'inertie du bâtiment - Surface libre d'ouverture - Distance verticale (prise au centre) entre la prise d'air et l'extraction d'air - Forme du bâtiment - Coefficient de décharge de l'amenée d'air ou de l'extraction d'air
SURVENTILATION MECANIQUE	<ul style="list-style-type: none"> - Températures intérieures et extérieures 	<ul style="list-style-type: none"> - Niveau d'inertie du bâtiment - Débit de ventilation - Pertes de charge du réseau de ventilation

L'effet du vent correspond à la circulation horizontale de l'air liée aux différences de pression entre la façade exposée au vent (surpression) et la façade protégée du vent (dépression). L'effet du vent est par exemple utilisé pour la surventilation naturelle transversale. Il s'agit de placer des ouvertures sur des surfaces opposées du bâtiment dont l'une des deux est exposée au vent dominant. La vitesse des vents en milieu urbain est difficile à estimer tant elle dépend de la morphologie urbaine. Une étude de simulation aérodynamique s'avère alors nécessaire pour tenir compte de la volumétrie des éléments qui constituent la ville et estimer les vitesses de vents à l'échelle du bâtiment étudié. Le débit d'air induit par le vent peut alors

³ Les techniques de surventilation hybrides ont des paramètres de conception communs aux techniques de surventilation mécanique et naturelle

être calculé en tenant compte de la vitesse de vent, de son incidence sur la façade en surpression et de la surface libre d'ouverture.

L'effet cheminée correspond au tirage thermique résultant des écarts de températures entre le bas et le haut d'une colonne d'air. Ce tirage induit une entrée d'air frais par le bas du bâtiment qui ressort vers le haut de celui-ci. Plus la différence de température est importante, plus le mouvement sera accéléré. La vitesse d'air est également plus importante lorsque la distance entre le point de tirage et d'extraction est augmentée. L'effet cheminée peut être réalisé à l'échelle d'une seule fenêtre, d'une façade (surventilation naturelle unilatérale) ou d'un bâtiment tout entier (surventilation naturelle verticale).

Dans les deux cas, plus la surface libre d'ouverture sera importante plus le débit d'air sera conséquent. La surface libre d'ouverture varie selon le système d'ouvrant utilisé. Ainsi pour une même dimension de fenêtre, un système d'ouverture oscillo-battant aura une surface libre d'ouverture très faible comparativement à un système d'ouverture française. Le système d'ouverture est donc un paramètre important à considérer en plus des surfaces de vitrage.

Enfin la profondeur du bâtiment ainsi que sa forme et son aménagement auront également un impact sur l'effet du vent et l'effet cheminée, car ils induisent des pertes de charge limitant le débit de renouvellement d'air. Il convient alors de travailler l'aménagement intérieur de manière à ce qu'il corresponde à la répartition des ouvertures. Le coefficient de décharge de l'amenée d'air ou de l'extraction d'air résultant de l'usage de conduits d'air spécifiques dans le cas d'une surventilation naturelle verticale doit également être considéré. Il s'agit en effet de tenir compte des pertes de charge résultantes de l'ensemble des obstacles qui se trouvent sur le passage du mouvement d'air.

Dans le cas d'une ventilation unilatérale, pour une hauteur sous plafond de 3 mètres, il est conseillé de ne pas dépasser une profondeur de 7,5m. Pour une même hauteur sous plafond, la profondeur maximale conseillée pour une ventilation transversale est de 15m sans obstacle [40].

Le niveau d'inertie du bâtiment est également un paramètre de conception intrinsèquement lié au système de surventilation naturelle comme mécanique. Plus l'inertie d'un bâtiment est importante, plus celui-ci est en capacité d'accumuler de la chaleur. L'avantage des bâtiments à forte inertie est qu'ils peuvent stocker une importante quantité de chaleur durant la journée limitant ainsi la montée de la température ambiante. Cette stratégie est souvent employée dans la construction bois où des parois à inertie (chape béton, mur à inertie, etc.) sont ajoutées pour limiter les surchauffes résultantes des apports externes et internes en période estivales. Il est alors nécessaire d'assurer une surventilation efficace afin de « décharger » les parois et ainsi de rafraîchir le bâtiment. Dans le cas de bâtiments à faible inertie, l'enveloppe du bâtiment accumule peu de chaleur durant la journée. Le rafraîchissement du bâtiment par surventilation est alors très efficace. Cette spécificité qui se retrouve dans de nombreuses constructions bois est un atout qui peut servir notamment pour des bâtiments à usages intermittents, dont les apports internes et solaires peuvent être limités en journée.

Dans le cas d'une surventilation mécanique il s'agit de travailler dès la phase esquisse sur la trajectoire des conduites et la disposition des bouches de soufflage et d'extraction afin de limiter les pertes de charge. En effet la puissance du ventilateur sera d'autant plus forte que les pertes de charge sur le trajet de ventilation sont importantes. De plus il s'avère que la perte de charge est approximativement proportionnelle au carré du débit de ventilation. Par exemple, lorsque le débit est triplé et passe de 5000 m³/h à 15 000 m³/h cela entraîne une consommation du ventilateur 27 fois plus grande qui passe alors de 1,5 kW à 40,5 kW [40]. Il est alors nécessaire d'être très vigilant aux conséquences de la surventilation mécanique sur la consommation du ventilateur. Ainsi, lorsque l'impact est important il est recommandé soit de passer par un système parallèle à celui de la ventilation hygiénique soit de passer sur un système de surventilation naturelle ou hybride pour bénéficier de la pulsion de l'effet du vent et de l'effet cheminée.

Le choix d'un système de surventilation mécanique, naturelle ou hybride peut être induit par des exigences de qualité de l'air intérieur et/ou acoustique. Lorsque le bâtiment étudié se situe dans un environnement pollué ou avec des nuisances acoustiques extérieures élevées et selon les exigences de qualité intérieure du bâtiment il ne sera pas toujours possible de mettre en place un système de surventilation naturelle et les systèmes de surventilation mécaniques seront privilégiés moyennant l'usage de filtres et bouches de ventilation adaptés aux exigences. Il est par exemple possible d'utiliser des ouvertures spécifiques à propriétés acoustiques.

Paramètres de gestion et de régulation

Pour assurer une surventilation efficace, des conditions de régulations basées sur des mesures de températures intérieures et extérieures sont nécessaires. Selon le cas d'étude et la stratégie développée le positionnement et le nombre de capteurs varient.

De manière générale le fonctionnement de la surventilation est régi par des conditions de fonctionnement. Les conditions suivantes sont citées à titre d'exemple :

- Pas de surventilation durant les périodes de chauffe
- Il est recommandé de ne pas utiliser la surventilation naturelle en cas de conditions météorologiques défavorables, par exemple temps pluvieux dans le cas d'ouvertures horizontales ou rafales de vent supérieures à 40km/h [41]. Dans ce cas des anémomètres et capteurs de pluie seront nécessaires.
- Surventilation activée à minima lorsque les conditions suivantes sont respectées :
 - Température extérieure \leq température intérieure - 2°C
 - Température intérieure > température minimale de confort
 - Température extérieure \geq 14°C

Dans le cas d'une surventilation mécanique, le débit de ventilation est contrôlé via une régulation automatique qui permet de mettre le système en fonctionnement lorsque les conditions climatiques et horaires sont respectées. La centrale de traitement d'air doit alors être en mesure d'augmenter les débits d'air. Il est également possible de donner la possibilité à l'utilisateur de piloter le système notamment pour lui donner certaines possibilités de dérogation vis-à-vis de l'automatisation du système.

Dans le cas d'une surventilation hybride ou naturelle la gestion des ouvertures peut être manuelle ou automatique. Dans le cas d'une gestion manuelle, l'utilisateur devient un élément clef au bon fonctionnement du système. Des indicateurs visuels peuvent alors être employés afin de l'assister et de le motiver dans ses actions (Voir le chapitre 5 - Stratégies d'implication des usagers page 97). À contrario lorsque l'ensemble des ouvertures devient automatisé un système de gestion technique centralisée peut devenir nécessaire notamment lorsque l'ouverture des fenêtres est modulable.

	POINTS FORTS	POINTS FAIBLES
<i>VENTILATION UNILATERALE</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Intégration architecturale - Régulation par zone - Composants nécessaires limités - Possibilité d'une régulation manuelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Moins performant que les autres solutions - Formation à l'utilisation
<i>VENTILATION TRANSVERSALE</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Très bonne efficacité de refroidissement - Possibilité d'une régulation manuelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Régulation complexe - Nécessite un effort particulier pour la conception des espaces qui doivent limiter les obstacles - Incompatible avec les bâtiments profonds
<i>VENTILATION VERTICALE</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne efficacité de refroidissement 	<ul style="list-style-type: none"> - Régulation complexe - Conception architecturale importante - Vigilance à porter sur les risques d'incendie
<i>SURVENTILATION MECANIQUE</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation du réseau existant - Coût d'investissement limité au surdimensionnement nécessaire à l'augmentation des débits - Indépendant de la conception architecturale - Maîtrise des débits 	<ul style="list-style-type: none"> - Efficacité limitée par la conception du réseau de ventilation - Débit maximal limité par l'encombrement et le dimensionnement du réseau - Augmentation des consommations électriques des ventilateurs - Air neuf extérieur réchauffé par les ventilateurs - Pas de gestion manuelle - Entretien
<i>SURVENTILATION HYBRIDE</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne efficacité grâce à l'utilisation de l'extracteur lorsque le débit naturel n'est pas suffisant - Possibilité d'une régulation manuelle - Risques d'intrusion limités - Moins dépendant de la conception architecturale que la surventilation naturelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Consommations électriques limitées

CARACTÉRISTIQUES DES SOLUTIONS

<i>Surventilation hybride</i>			
<i>Coût</i>	<i>Impact Carbone</i>	<i>Mise en œuvre</i>	<i>Entretien</i>
€€	cc		
<i>Adaptabilité</i>	<i>Performance</i>	<i>Durabilité</i>	<i>Intégration Architecturale</i>

<i>Surventilation naturelle unilatérale</i>			
<i>Coût</i>	<i>Impact Carbone</i>	<i>Mise en œuvre</i>	<i>Entretien</i>
€	-		
<i>Adaptabilité</i>	<i>Performance</i>	<i>Durabilité</i>	<i>Intégration Architecturale</i>

<i>Surventilation naturelle transversale</i>			
<i>Coût</i>	<i>Impact Carbone</i>	<i>Mise en œuvre</i>	<i>Entretien</i>
€	-		
<i>Adaptabilité</i>	<i>Performance</i>	<i>Durabilité</i>	<i>Intégration Architecturale</i>

<i>Surventilation naturelle verticale</i>			
<i>Coût</i>	<i>Impact Carbone</i>	<i>Mise en œuvre</i>	<i>Entretien</i>
€€€€	cc		
<i>Adaptabilité</i>	<i>Performance</i>	<i>Durabilité</i>	<i>Intégration Architecturale</i>

OFFRE INDUSTRIELLE

État de l'offre

De manière générale, il n'existe pas de systèmes clefs en main permettant de mettre en place une solution de surventilation générique. Il existe néanmoins de nombreux composants qui peuvent être assemblés selon les besoins et les contraintes de conception afin de constituer une solution de surventilation complète.

Les composants existants pour la surventilation naturelle sont nombreux et une liste non exhaustive est donnée ci-dessous [40] :

- Capteur (et extracteur) de vent : il s'agit d'une cheminée montée en toiture qui capte le vent en hauteur et donc à une vitesse plus élevée qu'au niveau des façades du bâtiment. Un tel système peut être utile notamment pour les techniques de ventilation transversale.
- Cheminée (solaire) : les cheminées solaires permettent d'accroître l'effet du tirage thermique en toiture et donc l'effet cheminée utilisé pour la ventilation verticale. Les cheminées solaires peuvent également être surmontées d'édifices particuliers permettant d'augmenter le tirage comme par exemple l'effet venturi.
- Double façade ou double peau : les façades doubles peaux ont de multiples fonctions et l'une d'entre elles peut être d'accroître le tirage thermique nécessaire à la ventilation naturelle. Plus d'informations sont disponibles dans une fiche dédiée du guide page 69.

- Atrium : l'atrium peut être utilisé au profit de la surventilation naturelle en vue d'améliorer le tirage thermique. Celui-ci permet également un apport de lumière naturelle qui peut être diffusé dans plusieurs espaces n'ayant pas d'accès direct à la lumière naturelle. Une fiche dédiée à ce type de système aborde les puits de lumière page 32.
- Conduits spécifiques : des conduits spécifiques peuvent être utilisés à l'intérieur du bâtiment pour assurer le transit du flux d'air.
- Ouverture de ventilation (fenêtre, grille, louvre) en façade : il existe de nombreux types d'ouvrants qui sont des éléments essentiels à la pulsion et à l'extraction d'air.
- Grilles de transfert d'air : elles permettent d'améliorer la porosité d'un bâtiment en facilitant le transit d'air d'une pièce à l'autre.



Figure 34 : Grilles de ventilation et de transfert d'air d'un logement basse consommation en Pin maritime, Taillan Médoc ©Christian Maintrot



Figure 35 : Fenêtres motorisées VELUX INTEGRA®



Figure 36 : Fenêtres à ventelles « Ecoglass Premium » de Kingspan®



Figure 37 : Capteurs à vent du bâtiment de logements collectifs BedZED, Tom Chance [CC BY-SA 2.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/)



Figure 38 : Tours à vent du bâtiment bois Max Weber de l'Université Paris Ouest Nanterre La Défense @C. Bertolin



Figure 39 : Atrium équipé d'un système de verrière qui s'ouvre automatiquement © Philippe Ruault

Données économiques

Dans le cas de logements et de petits bâtiments tertiaires, l'usage de cheminées ou atrium pour la surventilation n'est pas nécessaire. Les coûts de la solution de surventilation se retrouvent ainsi réduits aux coûts nécessaires à son dimensionnement et aux ouvertures de ventilation (fenêtres, grilles anti-intrusion, etc.). Dans certains cas une bonne gestion manuelle peut être suffisante, mais lorsqu'elle n'est pas jugée efficace il est nécessaire d'ajouter des coûts liés à l'automatisation des ouvertures. Ce coût varie de 300 à 1000€ par fenêtre selon le type d'automatisation choisi, les angles d'ouverture, le poids des fenêtres, etc. [41].

Lorsque des éléments architecturaux majeurs sont nécessaires, et particulièrement dans les bâtiments de grande envergure, les coûts relatifs à la conception d'un bâtiment peuvent entraîner un surcoût conséquent. La mise en place d'éléments spécifiques tels que des conduits de ventilation séparés, des cheminées solaires, des capteurs de vents, de grands atriums et des doubles peaux ont un coût qui peut être considérable.

NORMES & RÉGLEMENTATION

Normes

Les composants nécessaires à la mise en place d'une surventilation sont nombreux. Certains font l'objet de normes européennes harmonisées comme les fenêtres (NF EN 14351-1+A2) et les ventilateurs (NF EN 12101-3) pour lesquels le marquage CE est obligatoire.

Traditionnalité

La surventilation qu'elle soit mécanique ou hybride peut faire appel à un système de ventilation double flux ou bien simple flux. Ces procédés font l'objet du NF DTU 68.3 et sont donc considérés comme traditionnels.

Les systèmes de ventilation naturelle et hybride qui peuvent être utilisés pour la surventilation ne font l'objet d'aucun NF DTU, Recommandations Professionnelles RAGE et Règles Professionnelles. Certains systèmes peuvent faire l'objet d'une évaluation technique (ATEX, ATec) qui permet de les considérer comme des techniques courantes.

Réglementation

L'usage de la surventilation naturelle est partiellement pris en compte dans la méthode de calcul de la RT2012 (voir Chapitre 6).

Les composants utilisés pour les systèmes de surventilation peuvent avoir une influence sur le respect des exigences réglementaires acoustiques. C'est notamment le cas des entrées d'air vis-à-vis des bruits provenant de l'extérieur et des ventilateurs pour le bruit généré par les équipements techniques.

INTÉGRATION AUX OUVRAGES BOIS

La mise en œuvre de la surventilation ne comporte pas de particularité d'intégration aux ouvrages bois. La faible inertie des systèmes constructifs bois peut amener à l'adoption de deux stratégies différentes :

- La surventilation naturelle est associée à une inertie thermique additionnelle ajoutée dans le système constructif ou le bâtiment. Celle-ci permet alors d'emmagasiner les apports de chaleurs générés la journée puis la surventilation permet de les évacuer lorsque la température extérieure redescend. Le système de surventilation doit alors être dimensionné pour que le renouvellement d'air évacue la quantité de chaleur stockée dans les temps prévus.
- Une autre stratégie réside sur la limitation des apports de chaleurs en journée cette fois sans ajout d'inertie. Les bâtiments bois dotés de systèmes constructifs bois sans inertie peuvent alors libérer la chaleur emmagasinée en journée très rapidement. Cette caractéristique peut s'avérer avantageuse selon les usages. La conception du système de surventilation est alors facilitée puisque le renouvellement d'air visé sera moins important qu'avec un système à forte inertie.

Les différents conduits, notamment pour l'extraction de l'air, peuvent être amenés à traverser les parois bois. Ces traversées de parois doivent être traitées de manière à assurer la continuité de la barrière étanche à l'air comme présenté sur la figure.



Risque d'infiltration d'air :
- Au droit de la liaison entre la paroi extérieure et l'élément traversant

Travaux d'étanchéité à l'air :



Lot Charpente / Gros oeuvre bois

Assurer l'étanchéité à l'air de la liaison entre le fourreau traversant et le complexe de la toiture terrasse :

A - Mise en place du fourreau qui sera fixé entre le voile travaillant du plancher et une plaque OSB de 9mm. Un joint de colle souple (Type MS107) est réalisé côté intérieur et extérieur afin d'assurer la tenue du fourreau



Lot Chauffage / Ventilation / CTA

Assurer l'étanchéité à l'air de la liaison entre le fourreau et la gaine ou le conduit traversant celui-ci :

B - Mise en oeuvre du cafeutrement entre le fourreau et la gaine ou conduit traversant à l'aide d'une bande de mousse résiliente ou d'un feutre bitumineux

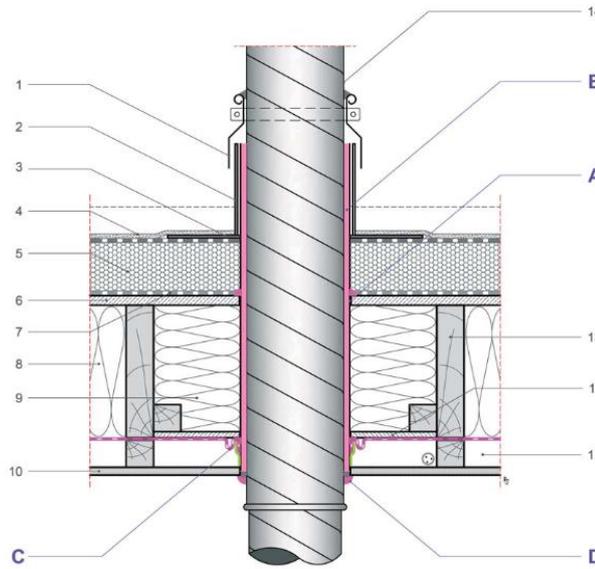


Lot Charpente / Gros Oeuvre Bois ou Lot Plâtrerie / Cloison / Doublage

Assurer la continuité de l'étanchéité à l'air du pare-vapeur au droit de la liaison avec le fourreau :

C - Collage soigné de l'écran pare-vapeur sur la périphérie du fourreau à l'aide de bandes adhésives élastiques ou d'un ruban flexible en caoutchouc butyle

D - Mise en oeuvre d'un joint mastic souple extrudé sur fond de joint au droit de la périphérie du perçement de la plaque de plâtre par la gaine ou le conduit



- 1 - Colerette en plomb ou métallique
- 2 - Manchon en plomb formant moignon
- 3 - Platine en plomb insérée dans l'étanchéité
- 4 - Feuille bitumineuse ou membrane d'étanchéité
- 5 - Isolation thermique extérieure
- 6 - Voile travaillant horizontal
- 7 - Ecran par-vapeur
- 8 - Isolation thermique du plancher
- 9 - Remplissage isolant / Entretoise
- 10 - Plaque de plâtre du plafond
- 11 - Vide technique ou Plénum
- 12 - Plaque OSB support du fourreau
- 13 - Solive bois massif du plancher
- 14 - Conduit d'extraction d'air VMC ou CTA

Coupe verticale

Figure 40 : Intégration d'un conduit d'extraction d'air dans un plancher haut bois ; [27]



FOCUS BIOMIMETISME [42-45]

Dans le vivant, la surventilation permet également de coupler renouvellement d'air et régulation thermique. De nombreuses architectures animales des insectes sociaux ou mammifères telles que les termitières, fourmilières, nids et terriers, utilisent cette stratégie. Dans la même lignée, le halètement des mammifères leur permet de réguler rapidement la température de leur corps lors de surchauffes liées par exemple à un exercice physique.

En architecture bio-inspirée, la termitière est un modèle fréquemment utilisé. Certaines termitières localisées dans les milieux tropicaux ont la capacité de ventiler naturellement leur habitat par ventilation naturelle verticale. Une surventilation peut intervenir la nuit lorsque la différence de température entre l'air à l'intérieur et extérieur de la termitière présente une importante différence. L'air capté sous terre en partie basse de la termitière est refroidi par géothermie en étant acheminé dans les espaces de culture des larves et champignons puis évacué par une cheminée centrale via un processus de tirage thermique (Figure 41).



Figure 41 : Schéma de principe des termitières à cheminée, Pasthugo, CC BY-SA 4.0

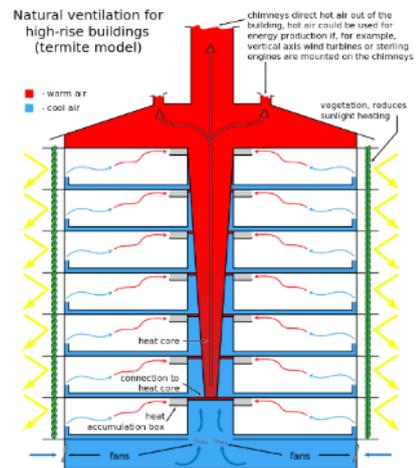


Figure 42 : Schéma du principe des termitières appliqué au bâtiment, Fred the Oyster CC BY-SA 3.0

Ces principes d'acheminement de l'air et de surventilation nocturne ont été mis en œuvre lors de la conception de l'Eastgate Building, bâtiment de bureau et commerce à Harare au Zimbabwe construit en 1996 (Figure 43). Le bâtiment consomme 35% d'énergie de moins comparé aux bâtiments classiques en ventilation mécanique à Harare. Une surventilation nocturne est effectuée aux périodes les plus chaudes de l'année afin d'évacuer la nuit la chaleur accumulée dans les parois (Figure 42). À la livraison le bâtiment a coûté 10% moins cher que s'il avait dû intégrer un système de ventilation et climatisation classique.



Figure 43 : Eastgate Building, Harare Estelle Cruz CC BY

Dans la même lignée, l'église Nianing au Sénégal développée par l'agence d'architecture In Situ et construite en 2019, reprend les principes de ventilation passive assurée par tirage thermique inspiré de la termitière (Figure 44). L'air est capté en partie basse de l'église au niveau de l'entrée puis évacué en partie haute du bâtiment soit au niveau du clocher (Figure 45). Tout comme l'Eastgate Center, ce projet intègre un principe de surventilation passif lorsque les différences de température de l'air sont importantes entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.

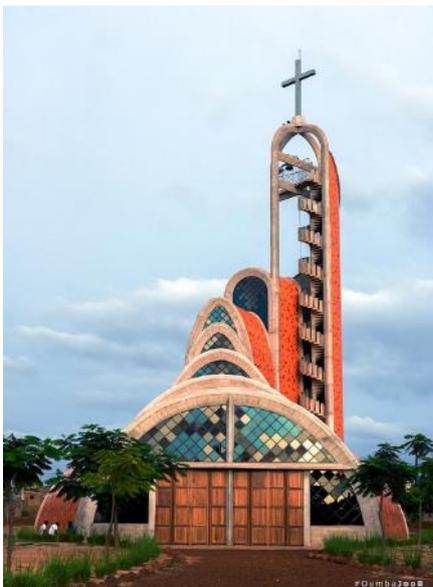


Figure 44 : Architecture Vue de l'église Nianing, Dmbjoob [CC BY-SA 4.0](#)



Figure 45 : Coupe de l'église et principe de ventilation © In Situ

PUITS CLIMATIQUE

La géothermie sur renouvellement d'air permet de limiter le recours au chauffage et/ou à la climatisation en exploitant les calories du sol pour réchauffer (période hivernale) ou refroidir (période estivale) l'air neuf avant qu'il ne pénètre à l'intérieur du bâtiment. Deux systèmes peuvent être distingués :

- **Le système aéraulique** : l'air neuf transite dans un réseau de canalisations enterré afin d'être réchauffé ou refroidi avant de pénétrer à l'intérieur du bâtiment.

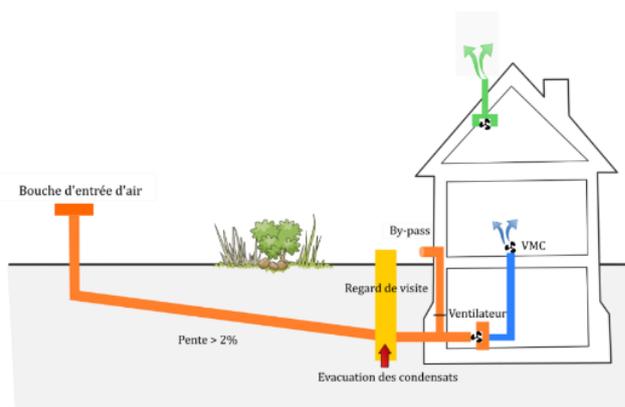
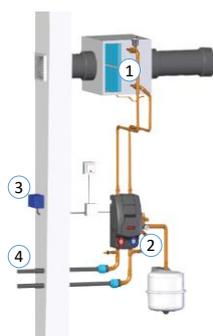


Figure 46 : Principe de fonctionnement d'un puits climatique

Lisa-ghi CC BY-SA 4.0

- **Le système hydraulique** : le fluide caloporteur est de l'eau glycolée qui circule dans un réseau enterré ou des sondes géothermiques. Le puits joue ainsi le rôle d'une batterie d'eau chaude ou froide. L'eau glycolée passe ensuite dans un système d'échangeur pour refroidir ou réchauffer l'air neuf qui va pénétrer dans le bâtiment.



- 1 – Batterie d'échange – raccords aérauliques
- 2 – Pompe de circulation
- 3 – Système de régulation en fonction de la température avec boîtier de commande
- 4 – Conduit d'eau glycolé

Figure 47 : Raccordement au système de ventilation dans le cas d'un puits climatique hydraulique ; © Helios - kit SEWT

Ces systèmes sont donc couplés au renouvellement d'air hygiénique du bâtiment. Ils sont communément appelés puits climatique (ou puits canadien / provençal). Ils sont à différencier des systèmes géothermiques qui sont couplés directement aux systèmes de chauffage et refroidissement.

La géothermie sur renouvellement d'air peut, en complément d'une conception adaptée du bâtiment, assurer un confort estival suffisant pour se passer d'un système de climatisation. En période hivernale cette solution permet de réduire les besoins de chauffage sans toutefois se substituer à un système de production de chaleur.



CARACTÉRISTIQUES

Coût

€€€€

Impact Carbone

ccc

Mise en œuvre



Entretien



Adaptabilité



Performance



Durabilité



Intégration



Architecturale



LES (+)

- Permet de tirer profit de la température relativement constante du sol pour réchauffer ou refroidir l'air introduit dans le bâtiment pour le renouvellement hygiénique.
- Couplage au renouvellement d'air du bâtiment ne nécessitant pas l'installation d'un système de ventilation complémentaire.

Pour le puits aéraulique :

- Système intéressant pour le tertiaire
- Faibles coûts de maintenance et facile d'usage

Pour le puits hydraulique :

- Espace nécessaire sur le terrain moindre que le puits canadien aéraulique

LES (-)

- Le réseau enterré nécessite de l'espace disponible à l'extérieur du bâtiment et des travaux de terrassement.
- Les systèmes de puits aérauliques ont une efficacité faible pour le résidentiel étant donné les faibles débits de renouvellement d'air.
- Sur la période estivale, il est nécessaire de garder les fenêtres fermées la journée pour éviter que l'air rafraîchi par le système de puits climatique ne quitte immédiatement le bâtiment sans avoir au préalable refroidi les

Domaine d'emploi [47]

Les systèmes de puits climatiques sont mis en œuvre en neuf ou en rénovation sur les bâtiments d'habitations (individuelles et collectifs) ainsi que sur les bâtiments tertiaires.

Pour les projets de rénovation, l'installation d'un puits canadien peut être intéressante si des travaux de terrassement sont prévus par ailleurs. Autrement, cette installation pourrait ne pas être économiquement rentable à cause de l'importance des travaux à engager.

Ces systèmes seront plus performants pour les bâtiments tertiaires où les débits de renouvellement d'air sont plus importants que pour les bâtiments d'habitation.

Le puits climatique (aéraulique ou hydraulique) est d'autant plus efficace que la différence de température entre le sol et l'air extérieur est grande (en période estivale et hivernale). Ces systèmes sont donc particulièrement adaptés aux régions où les températures extérieures sont extrêmes.

Dans le cas d'un puits climatique aéraulique, le terrain doit être assez étendu pour pouvoir disposer des tubes de 30 à 50 mètres à une distance d'au moins 2 mètres du bâtiment pour éviter une perte d'efficacité du refroidissement [48].

Les systèmes de puits climatique hydraulique sont destinés à être mis en œuvre sur les bâtiments équipés d'un système de ventilation avec insufflation de l'air neuf. Aussi, le couplage entre puits climatique (aéraulique ou hydraulique) et ventilation double-flux est complexe à mettre en œuvre et n'est, en général, pas judicieux sur les plans technique et économique.

Le réseau enterré, qu'il soit aéraulique ou hydraulique, nécessite une surface importante qui n'est pas toujours disponible en zone urbaine dense. De plus, tous les sols ne sont pas adaptés pour recevoir un puits climatique. Une étude de sol s'avère nécessaire pour valider la faisabilité d'un tel projet. Néanmoins l'espace nécessaire sur le terrain est moindre pour un puits canadien hydraulique qu'aéraulique. La figure suivante présente un arbre décisionnel pour le choix d'un système de puits climatique.

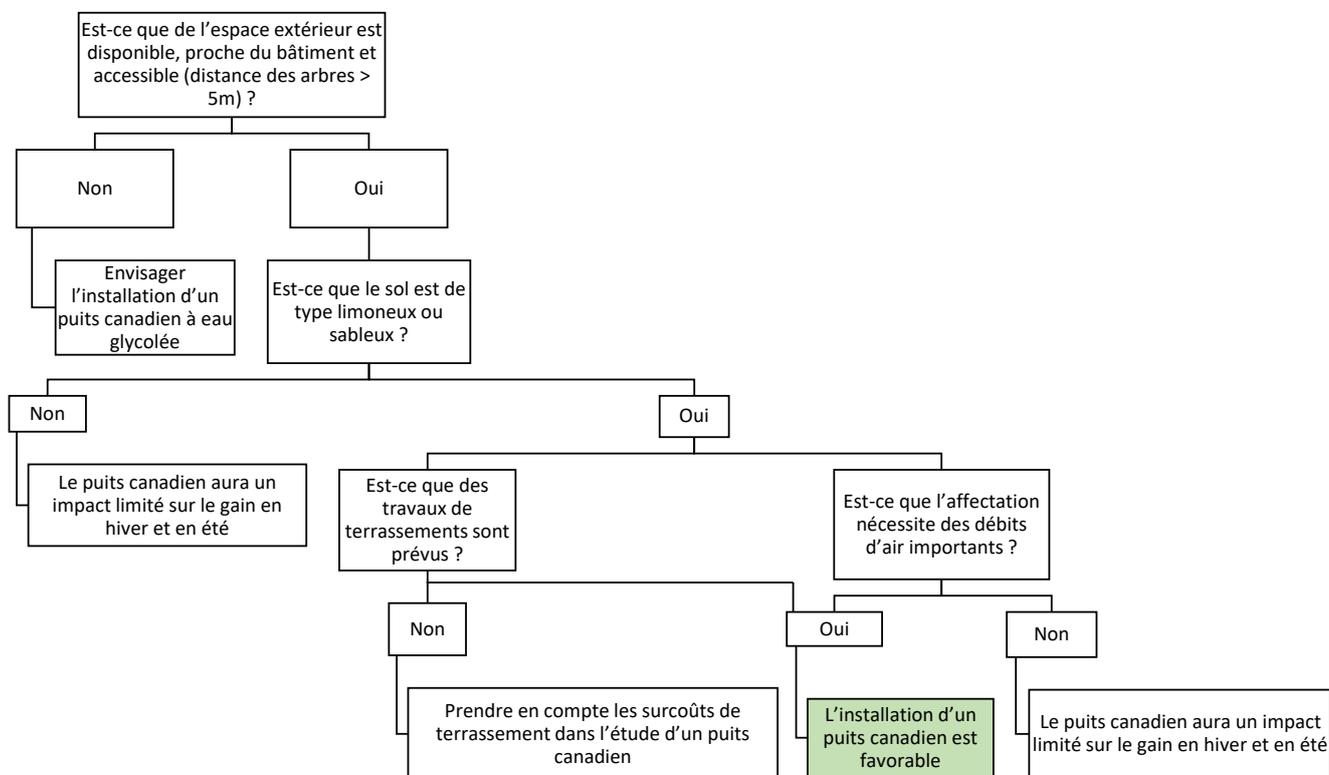


Figure 48 : Arbre décisionnel pour le choix d'un système de puits climatique, d'après [47]

Caractéristiques et données techniques

Paramètre de conception

La nature du sol et donc sa conductivité thermique influence fortement la performance d'un puits climatique. La conductivité thermique est plus importante pour un sol de type sable fin que pour un sol de type argile. Aussi, la conductivité thermique augmente avec la teneur en eau du sol (Figure 49). Ainsi, pour obtenir un échange thermique suffisant, le réseau enterré devra être plus long dans un sol sec de type argile que dans un sol humide de type sable fin.

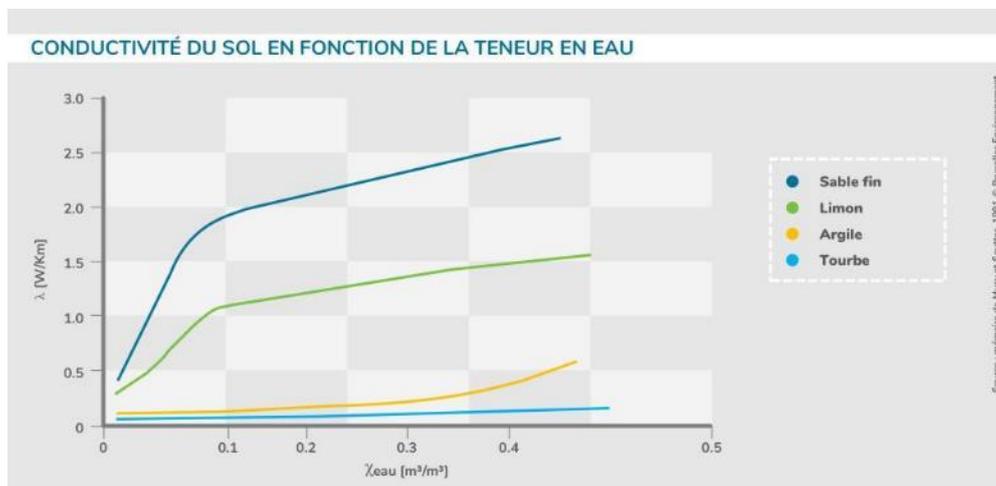


Figure 49 : Conductivité du sol pour différentes natures de sol en fonction de la teneur en eau [47]

Les phénomènes présents autour de l'échangeur air-sol peuvent être modélisés pour déterminer la température au niveau des tubes de l'échangeur. Le calcul de l'échange thermique entre l'air et les tubes au sein de l'échangeur permet ensuite d'obtenir une température de l'air insufflée dans le bâtiment [49].

D'autres paramètres sont essentiels à la définition du système : le débit d'air total, le nombre et le diamètre des tubes, la vitesse de l'air dans les tubes, la longueur des tubes, la distance entre tubes et la profondeur d'enfouissement des tubes.

La profondeur d'implantation du réseau de canalisation est un paramètre de conception important. Plus la profondeur est grande, plus les fluctuations de la température du sol sont faibles (diminution de l'influence de la température extérieure). La profondeur d'implantation doit dans tous les cas être suffisante pour mettre le réseau hors gel. La profondeur d'enfouissement est généralement comprise entre 2 et 4 m. Il est aussi important d'espacer les conduits d'au minimum 5 fois leur diamètre.

Il est également important de concevoir le système aéraulique en vue de limiter les frottements d'air ou pertes de charge. Elles dépendent notamment de la longueur, de la forme du circuit, du diamètre du conduit et du matériau qui le compose ainsi que de la vitesse de l'air. Pour cela, il s'agira donc de limiter le nombre de coudes, de favoriser des conduits larges et de privilégier l'usage de plusieurs conduits de longueur limitée plutôt qu'un nombre réduit de conduits plus longs. Pour la vitesse d'air il s'agira d'assurer une vitesse d'air suffisante pour favoriser l'échange thermique entre l'air et le tube (environ 2 m/s) tout en la limitant pour éviter trop de pertes de charge (max 3 m/s).

En raison des pertes de charge résiduelles, il est également recommandé de l'associer à un système de ventilation mécanique pour limiter les pertes d'efficacité. Il convient de tenir compte de la surconsommation électrique du ventilateur que cela occasionnera. Il est également possible d'envisager de coupler ce système avec une ventilation naturelle ou hybride (voir fiche solution pour plus de détails sur ce système).

Paramètres de régulation

Les systèmes de puits climatiques doivent être équipés d'un système de régulation de type by-pass pour éviter les surconsommations de chauffage et les surchauffes en période de mi-saison. Le principe de régulation est le suivant :

- En période de chauffe, le puits climatique est by-passé si la température extérieure est supérieure à la température à la sortie du puits climatique ;
- En période de refroidissement, le puits climatique est by-passé si la température extérieure est inférieure à la température de sortie du puits climatique.

Dans le cas du puits climatique aéraulique, l'air qui va être introduit à l'intérieur du bâtiment va préalablement circuler dans le réseau de canalisations enterré. Quelques précautions doivent être prises pour garantir la bonne qualité de cet air :

- Installer la prise d'air extérieure à bonne distance des sources de pollution (parking, route, compost, ...) et assurer qu'elle soit dotée de filtres contre les rongeurs, les insectes et le pollen ;
- Créer une pente de 2% minimum pour le réseau enterré afin de permettre l'évacuation des condensats, prévoir un bac à condensats et une trappe de visite ;
- Veiller à l'étanchéité à l'eau du système au droit des raccords ;
- Concevoir le système pour éviter l'inondation du réseau en cas de remontée de nappe phréatique ou d'orage.

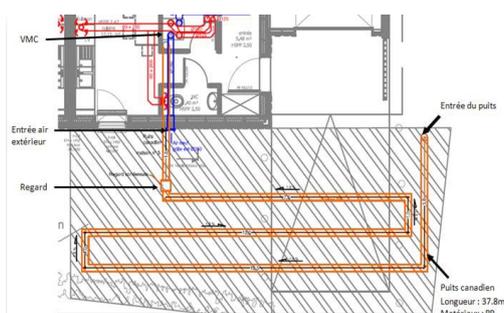


Figure 50 : Plan en méandre du puits climatique ; Maison en Pin Maritime [50]



Figure 51 : Arrivée d'une conduite de puits canadien coulée dans la dalle béton du RDC; Maison en Pin Maritime [50]



Figure 52 : Entrée d'air d'un puits climatique ; Maison en Pin Maritime [50]

OFFRE INDUSTRIELLE

État de l'offre

Plusieurs entreprises proposent des composants et pour certains des kits pour la réalisation de puits climatiques. [ATLANTIC](#), [ALDES](#), [REHAU](#) et [NATHER](#) proposent des composants spécialement dédiés à la réalisation de puits climatiques. [HELIOS](#), [EOLE](#), [MYDATEC](#) et [VENTILAIR](#) proposent un kit pour un système de puits climatique hydraulique. [LE PUIITS CANADIEN](#) propose un kit pour un système de puits climatique aéraulique.

L'installation d'un puits climatique fait intervenir différents corps d'état (lots VRD, Gros Œuvre, Plomberie, Génie climatique, Électricité). Aucune entreprise s'affichant comme spécialiste de l'installation de puits climatique n'a été identifiée.

Données économiques

L'installation d'un puits climatique pour une maison individuelle coûte entre 3 000 et 4 000 €. Pour l'installation dans les bâtiments tertiaires, le prix peut être de l'ordre de 50 000 € ou plus [51].

Des kits d'installation pour puits climatiques se vendent entre 1000 et 3000 € [52].

Le coût du puits canadien est fortement impacté par le fait que les travaux de terrassement soient ou non uniquement dédiés à l'installation du système.

NORMES & RÉGLEMENTATION

Normes

Les composants nécessaires à la mise en place d'un système de puits climatique sont nombreux. Certains peuvent faire l'objet de normes européennes et d'une obligation de marquage CE.

Les travaux d'installations de ventilation mécanique connexes au système de puits climatique font l'objet du NF DTU 68.3 :

NF DTU 68.3 P1-1-1 : Travaux de bâtiment – Installations de ventilation mécanique – Partie 1-1-1 : Règles générales de calcul, dimensionnement et mise en œuvre – Cahier des clauses techniques types.

Les caractéristiques des filtres utilisés peuvent être définies selon la norme NF EN ISO 16890-1 :

NF EN ISO 16890-1 : Filtres à air de ventilation générale – Partie 1 : Spécifications techniques, exigences et système de classification fondé sur l'efficacité des particules en suspension (ePM).

La mise en place des tubes du réseau enterré et le contrôle d'étanchéité du réseau peuvent être réalisés en se conformant à la norme NF EN 1610 :

NF EN 1610 : Mise en œuvre et essai des branchements et canalisation d'assainissement.

Traditionnalité

L'installation et la mise en œuvre des puits climatiques en habitat et en tertiaire font l'objet d'un Guide RAGE. Les bâtiments bois sont inclus dans le domaine d'application de ce guide. Cependant le statut du guide ne permet pas de considérer les procédés de puits climatique en technique courante.

Guide RAGE : Puits climatiques – Installation et mise en service – Neuf et Rénovation ; 2015

SAINT-GOBAIN PAM est titulaire d'un Avis Technique pour le système de puits climatique PAM ELIXAIR. Les bâtiments bois sont inclus dans le domaine d'emploi de l'Avis Technique. Ce procédé est donc considéré comme une technique de construction courante.

Réglementation

Les systèmes de puits climatiques ne doivent pas faire obstacle à l'obtention des débits :

- D'extractions règlementaires définies dans l'arrêté du 24 mars 1982 modifié relatif à l'aération des logements ;
- Définies dans le règlement Sanitaire Départemental Type objet de la circulaire du 9 août 1978 modifiée) et dans le Code du Travail.

INTÉGRATION AUX OUVRAGES BOIS

Les systèmes géothermiques sont particulièrement adaptés à des bâtiments sans inertie, où le rafraîchissement apporté par le système de ventilation impacte directement la température de l'air ambiant sans que la structure ne joue un rôle de stockage thermique. Couplés à une conception bioclimatique, les bâtiments à ossatures bois permettent ainsi d'assurer un confort thermique estival adéquat. À contrario, en hiver cela permet d'éviter de rafraîchir directement l'air intérieur via la ventilation grâce à un air entrant préchauffé, cela permet ainsi d'améliorer le confort thermique et de limiter les consommations énergétiques pour le chauffage.



FOCUS BIOMIMÉTISME [53,54]

La géothermie est une stratégie largement utilisée par les espèces d'insectes bâtisseuses nichant dans le sol. Suivant le même principe que décrit dans le focus biomimétisme free-cooling, les termitières creusent en profondeur sous terre afin d'utiliser les calories du sol pour chauffer ou rafraîchir l'air. Cette stratégie est double, car elle leur permet également de contrôler le taux d'humidité de l'air en creusant jusqu'aux nappes d'eaux souterraines (Cf. Focus biomimétisme free-cooling).

Il existe à ce jour un seul bâtiment bio-inspiré utilisant le principe de géothermie des termitières : la serre Davies Alpine House (Figure 53). Il s'agit d'une serre botanique en Angleterre au jardin botanique de Kew permettant d'accueillir des plantes alpines. Le système de régulation thermique passif est composé d'un labyrinthe thermique et d'un système de façade adaptative. Le labyrinthe thermique est placé sous la serre et lui sert également de fondations. L'air en dehors de la serre est introduit dans le labyrinthe, refroidi puis injecté à l'intérieur de la serre. Au contact de l'air intérieur de la serre, celui-ci s'échauffe et est évacué par effet cheminée en haut du dôme de la serre. Cette stratégie permet d'assurer une température minimale tout au long de l'année malgré un climat tempéré (Figure 54, Figure 55, Figure 56.).



Figure 54 : Labyrinthe thermique en cours de construction © Atelier Ten



Figure 53 : Vue extérieure Davis Alpine House, Daniel Case [CC BY-SA 3.0](#)

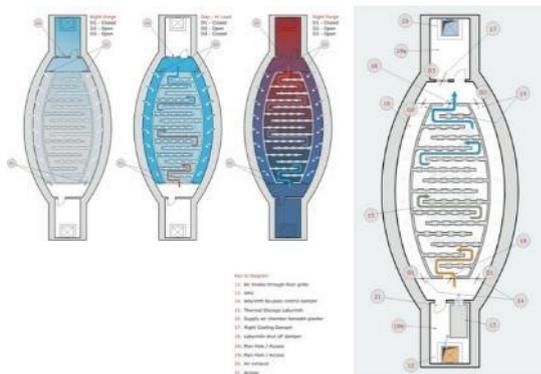


Figure 55 : Schémas de fonctionnement du labyrinthe thermique © Atelier Ten



Figure 56 : Intérieur de la serre, Gossipygy [CC BY-SA 3.0](#)

Ce système peut être adapté dans le cadre de la construction neuve d'un bâtiment bois. L'inertie thermique est ajoutée par le soubassement du bâtiment tout en veillant à intégrer un tirage thermique naturel. Ce système réversible peut être adapté dans le cadre de la conception bois : la verrière peut être remplacée par une structure bois tout en conservant le même système de ventilation.

REFERENCES DE LA FICHE : [47–56]

VENTILATION NATURELLE & HYBRIDE

La ventilation naturelle et hybride permet de limiter le recours à la ventilation mécanique en exploitant les différences de pression et de température entre l'intérieur et l'extérieur qui créent des mouvements d'air. Elle permet ainsi d'évacuer la vapeur d'eau, les COV, le CO₂ en se passant de l'installation d'un système mécanique. La ventilation naturelle et la ventilation hybride se distinguent comme suit :

La **ventilation naturelle** consiste en un renouvellement permanent d'air neuf réalisé par :

- L'ouverture des portes, fenêtres et/ou des grilles d'aération dans les murs des pièces principales (situés en 1 sur le schéma)
- L'ouverture de transfert vers les autres pièces (grille ou ouverture sous les portes intérieures) (en 2)
- L'ouverture des grilles d'évacuation dans les pièces de service à forte humidité (cuisine, sanitaires) où l'air est évacué par un conduit vertical pour empêcher le refoulement et débouchant en toiture (en 3)

L'avantage est de tirer profit des forces motrices naturelles du vent afin de faire circuler l'air et de le renouveler. Afin de faire le plein d'air frais sans refroidir le bâtiment il faut ouvrir en grand un maximum de fenêtres sur un temps court et chercher à créer des mouvements d'air traversant.[57]

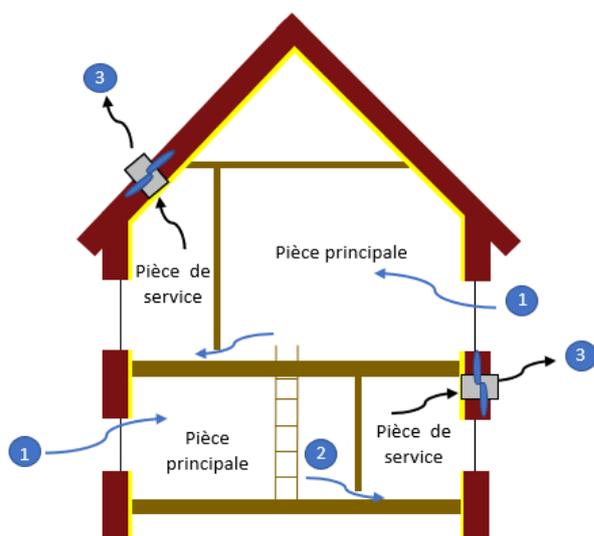


Figure 57 : Principe de fonctionnement de la ventilation naturelle

Puisqu'il n'est pas possible d'assurer que les forces motrices seront en permanence suffisantes pour assurer les débits de renouvellement d'air réglementaires, une assistance mécanique est parfois mise en place. On parle dans ce cas de **ventilation hybride**. Généralement, l'assistance mécanique est située au niveau des grilles d'évacuation (en 3 sur le schéma) avec ouverture hygroréglable (les bouches d'extraction ont des sections variables avec l'humidité qui règne dans le logement) ou sur le toit sous forme de tourelle double flux.



CARACTÉRISTIQUES

Ventilation naturelle

Coût

€

Impact Carbone

-

Mise en œuvre



Entretien



Adaptabilité



Performance



Durabilité



Intégration

Architecturale



Ventilation hybride

Coût

€€€

Impact Carbone

c

Mise en œuvre



Entretien



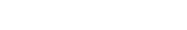
Adaptabilité



Performance



Durabilité



Intégration

Architecturale



LES (+)

- Utilise les forces motrices de la nature pour la circulation de l'air et réduit les consommations électriques des ventilateurs et auxiliaires associés
- Très peu d'entretien
- Pas de ventilateurs bruyants
- Ventilation hybride simple à installer
- Peu coûteux à l'exploitation et demande peu de place utile dans les locaux techniques
- Débits d'air extraits sont en partie contrôlés pour la ventilation hybride.

Domaine d'emploi

La ventilation naturelle & hybride s'emploie plus généralement dans les bâtiments d'habitation que dans des locaux de bureaux où la forte concentration de personnes crée une difficulté dans la régulation du renouvellement d'air.

Dans le tertiaire, les débits minimums réglementaires exigent un certain taux de renouvellement d'air (cf. partie réglementation) qui ne peut être garanti avec une ventilation naturelle. Il est donc nécessaire d'utiliser un système de ventilation hybride pour cet usage.

Concernant les bâtiments construits avant 1937, en raison de l'absence de réglementation, les logements peuvent ne comporter aucun dispositif spécifique pour la ventilation [58]. Celle-ci se fait souvent par les défauts d'étanchéité importants (Tableau 9), l'ouverture des fenêtres et les conduits de cheminée. Ainsi, la ventilation naturelle est généralement présente dans les bâtiments anciens.

Tableau 9 : Étanchéité à l'air en fonction du type de bâtiment © Ecohabitation [59]*

TYPE DE BATIMENT	ETANCHEITE A L'AIR (CHANGEMENT D'AIR PAR HEURE A 50 PA)
BATI DANS LES ANNEES 60 -70	6.9
BATI DANS LES ANNEES 80 -90	5.2
NOVOCLIMAT ET LEED HABITATION	2.5
R-2000	1.5
PASSIVHAUS	0.6

LES (-)

- Régis par les phénomènes naturels de mouvement de l'air, dépend de la météo
- Qualité de l'air non garantie dans tous les locaux.
- En outre, comme pour la ventilation simple flux (extraction mécanique) :
- Pas de filtration de l'air, perte de chaleur en hiver, nuisances sonores
- Les ouvertures entre locaux, favorisent le passage de bruits
- Les grilles d'ouvertures peuvent engendrer un inconfort en hiver.

À partir des années 70 le principe de la ventilation générale et permanente est adopté pour le parc immobilier français. Les logements doivent alors être équipés d'une ventilation naturelle par conduits à tirage naturel ou d'une ventilation mécanique. Quel que soit le système mis en place, l'air doit pouvoir circuler des pièces principales (séjour, chambre), qui comportent des entrées d'air, vers les pièces humides (cuisine, salles de bain, WC), où l'air est évacué.

Les bâtiments doivent répondre à la réglementation en vigueur au moment du dépôt de leur permis de construire. La ventilation hybride étant mise en œuvre dans des projets de rénovation n'est pas tenue de respecter les textes réglementaires postérieurs à la construction du bâtiment. Lorsque cela est possible, il est toutefois souhaitable de satisfaire aux textes réglementaires les plus récents.

Caractéristiques et données techniques

La ventilation naturelle avec **ouverture unique en façade** est efficace lorsque la profondeur de la pièce est inférieure ou égale à 2 fois la hauteur sous plafond. Une profondeur de 6 mètres est le maximum pour obtenir une ventilation efficace dans toute la zone. Cette stratégie n'est pas adaptée si la façade donne sur une rue bruyante, un haut bâtiment ou une source de pollution pouvant gêner la ventilation. Son efficacité est effective si et seulement si la hauteur de l'ouverture est grande et verticale, que ce soit par effet cheminée ou par effet du vent (*principes définis dans fiche de la surventilation page 43*). Il est recommandé que l'ouvrant ait une hauteur d'au moins 1,5 m afin que l'air puisse rentrer par le bas de la fenêtre et sortir par le haut (théorie des grandes ouvertures verticales). En effet, le facteur qui crée le débit est la différence de hauteur entre le point bas d'entrée de l'air et le point haut de sortie. De plus, la ventilation naturelle est plus simple à mettre en œuvre sur les pièces traversantes afin d'obtenir un courant d'air induit par l'effet du vent [46].

La ventilation naturelle avec **double ouverture** est efficace lorsque la profondeur de la pièce est inférieure à 2,5 fois la hauteur sous plafond, pour une hauteur entre l'entrée d'air et l'extraction d'environ 1,5 m. Cette hauteur peut être atteinte en utilisant par exemple des grilles d'entrée et de sortie d'air, placées de part et d'autre de la hauteur de la fenêtre. En augmentant cette hauteur, on augmente le différentiel de pression entre l'ouverture haute et la basse [46].

Les régions venteuses permettent d'assurer une bonne ventilation, mais en contrepartie augmentent les déperditions thermiques par renouvellement d'air. Dans les régions froides, ce système génère d'importantes déperditions thermiques. Une telle ventilation peut représenter jusqu'à un tiers des déperditions d'un bâtiment standard et près de la moitié de celles d'un bâtiment bien isolé. Il s'agit donc d'être vigilant au climat et d'éviter l'utilisation de ce système dans les régions froides.

Un autre point de vigilance consiste à respecter des conditions spécifiques d'utilisation des fenêtres pour avoir un renouvellement d'air correct avec notamment leur ouverture à un rythme régulier non improvisé. Le tableau ci-dessous recommande la fréquence d'aération à adopter pour certains types de pièces afin d'obtenir un air sain (non chargé en humidité, odeurs, polluants, etc.) [39]. La durée d'aération varie de 1 à 3 minutes à chaque fois.

Tableau 10 : Recommandation d'aération © MINERGIE

TYPE DE PIECE	RECOMMANDATION D'AERATION
SEJOUR SANS FUMEUR	Ouverture toutes les 2 heures
SEJOUR AVEC FUMEUR	Ouverture toutes les demi-heures à 1 heure
CHAMBRE A COUCHER	Ouverture toutes les 2 heures
SALLE DE DE CLASSE (25 ELEVES)	Ouverture toutes les 20 minutes

La **ventilation hybride** fonctionne grâce à des grilles de ventilation situées en hauteur des pièces et à des tourelles double flux situées en débouché de conduit vertical aussi appelé extracteur.

Les grilles de ventilation avec ouverture hygoréglable permettent d'éviter que le mouvement d'air fasse un retour arrière grâce à une valve souple. En dessous de 30 % d'humidité l'ouverture laisse passer une quantité minimale d'air neuf. Entre 30 % et 70 % d'humidité, la valve s'ouvre plus ou moins de manière à laisser passer la quantité idéale d'air neuf et au-dessus de 70 % d'humidité, la quantité d'air neuf entrante est maximale [60]

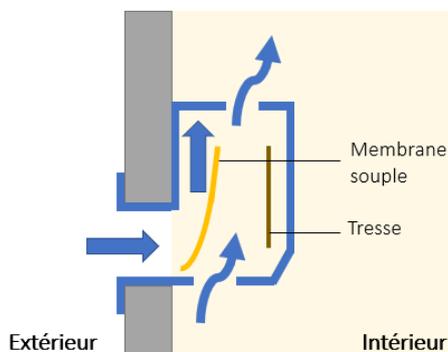


Figure 58 : Principe de fonctionnement d'une grille de ventilation avec ouverture hygoréglable d'après © Architecture et Climat - LOCI – UCL

Le principe de la tourelle s'appuie sur l'utilisation des vents dominants, en fonction de l'emplacement géographique, couplé avec le phénomène naturel de renouvellement d'air par ascension de l'air chaud vicié. La tourelle est un cube d'1m x 1m x 1m en moyenne pesant entre 50 et 150 kg.

Tableau 11 : Débit d'air en fonction de la vitesse du vent

VITESSE DU VENT	DEBIT D'AIR
VENT EXTERIEUR A 1 m/s	Varie entre 425 m ³ /h et 2347 m ³ /h selon la taille de la tourelle
VENT EXTERIEUR A 5 m/s	Varie entre 1649 m ³ /h et 7038 m ³ /h

Le débit d'air tient compte uniquement des vents externes. Il faut rajouter le débit dû à la stratification thermique. Quelle que soit la direction du vent, la tourelle double flux capte l'air pour rafraîchir le bâtiment et évacuer l'air vicié. Le rafraîchissement de l'air peut s'effectuer en journée ou pendant la nuit.

Il existe différents types de systèmes de ventilation hybride en fonction du type d'extracteur [61] :

- L'**extracteur hybride à assistance non permanente** est équipé d'un dispositif complémentaire permettant d'assurer le mode mécanique en cas de manque de tirage naturel et d'assurer éventuellement l'extraction de débits majorés asservis à une horloge. En mode fonctionnement naturel, l'extracteur fonctionne comme un extracteur statique. En mode fonctionnement mécanique, un ventilateur génère une dépression supplémentaire. Le fonctionnement mécanique est déclenché en fonction des conditions météorologiques et/ou des plages horaires. Ce type d'extracteur est généralement conseillé pour les pièces très peu humides.
- L'**extracteur hybride à assistance permanente** possède une assistance mécanique fonctionnant en continu. Le fonctionnement est aussi déclenché en fonction des conditions météorologiques et/ou des plages horaires et possède trois modes de fonctionnement : assistance minimale (l'extracteur génère une faible dépression), assistance active (en cas de tirage thermique insuffisant, une dépression supplémentaire est générée) et l'assistance à débits majorés (asservis à une horloge). Ce type d'extracteur est généralement conseillé pour les pièces humides.
- Le **système à induction d'air** se compose d'un extracteur statique et d'un ventilateur délocalisé générant de l'air à haute pression permettant d'alimenter plusieurs souches de ventilation. Le principe de fonctionnement consiste à injecter en partie haute, au centre du conduit d'extraction, le jet d'air à haute vitesse. Ce jet d'air primaire entraîne, par effet venturi, l'air vicié. Ce type d'extracteur est généralement conseillé pour les pièces à forte densité de personnes.

OFFRE INDUSTRIELLE

État de l'offre

Il existe plusieurs composants permettant de réaliser un système de ventilation naturelle. Ces composants peuvent être réalisés directement via le système constructif ou en passant par des produits plus industriels. Certains composants sont les mêmes que ceux cités dans la fiche solution de la surventilation. D'autres produits sont spécifiques tels que les tourelles double flux pour le renouvellement d'air (par exemple Kingspan propose le [Windcatcher](#)) ou encore des grilles de ventilation (par exemple les grilles [Sonovent et Renson](#) sont utilisées dans le bâtiment Max Weber décrit page 145). Les tourelles équipées de ventilateurs sont des composants spécifiques à la ventilation hybride (par exemple les tourelles de toiture [ATEC](#)).



Figure 59 : Tourelle de ventilation naturelle Windcatcher © Kingspan [62]



Figure 60 : Tourelle de ventilation traditionnelle Perse, Mahdikarimi70, [CC BY-SA 4.0](#)

Données économiques

À titre d'exemple l'installation de 12 unités Windcatcher sur une école élémentaire de surface 1 262 m² SHON (950 m² SU), coûts : 1 768 k€ HT. Durée du chantier : 13 mois [63]. Les tourelles de renouvellement d'air ATEC valent entre 1000 et 5000 € pour les plus grandes hors pose [64].

NORMES & RÉGLEMENTATION

Normes

La série de normes NF EN 13141 : Ventilation des bâtiments – Essais de performance des composants/produits pour la ventilation des logements, décrit les essais visant à déterminer les caractéristiques de différents éléments intégrant les systèmes de ventilation naturelle et hybride :

- Partie 1 : dispositifs de transfert d'air montés en intérieur ou en extérieur
- Partie 2 : bouches d'air d'évacuation et d'alimentation
- Partie 5 : extracteurs statiques et dispositifs de sortie en toiture
- Partie 9 : dispositifs de transfert d'air hygroréglables montés en extérieur
- Partie 10 : bouche d'extraction d'air hygroréglable.

Traditionnalité

Les procédés de ventilation naturelle et hybride ne sont pas considérés comme traditionnels. Ils ne font l'objet d'aucun NF DTU, Règles Professionnelles ou Recommandations Professionnelles RAGE.

Des procédés de ventilation naturelle et hybride font l'objet d'ATEC, mais leur domaine d'application concerne uniquement la rénovation [64].

Réglementation

L'arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements (modifié par l'arrêté du 28 octobre 1983) fixe les exigences de débit extrait par les dispositifs de ventilation, qu'ils soient mécaniques ou à fonctionnement naturel. Ces exigences doivent être satisfaites dans les conditions climatiques moyennes d'hiver.

Le Règlement Sanitaire Départemental Type (RSDT) fixe les débits d'air neuf par occupant pour les locaux d'enseignement, d'hébergement, assimilés à des bureaux, de réunion, de vente, de restauration et à usage sportif.

Le Code du Travail fixe également des débits d'air neuf par occupant pour les locaux professionnels.

Pour la rénovation, il faut respecter la réglementation en vigueur à la date de la construction. L'AVEMS recommande de se référer aux documents suivants :

- > Règlement sanitaire départemental (arrêté préfectoral)
- > Cahier du CSTB n°3248 « Ventilation des bâtiments »
- > Guide CEGIBAT « Systèmes de ventilation et évacuation des produits de combustion »

Le renouvellement d'air est une source de déperdition thermique. Les solutions mises en œuvre doivent être compatibles avec les exigences de la Réglementation Thermique RT 2012.

Les entrées d'air en façade créent des points singuliers vis-à-vis de la transmission des bruits provenant de l'extérieur. Les solutions mises en œuvre doivent être compatibles avec les exigences réglementaires acoustiques (NRA).



FOCUS BIOMIMETISME [65]

Le renouvellement d'air est un besoin primordial dans le vivant. Les échanges gazeux peuvent être réalisés de différentes manières : par diffusion, convection ou encore différence de pression.

Cette dernière se retrouve par exemple chez les chiens de prairie, qui génèrent des gradients de pression sur la surface du sol, en creusant deux ouvertures à l'extrémité de leurs terriers et créant de sorte, un renouvellement d'air par différence de pression.

Les échanges gazeux dans le vivant impliquent souvent un taux d'humidité élevé au niveau des surfaces d'échange, permettant l'échange d'air par diffusion. Ainsi, la peau des grenouilles par laquelle ils respirent est recouverte de mucus (Figure 61). Sur le même principe, l'intérieur du poumon humain est humide, afin de faciliter l'échange d'oxygène avec la paroi.

Ces stratégies n'ont à ce jour pas d'application dans le bâtiment, soit de façades « humides » permettant un échange gazeux via les parois.



Figure 61 : Grenouille [CC-BY](#)

REFERENCES DE LA FICHE : [46,57,66–69,58–65]

VMC DOUBLE FLUX AVEC RECUPERATION DE CHALEUR

La **ventilation double flux** permet de limiter le recours au chauffage en assurant un renouvellement d'air qui fait appel à un échangeur de chaleur. Celui-ci permet de récupérer les calories de l'air vicié extrait pour les transmettre à l'air neuf qui va être insufflé dans le bâtiment.

Contrairement à la ventilation simple flux l'air neuf ne provient pas d'ouvertures en façade, et est insufflé via un réseau de ventilation dédié.

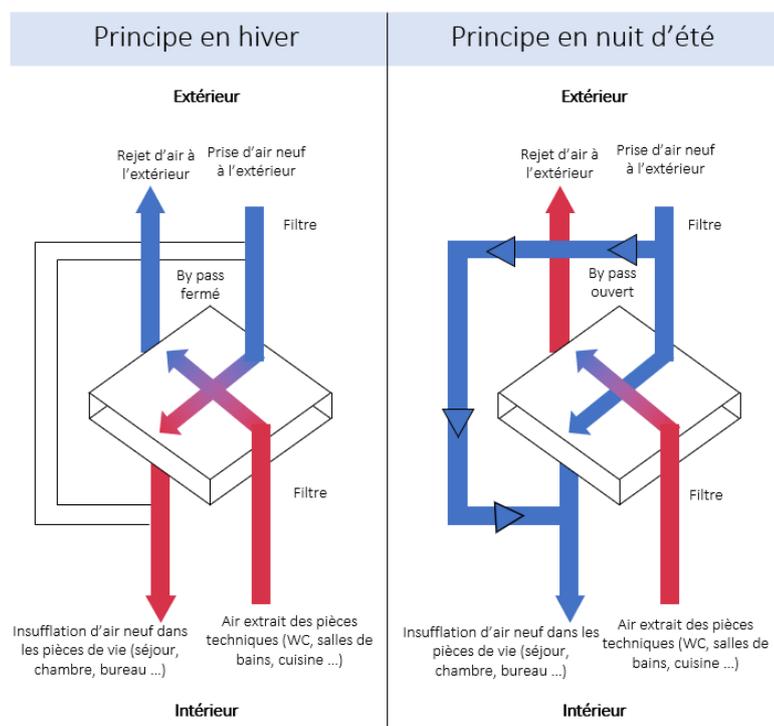


Figure 62 : Principe de fonctionnement d'une VMC double flux avec récupération de chaleur (schéma inspiré de © Eco2travaux.fr)

En hiver, ce système permet de préchauffer l'air (froid) entrant grâce à l'air (chaud) du bâtiment sortant. Cette solution permet donc de récupérer de la chaleur en hiver. L'efficacité des échangeurs actuels permet une récupération de chaleur généralement supérieure à 80 % [44].

En été, lorsque les conditions extérieures sont favorables et que le préchauffage n'a pas d'intérêt, un système de bipasse permet de faire passer directement l'air neuf frais vers l'intérieur du bâtiment [55].

Le plus fréquemment, la ventilation double flux est centralisée sur l'ensemble du bâtiment ou de la zone thermique ventilée. Dans certains cas, par exemple dans des logements collectifs, celle-ci peut être décentralisée au niveau d'un local ou d'un groupe de pièces restreint. La ventilation double flux décentralisée peut alors se faire via un système de ventilation commun qui relie plusieurs échangeurs à chaque groupe de pièce ou alors par le biais de plusieurs groupes de ventilations « miniaturisés » et indépendants directement situés dans les murs et les fenêtres des pièces devant être ventilées. La décentralisation permet de réduire l'encombrement des conduits. Celle-ci permet également de faciliter la gestion de l'équilibrage et des débits par pièce. En contrepartie, l'investissement est plus conséquent en raison de la multiplicité des échangeurs utilisés. Les nuisances acoustiques peuvent être plus importantes à haut débit, car les systèmes sont directement en contact avec les espaces ventilés.



CARACTÉRISTIQUES

Coût

€€€€

Impact Carbone

ccc

Mise en œuvre



Entretien



Adaptabilité



Performance



Durabilité



Intégration

Architecturale



LES (+)

- Bonne maîtrise des débits
- Fonctionnement indépendant des conditions extérieures (climatiques, acoustiques, pollution)
- Amélioration du confort thermique
- Amélioration de la qualité de l'air via le prétraitement de l'air entrant
- Diminution des consommations de chauffage via la récupération de la chaleur contenue dans l'air extrait pour préchauffer l'air neuf pulsé
- Transmission de bruit venant de l'extérieur limitée grâce à l'absence d'ouverture directe en façade
- Possibilité de dimensionner le système pour le rafraîchissement par surventilation nocturne
- Possibilité de couplage avec des puits climatiques.

LES (-)

- Système coûteux à l'investissement
- Consommations électriques supérieures à un système de ventilation simple flux en raison des pertes de charge
- Encombrement important (généralement faux plafond) pour faire passer les conduits
- Nécessaire de contrôler et de limiter les entrées d'air parasite avec une très bonne étanchéité à l'air
- Entretien régulier avec changement de

Il est plus simple d'installer une VMC double flux dans un bâtiment neuf qu'en réhabilitation en raison de l'espace nécessaire à l'encombrement de l'équipement et des gaines de ventilation. Toutefois, il reste possible d'en faire poser une dans le cadre d'une rénovation en procédant à des travaux d'aménagement. Certains types de VMC sont directement conçus pour s'adapter à ce cas de figure.

En raison du ventilateur supplémentaire nécessaire pour l'insufflation et des pertes de charge dans l'échangeur et résultantes de la filtration de l'air neuf, la VMC double flux consomme plus de deux fois plus d'énergie électrique qu'une ventilation simple flux. L'intérêt de VMC double flux doit alors être étudié selon les régions climatiques. Elle sera par exemple plus intéressante dans le nord et le centre de la France (zones climatiques H1a, H1b, H1c, H2a et H2b selon la réglementation thermique 2012) où, du fait d'une saison de chauffe plus longue et plus rigoureuse, la chaleur récupérée permettra de compenser la surconsommation du ventilateur supplémentaire. Dans les régions plus chaudes, une étude au cas par cas devra être réalisée afin d'évaluer l'efficacité globale de ces solutions.

Caractéristiques et données techniques

Le rendement de l'échangeur d'une VMC double flux avec récupération de chaleur non chauffée varie entre 50% et 95% [70].

Une unité de ventilation double flux comprend : un ventilateur d'extraction et un ventilateur d'insufflation, des filtres, un récupérateur de chaleur (échangeur statique à plaques ou rotatif) et un bipasse permettant qu'au moins un des flux ne transite pas par l'échangeur. Ces différents éléments peuvent être combinés en un seul ensemble ou en plusieurs blocs.

Le rendement de la VMC double flux dépend de l'étanchéité à l'air du réseau, de l'étanchéité à l'air du bâtiment et du type d'échangeur utilisé. Il existe deux grands types de récupérateurs de chaleur :

- > Les **récupérateurs de chaleur à échangeur statique** sont des échangeurs à plaques pouvant être à courants croisés (efficacité de 50 à 60%) ou à contre-courants (efficacité de 70 à 95%). Le principe repose sur l'échange de chaleur entre les deux fluides à travers une paroi. Leur mélange est ainsi évité.

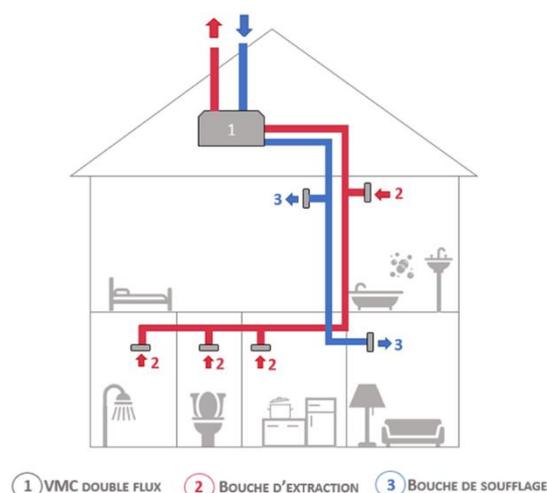


Figure 63 : Éléments d'une VMC double flux

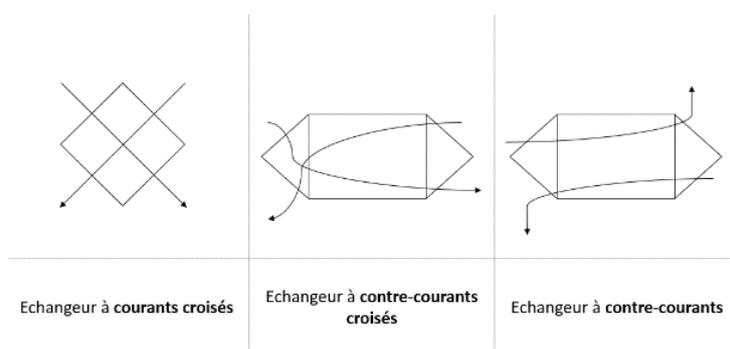


Figure 64 : Différents types d'échangeurs statiques [71]

Dans le cas de l'échangeur à courants croisés, les flux ne font que se croiser alors que pour l'échangeur à contre-courants croisés, ceux-ci sont en contact sur une certaine longueur avant de se croiser. De ce fait, leur efficacité est supérieure. Dans certains cas, la surface de contact est privilégiée sans qu'il y ait de croisement.

- > Les **récupérateurs de chaleur à échangeur rotatif** (efficacité de 60 à 90%) permettent un échange de chaleur sensible entre l'air extrait et l'air neuf au travers d'un matériau accumulateur en rotation. Ces échangeurs peuvent être imprégnés de produit hygroscopique afin de permettre des échanges également d'humidité. Ce type d'échangeur engendre une faible perte de charge, mais nécessite une petite quantité d'énergie pour assurer la rotation. Il est principalement intéressant dans le cas de débit de ventilation supérieur à 2000 m³/h, car est moins imposant qu'un échangeur statique.

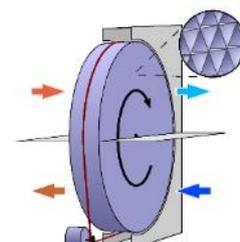


Figure 65 : Principe d'un échangeur rotatif [71]

Pour mettre en œuvre un système de ventilation double flux, une attention supplémentaire doit être accordée à l'étanchéité à l'air du bâtiment. En effet, les fuites de l'enveloppe peuvent faire diminuer le rendement du récupérateur de manière importante et rendre le système installé extrêmement peu rentable. C'est notamment l'une des contraintes de la maison ossature bois où il faut être vigilant à la continuité du freine-vapeur qui sert également de film d'étanchéité à l'air. À cet effet, le « Mémento de conception et de mise en œuvre à l'attention des concepteurs, artisans et entreprises du bâtiment » du CETE Lyon portant sur la gestion de l'étanchéité à l'air fournit de nombreuses recommandations et détails techniques pour les bâtiments à ossature bois [27]. Il est tout aussi important de soigner l'étanchéité à l'air des réseaux de ventilation en visant une classe d'étanchéité C (la meilleure) selon la réglementation thermique 2012. À noter que les classes d'étanchéité B et C nécessitent une mesure in situ qui peut être réalisée en même temps que le test d'étanchéité à l'air.

Afin d'assurer son efficacité, il est nécessaire de placer la VMC double flux et les réseaux de ventilation à l'intérieur du volume chauffé. Lorsque des conduits passent à l'extérieur de l'enveloppe, il faudra veiller à les calorifuger.

Les systèmes de ventilation doivent de façon générale être dimensionnés afin de garantir le respect des débits minimaux exigés par la réglementation en période d'occupation [46]. L'installation n'a pas besoin de fonctionner à plein régime le reste du temps. Afin de diminuer les consommations énergétiques, des stratégies de ventilation doivent être mises en place et peuvent varier selon l'usage des bâtiments. La régulation et la gestion du bipasse sont généralement automatisées. Certains systèmes permettent néanmoins aux usagers d'augmenter les débits de ventilation selon leurs besoins et ressentis. Leur rôle dans la gestion et l'efficacité d'une ventilation double flux est prépondérant. En effet tout comme la gestion de l'étanchéité à l'air, les ouvertures des fenêtres doivent être évitées en période de chauffe pour ne pas faire chuter le rendement du système.

Les bouches d'extraction doivent être nettoyées régulièrement et les filtres changés entre 2 et 3 fois par an. Le système doit aussi être vérifié tous les 3 ans (mesure du tirage et de la dépression, vérification du bloc moteur, ramonage des conduits, vérification du ventilateur).

Les systèmes de ventilation doubles flux peuvent être couplés à d'autres systèmes dont notamment deux autres solutions exposées dans ce guide : le puits climatique et la surventilation nocturne mécanique.

OFFRE INDUSTRIELLE

État de l'offre

Il existe toutes sortes de VMC autoréglables, hygroréglables commercialisées par de grandes marques telles qu'Atlantic, Aldes, Unelvent, Autogyre, Vortice, Vortice. La marque [Sauter Panega](#) propose des VMC double flux à haut rendement fabriquées en France. En hiver, l'échangeur permet de récupérer 92 % des calories de l'air vicié sortant.

La marque [GECO](#) propose deux modèles : le PKOM4 classic adapté à la ventilation, au chauffage, au refroidissement et le PKOM4 trend comprenant les mêmes options ainsi que la production d'eau chaude sanitaire.

Certaines VMC double flux sont adaptées à la rénovation comme celles de la marque [Domotec](#).

Données économiques

Une VMC double flux est plus coûteuse qu'une ventilation simple flux. Son prix varie entre 4000 et 8000 € pour une maison individuelle, pose incluse [72]. Comparativement à une ventilation simple flux, le surinvestissement qui peut excéder 6000€ dans une maison individuelle n'est pas systématiquement compensé par un retour sur investissement en termes d'économie d'énergie. Cela dépend du climat, de la solution de chauffage sélectionnée et du coût des énergies employées [70]. Au-delà des coûts et des gains énergétiques, les gains apportés par une ventilation double flux en termes de confort thermique et de qualité d'air doivent également être considérés dans la décision finale.

NORMES & RÉGLEMENTATION

Normes

La série de normes NF EN 13141 : Ventilation des bâtiments – Essais de performance des composants/produits pour la ventilation des logements décrits les essais visant à déterminer les caractéristiques de différents éléments intégrant les systèmes de ventilation double flux :

- Partie 1 : dispositifs de transfert d'air montés en intérieur ou en extérieur
- Partie 2 : bouches d'air d'évacuation et d'alimentation
- Partie 9 : dispositifs de transfert d'air hygro-réglables montés en extérieur
- Partie 10 : bouche d'extraction d'air hygro-réglable.

Traditionnalité

Les procédés de ventilation double flux pour l'habitat individuel et collectif font l'objet du NF DTU 68.3 P1-1-4 et sont donc considérés comme traditionnels.

Réglementation

L'arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements (modifié par l'arrêté du 28 octobre 1983) fixe les exigences de débit extrait par les dispositifs de ventilation, qu'ils soient mécaniques ou à fonctionnement naturel. Ces exigences doivent être satisfaites dans les conditions climatiques moyennes d'hiver.

Le Règlement Sanitaire Départemental Type (RSDT) fixe les débits d'air neuf par occupant pour les locaux d'enseignement, d'hébergement, assimilés à des bureaux, de réunion, de vente, de restauration et à usage sportif.

Le Code du Travail fixe également des débits d'air neuf par occupant pour les locaux professionnels.

Pour la rénovation, il faut respecter la réglementation en vigueur à la date de la construction. L'AVEMS recommande de se référer aux documents suivants :

- Règlement sanitaire départemental (arrêté préfectoral)
- Cahier du CSTB n°3248 « Ventilation des bâtiments »
- Guide CEGIBAT « Systèmes de ventilation et évacuation des produits de combustion ».

Le renouvellement d'air est une source de déperdition thermique. Les solutions mises en œuvre doivent être compatibles avec les exigences de la Réglementation Thermique RT 2012.

L'arrêté du 30 juin 1999 relatif aux caractéristiques acoustiques de bâtiments d'habitation précise les niveaux à ne pas dépasser. Le niveau de pression acoustique normalisé, LnAT du bruit engendré par une installation de ventilation mécanique en position de débit minimal est limité à 30 dB(A) dans les pièces principales et 35 dB(A) dans la cuisine du logement.

Du point de vue de la qualité de l'air, les VMC double flux sont assujetties aux arrêtés du 24 mars 82 et du 28 octobre 83 qui déterminent des taux de renouvellement d'air hygiéniques dans les logements compris entre 0,40 et 0,50 volumes/ heure.

INTÉGRATION AUX OUVRAGES BOIS

Une autre contrainte spécifique aux maisons à ossature bois ou à tout bâtiment dont le plafond haut est à solives est le risque éventuel de propagation des bruits issus du système de ventilation. Il est nécessaire d'assurer un découplage mécanique pour ne pas transmettre à l'ossature bois des vibrations qui pourraient se trouver plus amplifiées que dans le cas d'autres systèmes constructifs.

FOCUS BIOMIMÉTISME



La récupération de calories est un enjeu majeur pour les espèces animales à sang chaud vivant dans des environnements tempérés ou froids. Plusieurs systèmes communs à différentes espèces marines et terrestres permettent la récupération de calories tels que les échangeurs de chaleur à contre-courant. Ces systèmes sont constitués de vaisseaux sanguins situés au niveau des pattes ou des nageoires. Ce principe permet de récupérer les calories des artères avant d'envoyer le sang dans les pattes de l'animal (Figures 67 et 68). Ce principe correspond aux systèmes de récupération de chaleur déjà existants dans le bâtiment.

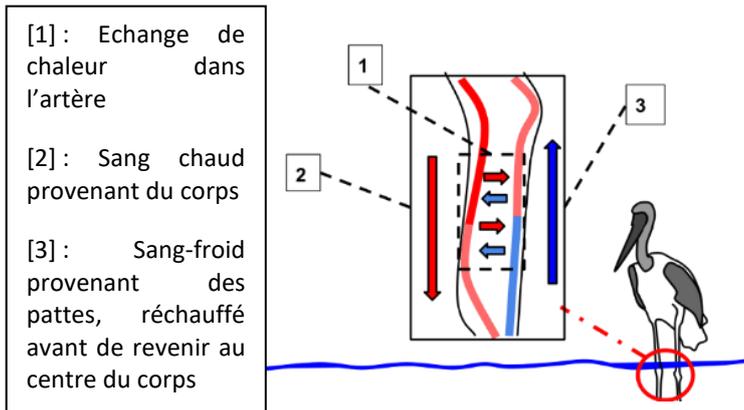


Figure 67 : Système d'échange de chaleur à contre-courant chez les oiseaux © Wikimedia Commons

Figure 66 : Pattes d'oiseau [Pixabay Licence](#)

REFERENCE DE LA FICHE : [46,57,70-73]

FAÇADE DOUBLE-PEAU

La **façade à double peau** permet de limiter le recours au chauffage, à la climatisation et à l'éclairage artificiel en utilisant une peau extérieure permettant d'isoler partiellement la peau intérieure de l'ambiance extérieure tout en apportant une quantité importante de lumière naturelle à l'intérieur du bâtiment et en offrant une protection vis-à-vis du rayonnement solaire lorsque cela est nécessaire. La façade à double peau réalise donc l'enveloppe du bâtiment en assurant l'étanchéité à l'eau et à l'air. Elle est ainsi constituée de deux parois vitrées séparées par une lame d'air où l'une des deux parois vitrées est isolée via l'usage d'un double vitrage. Afin d'éviter les surchauffes estivales, une protection solaire de type store peut être mise en place dans la lame d'air et cette dernière peut être ventilée naturellement ou mécaniquement.

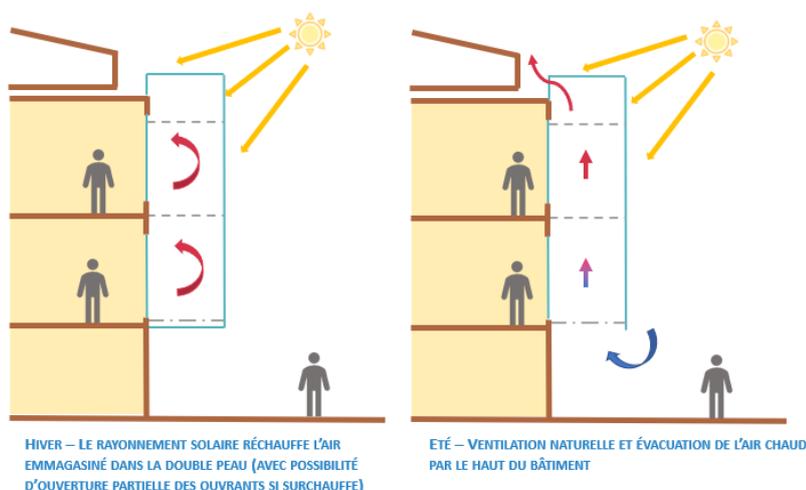


Figure 68 : Principe de la façade à double peau ventilée sur l'extérieur

La lame d'air peut être en communication avec l'extérieur, l'intérieur ou les deux. Lorsqu'elle est en communication avec l'extérieur et l'intérieur du bâtiment, elle fait partie intégrante du système de renouvellement d'air hygiénique en jouant le rôle d'entrée ou de sortie d'air. La façade à double peau peut également être utilisée pour la mise en place d'un système de surventilation nocturne. La position du vitrage isolé (intérieur ou extérieur) va alors dépendre du type de ventilation de la lame d'air.

La peau extérieure isole la peau intérieure de l'ambiance extérieure qui est en contact avec une température de surface plus élevée en hiver et plus faible en été comparativement à une façade simple peau. L'usage d'une protection solaire permet également d'abaisser la température de la peau intérieure en été. Cette solution limite donc les apports de chaleur en été et les déperditions en hiver limitant ainsi le recours au chauffage et à la climatisation. Les protections solaires, si elles sont mobiles, permettent de laisser pénétrer la lumière naturelle en hiver ou lorsque le rayonnement solaire est faible limitant ainsi le recours à l'éclairage artificiel.

La peau extérieure joue également le rôle d'écran acoustique améliorant ainsi la performance vis-à-vis des bruits aériens extérieurs comparativement à une façade simple peau.



CARACTÉRISTIQUES

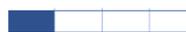
Coût

€€€€

Impact Carbone

ccc

Mise en œuvre



Entretien



Adaptabilité



Performance



Durabilité



Intégration Architecturale



LES (+)

- Réduction des déperditions thermiques du bâtiment ;
- Réduction et contrôle des apports solaires en été ;
- Amélioration de l'accès à la lumière naturelle ;
- Amélioration de l'isolation acoustique ;
- Intégration de la protection solaire qui se trouve protégée des intempéries ;
- Intégration possible d'un système de surventilation nocturne

LES (-)

- Coût de mise en œuvre et de maintenance plus importants comparativement à une façade simple peau ;
- Nécessite une conception rigoureuse pour éviter les contre-performances : par exemple surchauffe en été dû à l'effet de serre provoqué par le vitrage extérieur, ou encore condensation dans la lame d'air, ou même risque de casse thermique des vitrages ;
- Perte de surface utile due à l'épaisseur de la lame d'air entre les peaux de la façade ;
- Complexité d'intégration des ouvrants pompiers qui doivent permettre de traverser les deux peaux de la façade.
- Complexité d'intégration

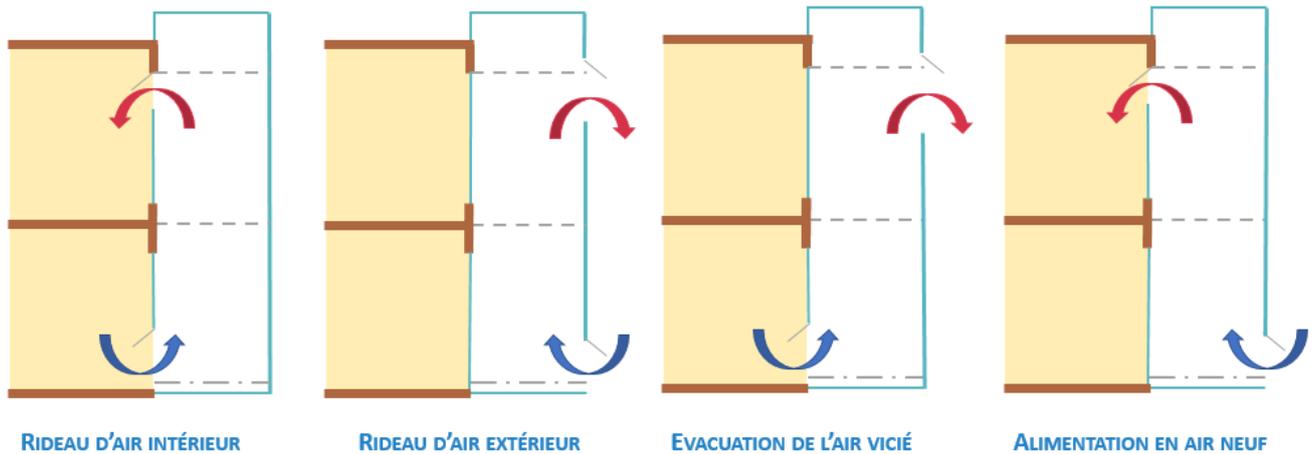


Figure 69 : Différents types de ventilation de la lame d'air

Domaine d'emploi

La façade double peau peut-être mise en œuvre en construction neuve comme en rénovation. Elle est particulièrement adaptée aux bâtiments tertiaires pour lesquels elle permet un apport important de lumière naturelle tout en offrant des performances thermiques intéressantes.

Ce type de façade présente un intérêt en exposition sud. En exposition nord elle offre uniquement un intérêt acoustique ne permettant pas de justifier sa mise en œuvre.

Caractéristiques et données techniques

La façade à double peau peut être constituée de deux façades à ossatures indépendantes, elle est alors dite « multiple ». Elle peut aussi être constituée d'une seule ossature, elle est alors dite « multi-parois ».



Figure 70 : Université de Bordeaux - photo par NOBATEK/INEF4

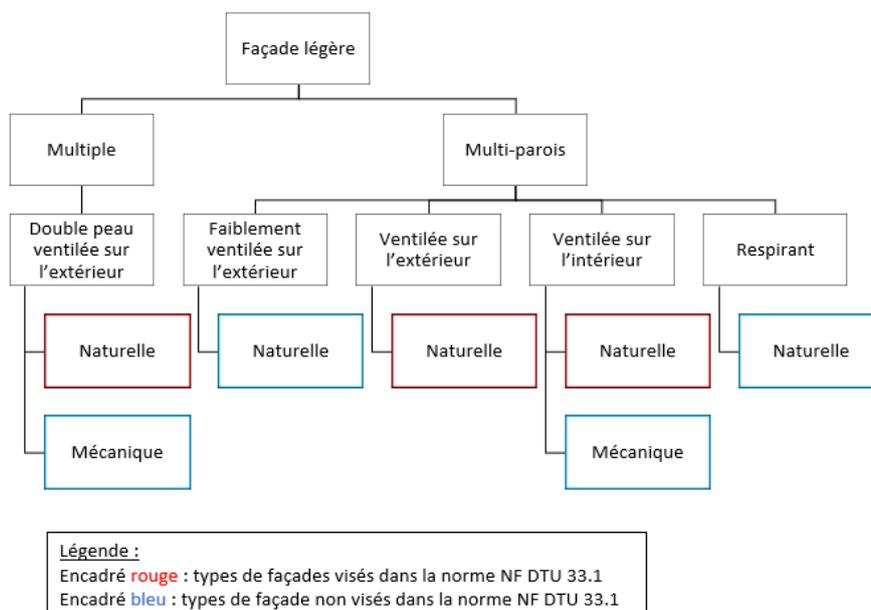


Figure 71 : Différents types de façade à double peau, d'après [1]

La façade respirante présente la particularité de ne pas avoir de lame d'air ventilée. La lame d'air est simplement mise en communication avec l'ambiance extérieure au moyen d'ouvertures toutes placées sur une même ligne horizontale. Cette mise en communication permet l'équilibrage de la pression partielle de vapeur d'eau avec l'extérieur de manière à éviter la condensation dans la lame d'air.

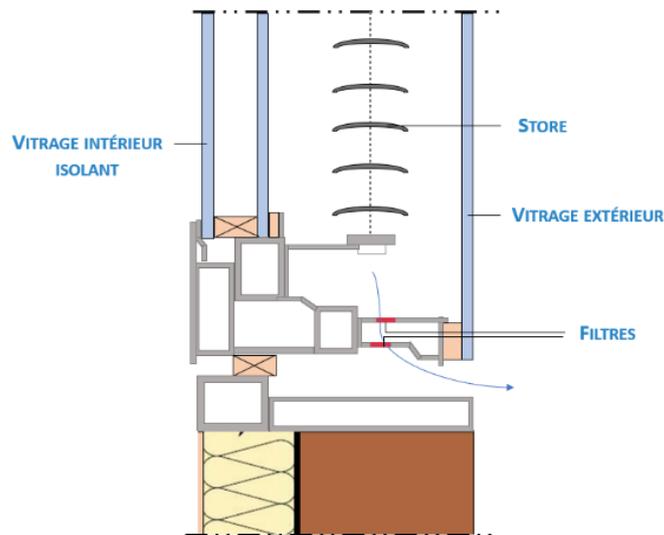


Figure 72 : Principe de la façade respirante (d'après © CSTB)

Le choix du type de façade à double peau va dépendre des performances thermiques et acoustiques visées ainsi que de la stratégie de ventilation du bâtiment. Les principaux paramètres de conception sont listés ci-dessous :

- Caractéristiques de ventilation de la lame d'air (sens de circulation du flux d'air, ventilation naturelle ou mécanique, débits de ventilation, ventilation par niveau ou toute hauteur, ...)
- Types de vitrage intérieur et extérieur ;
- Présence d'ouvrant dans la peau intérieure ;
- Épaisseur de la lame d'air ;
- Caractéristiques des éventuelles protections solaires (store, film réfléchissant) ;
- Lois de pilotage des ouvertures basses et hautes de la lame d'air.

OFFRE INDUSTRIELLE

État de l'offre

Les entreprises HBS FRANCE SARL, RINALDI STRUCTURAL et SCHUCO INTERNATIONAL SCS proposent des solutions de façade à double peau respirante sous-évaluation technique (ATec ou DTA).

De nombreuses entreprises comme COVERIS, sont spécialisées dans la conception et la construction de façades vitrées. Elles sont en mesure de réaliser des façades double-peau.

Données économiques

La façade à double peau représente un surcoût à la mise en œuvre compris entre 1,5 fois et 2 fois comparativement à une façade simple peau [74].

NORMES & RÉGLEMENTATION

Normes

Certains procédés de façade à double peau sont considérés par le NF DTU 33.1 et sont donc qualifiés de techniques traditionnelles. Il s'agit des procédés avec lame d'air naturellement ventilée (sauf lame d'air faiblement ventilée) :

NF DTU 33.1 P1-1 : Travaux de bâtiment – Façades rideaux – Partie 1-1 : Cahier des clauses types ; 2008

Les produits de façade à double peau considérés par le NF DTU 33.1 font l'objet d'une norme produit :

NF EN 13830 : Façades rideaux – Norme de produit ; 2015

Traditionnalité

Les procédés de façade à double peau non considérés par le NF DTU 33.1 sont considérés comme non traditionnels. Il s'agit des procédés avec lame d'air faiblement ventilée ou ventilée mécaniquement. Les procédés de façades dites respirantes sont également considérés comme non traditionnels.

Certaines parties du NF DTU 39 peuvent être utiles pour définir les propriétés des vitrages de la façade double peau :

NF DTU 39 P3 : Travaux de bâtiment – Travaux de vitrerie-miroiterie – Partie 3 : Mémento calculs des contraintes thermiques ; 2006

NF DTU 39 P4 : Travaux de bâtiment – Travaux de vitrerie-miroiterie – Partie 3 : Mémento calculs pour le dimensionnement des vitrages ; 2012

NF DTU 39 P5 : Travaux de bâtiment – Choix des vitrages en fonction de l'exposition aux risques de blessures – Partie 5 : Mémento pour les maîtres d'œuvre ; 2017

Certains de ces procédés font l'objet d'une évaluation technique

- ATec 2.1/14-1608_V2 : Façade légère respirante MECANO RESPIRANT. Validité jusqu'au 28/02/2021
- ATec 2.1/15-1669_V1 : Façade légère respirante STRUCTAL 20. Validité jusqu'au 30/06/2024
- DTA 2.1/13-1538_V1 : Façade légère respirante SFC 85 RESPIRANT. Validité jusqu'au 31/01/2023

Aucune évaluation technique portant sur un procédé de façade à double peau avec lame d'air faiblement ventilée ou ventilée mécaniquement n'a été identifiée.

Réglementation

La façade à double peau constitue l'enveloppe du bâtiment. De ce fait, elle a un impact sur la performance thermique et acoustique du bâtiment. La mise en œuvre de cette solution doit alors être compatible avec le respect des exigences réglementaires thermique (RT 2012) et acoustiques (NRA).

Les systèmes de façades se doivent également de respecter les exigences réglementaires parasismiques et de sécurité incendie.

INTÉGRATION AUX OUVRAGES BOIS

Le NF DTU 33.1 couvre l'exécution de façades neuves sur ossature primaire bois neuve ou existante, destinées à la réalisation de tous types de bâtiments [75].

Les évaluations techniques identifiées pour les procédés de façade respirante n'excluent pas la mise en œuvre sur structure bois.

Les systèmes constructifs poteaux-poutres bois se prêtent particulièrement bien à la mise en œuvre d'une façade à double peau. Les poteaux et poutres forment l'ossature primaire sur laquelle vient se fixer le système de façade à double peau. Cela présente également l'avantage de gommer les ponts thermiques engendrés par les ossatures en les traitant directement via la double peau.



FOCUS BIOMIMÉTISME

De nombreuses espèces créent une double peau ou un micro climat afin d'améliorer leur environnement proche. Les architectures animales telles que les nids, fourmilières ou encore terriers sont des formes de « doubles-peaux » ou « extension de l'organisme » qui permettent des adaptations thermiques, hygrométriques, etc. Dans la même lignée, les enveloppes du vivant telles que les peaux, les poils, les plumes, peuvent être assimilées à des stratégies de double peaux permettant la régulation thermique.

Les enveloppes telles que poils et plumes ont la particularité de permettre une isolation variable à l'échelle de la journée ou des saisons. Poils et plumes sont renouvelés et densifiés afin de renforcer l'isolation lors des périodes les plus froides. Ils peuvent également être « gonflés » durant la journée afin d'améliorer ponctuellement l'isolation (Figure 73).

Dans le cadre de la construction bois, des systèmes de façade similaires pourraient être envisagés où l'enveloppe du bâtiment intégrerait des matériaux aux propriétés géométriques variables allant d'une légère dilatation du matériau à un gonflement plus important. Dans la même lignée, le principe de double peau dans le bâtiment peut permettre d'adapter ce principe en intégrant une couche d'air isolante à température et isolation variable suivant les saisons. À ce jour, il n'existe pas de transferts technologiques directs de ces observations biologiques excepté dans le cadre du projet Armadillo Box du Solar Decathlon.



Figure 73 : Gonflement du plumage d'un rouge-gorge permettant l'augmentation de l'isolation, [Pixabay Licence](#)

REFERENCES DE LA FICHE : [74–79]

VITRAGES A PROPRIETES VARIABLES

Les **vitrages à propriétés variables** permettent de limiter le recours à la climatisation, au chauffage et à l'éclairage artificiel en faisant varier le facteur solaire et la transmission lumineuse selon les besoins en apports solaires et en lumière naturelle.

Les vitrages à propriétés variables intègrent des matériaux chromogènes⁴ dont les propriétés optiques varient automatiquement sous l'effet de la chaleur ou de la lumière ou à la demande sous l'effet d'un courant électrique. Plusieurs dénominations leur sont attribuées : verre intelligent, verre commutable, verre actif, verre adaptatif, verre dynamique.

Ces vitrages peuvent être classés en trois grandes catégories selon leur modalité de mise en action :

- **Les vitrages électrochromes ou électrochromiques** : ces vitrages sont constitués de verres multicouches. Certaines couches sont couvertes d'un revêtement nanométrique. Deux couches transparentes servent d'électrodes. L'orientation des nanoparticules est modifiée sous l'action d'un courant électrique très basse tension entre ces deux électrodes. Les couches intermédiaires revêtues s'assombrissent alors le plus souvent avec une teinte bleue.
- **Les vitrages thermochromes ou thermotropes** : ces vitrages sont constitués de verres qui modifient automatiquement leurs propriétés optiques sous l'effet d'un processus chimique ou physique initié par un changement de température. Le vitrage passe de manière réversible d'un état transparent à un état plus sombre pouvant être réfléchissant.
- **Les vitrages photochromes** : le verre de ce vitrage a la capacité de modifier ses propriétés optiques automatiquement sous l'action de la lumière ultraviolette. Ce sont les verres polarisants utilisés pour les lunettes de soleil.

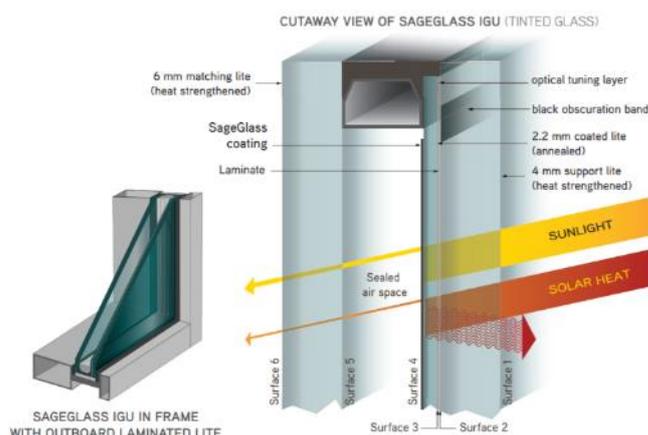


Figure 74 : Composition d'un vitrage électrochrome. SageGlass®



CARACTÉRISTIQUES

Coût

€€€€

Impact Carbone

C

Mise en œuvre



Entretien



Adaptabilité



Performance



Durabilité



Intégration Architecturale



LES (+)

- Permettent une régulation thermique adaptative selon la saison
- Contribuent à l'amélioration du confort thermique et limitent les besoins en énergie (chauffage et refroidissement) sans ajout de systèmes supplémentaires
- Améliorent la qualité de l'éclairage naturel en limitant les contre-jours et l'éblouissement tout en laissant la lumière naturelle pénétrer dans une pièce
- S'adaptent aux usages en termes de besoins de privatisation pour les vitrages pouvant être opacifiés à la demande (par exemple dans les salles de bain)
- Pas besoin d'entretien pour les verres thermochimiques.

LES (-)

- Prix d'investissement élevé
- Effet limité lorsque la température à l'ombre est très élevée par rapport la température ambiante de confort
- Engendre un poids additionnel
- Nécessite une alimentation électrique pour certains produits.

⁴ Se dit d'une substance susceptible de produire un pigment ou de permettre la pigmentation

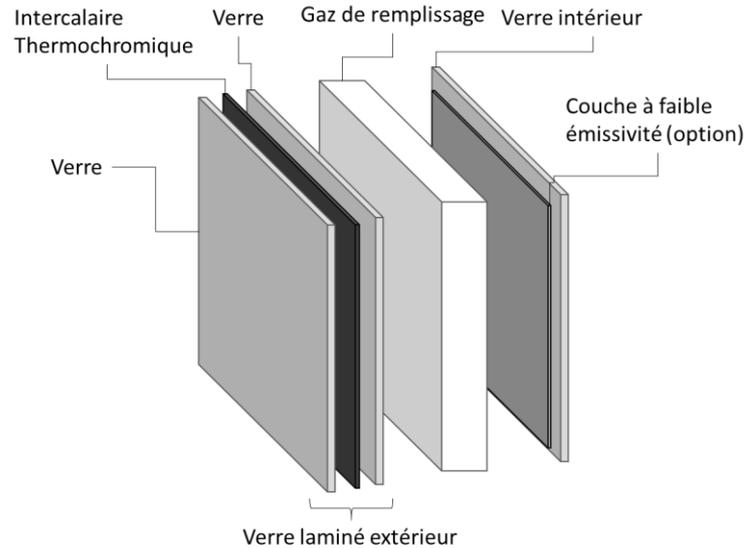


Figure 75 : Composition d'un vitrage thermochimique

Domaine d'emploi

Les vitrages à propriétés variables sont généralement utilisés dans des bâtiments tertiaires et peuvent être adaptés à tout type de bâtiment.

Caractéristiques et données techniques

Paramètres de gestion et régulation

Le contrôle du degré de teinte, le paramétrage et l'automatisation d'ouverture des vitrages peuvent se faire à l'aide d'un système de gestion centralisé pour le bâtiment, de tablettes, ou interrupteurs muraux.

Paramètres de conception

Il va s'agir principalement de sélectionner le type de vitrage à propriété variable et son mode d'action. La variation des propriétés des vitrages thermochromes dépend par exemple des propriétés intrinsèques du vitrage lui-même et de l'orientation du bâtiment. Un exemple de variation d'énergie entrante via les apports solaires est donné à titre indicatif par le fabricant KELIOS®.

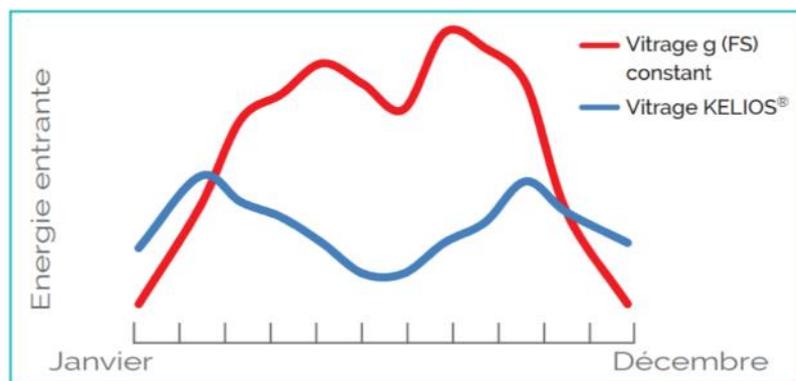


Figure 76 : Exemple de variation des apports solaires entrants au cours de l'année avec un vitrage thermochrome ©KELIOS

Illustrations



Vitrages électrochromes SageGlass® de la médiathèque Confluence de Lodève inaugurée en avril 2019



Vitrages thermochromiques KELIOS® mis en oeuvre sur le Panoramique des Domes, Clermont-Ferrand (Lamellé Collé)

OFFRE INDUSTRIELLE

État de l'offre

Double vitrage électrochrome SageGlass® de SAINT GOBAIN : le vitrage peut aller de 60 % (état clair) à 1 % (bleu-gris) de transmission lumineuse, avec un facteur solaire compris entre 40% et 5%. En comparaison, le facteur solaire recommandé d'un bâtiment léger est de 36% à l'Est, 50% au Sud et 35% à l'Ouest [80]. La commande est automatique ou manuelle et la vitesse de commutation est de 5 à 15 minutes. Une application mobile permet à l'utilisateur de contrôler le niveau d'opacité du vitrage. Le poids du vitrage est de 26 kg/m². Le coefficient de déperdition thermique $U = 1.1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. En général, U varie entre 0,8 et 1,2 $\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ pour un vitrage classique d'une maison passive [81].



Figure 77 : Sageglass © Saint Gobain

Double vitrage thermochimique Prel-Shade de PRELCO (Canada) ou Fledmex Thermochrome (Allemagne) : ces vitrages contiennent une couche de cristaux liquides ou d'oxydes métalliques spécifiques et modifient leur teinte en fonction de la température. Ces verres s'adaptent à tous les supports de vitrage et ne nécessitent aucun branchement ou apport d'énergie pour leur fonctionnement qui dépend de la température. La commutation met de 20 à 30 minutes pour que le verre atteigne sa teinte la plus foncée. Dans le cas du vitrage Prel-Shade, la pellicule thermochromique contient notamment des nanoparticules d'oxyde de vanadium, qui changent de phase et de propriétés semi-conductrices entre 25 et 65 degrés Celsius. Le taux de transmission lumineuse oscille entre 10% et 50%, selon la température du verre.

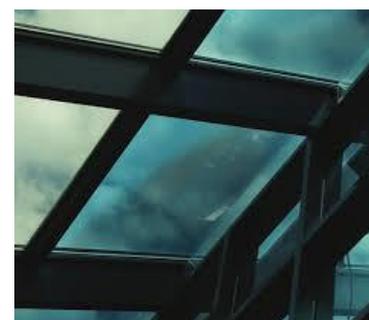


Figure 78 : Prel-Shade © PRELCO

Le double vitrage thermochromique Suncool® Dynamic de Pilkington offre une gamme de produits dont les coefficients de déperdition thermique varient de 0,7 à 1,1 W/m².K selon le produit. La transmission lumineuse et le facteur solaire peuvent quant à eux varier de 8% à 56% et de 14% à 46% respectivement selon les produits. Aucun dispositif électrique n'est nécessaire pour faire varier les propriétés.

Le double vitrage thermochromique KELIOS® de la société SECM présente également une gamme. Ce vitrage propose une gamme de transmission lumineuse pouvant varier de 10% à 60% et de facteur solaire de 10 à 35%. Il est également décliné pour le triple vitrage avec un coefficient de déperdition thermique de 0.6 W/(m².K).



Figure 79 : © SUNCOOL™
DYNAMIC

Les vitrages photochromes sont rarement développés pour la construction.

Données économiques

Les vitrages à propriétés variables sont réputés pour être 3 à 5 fois plus coûteux que des vitrages standards hors main d'œuvre. Ce surcoût peut être compensé en partie par les gains énergétiques et l'amélioration de confort qu'il procure.

NORMES & RÉGLEMENTATION

Normes

Les vitrages à propriétés variables peuvent entrer dans le domaine d'application de la norme NF EN 1279-1 portant sur les vitrages isolants pour la construction. Celle-ci n'impose pas de marquage CE pour les produits.

Concernant les vitrages électrochrome, l'organisme de normalisation ASTM INTERNATIONAL est à l'origine de la norme ASTM E2141-14 qui définit une méthode d'essai pour le vieillissement accéléré des dispositifs électrochromes dans des vitrages isolants scellés.

Traditionnalité

Aucun NF DTU, Recommandation Professionnelle RAGE ou Règle Professionnelle ne porte sur les procédés de vitrage à propriétés variables. Il s'agit donc de procédés non traditionnels.

Deux procédés de vitrage à propriétés variables font l'objet d'une évaluation technique et sont donc reconnus comme des techniques courantes :

- Document Technique d'Application Référence Avis Technique 6/18-2387_V1 : SageGlass® - NF EN 1219
- Document Technique d'Application Référence Avis Technique 6/19-2393_V1 : KELIOS® - NF EN 1279

Ces évaluations techniques sont des DTA ce qui signifie que les produits sont marqués CE.

Réglementation

Les vitrages d'une construction influencent le respect des exigences relatives à la réglementation thermique RT 2012. Les propriétés des vitrages (coefficient de transmission thermique et facteur solaire) vont influencer la valeur des indicateurs Bbio et Tic.

Les parois vitrées forment l'enveloppe du bâtiment et leur performance acoustique influence le respect des exigences d'isolement acoustique vis-à-vis des bruits extérieurs.

Pour les locaux affectés au travail, les vitrages vont permettre d'atteindre les niveaux d'éclairage minimum.

INTÉGRATION AUX OUVRAGES BOIS

L'ATEC SageGlass précise que le champ d'application est valable pour tous les systèmes constructifs dont le bois.

Les vitrages thermochromes, thermotropes et photochromes ont l'avantage de bloquer les rayons ultraviolets et donc la décoloration des éléments exposés en comparaison à des vitrages standards. Cela est également le cas pour les vitrages électrochromes lorsqu'ils sont enclenchés.

FOCUS BIOMIMÉTISME

Nombreuses sont les espèces qui ont la capacité de faire varier le facteur solaire et la transmission lumineuse. Ces propriétés s'expriment par exemple à l'échelle de l'enveloppe corporelle de certaines espèces de reptiles. Les lézards et caméléons ont par exemple la particularité de faire varier la couleur de leur peau. La contraction des muscles à la surface de leur enveloppe déforme les cellules pigmentaires, modifiant la distribution des pigments à l'intérieur des chromatophores. Concentrés, ces pigments forment seulement un petit point peu visible, tandis que dispersés, ils sont bien visibles.



Figure 80 : Caméléon à l'enveloppe aux propriétés variables © Flickr

Le principe de variation de la transmission lumineuse au travers de la façade a été implémenté dans le cadre d'un pavillon de recherche par un étudiant de l'université de Stuttgart. Ce pavillon nommé Breathing Skin est inspiré de la porosité de la peau (Figure 82). La façade est composée de cellules gonflables individuelles et maintenues entre deux couches de plexiglass en façade. Elles peuvent être gonflées suivant le besoin d'opacité. Lorsqu'elles sont gonflées, elles limitent la transmission de la lumière. (Figure 82 et Figure 81).

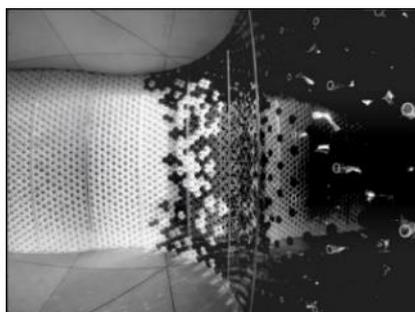


Figure 83 : Pavillon Breathing Skin, vue intérieur © Tobias Becker

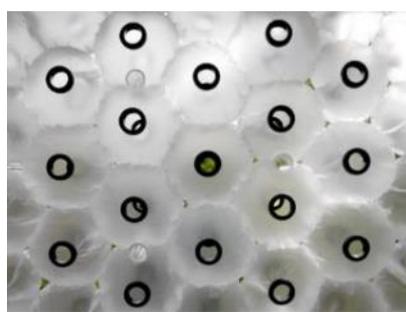


Figure 82 : Pavillon Breathing Skin cellules gonflées © Tobias Becker

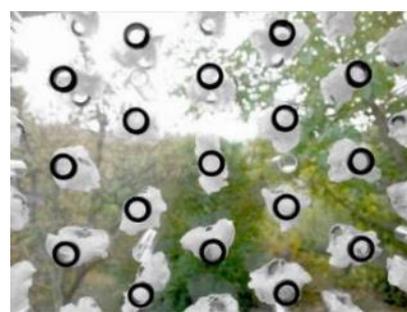


Figure 81 : Pavillon Breathing Skin cellules dégonflées © Tobias Becker

Cette technologie aujourd'hui peu mature (TRL = 6), mais en cours de développement pourrait être implémentée en façade dans le cadre d'une construction bois. Elle permettrait un contrôle de l'opacité de la façade soit par capteur du flux lumineux, soit par les usagers du bâtiment. Notons cependant qu'elle aurait un coût énergétique.

REFERENCES DE LA FICHE : [82–85]

BRISE-SOLEIL ORIENTABLE

Les brise-soleils orientables (BSO) permettent de limiter le recours à la climatisation en modulant les apports solaires et donc en évitant les surchauffes d'un bâtiment tout en maintenant l'accès à la lumière naturelle.

Les brise-soleils orientables sont à distinguer des brise-soleils classiques fixes. La mobilité des brise-soleils est manuelle ou électrique. Dans ce dernier cas, la motorisation peut être contrôlée automatiquement via des capteurs de luminosité ou peut être actionnée par l'utilisateur (via une télécommande ou une application smartphone) [39]. Les brise-soleils mobiles sont inclinables selon :

- Un cycle journalier (inclinaison selon le mouvement journalier du soleil)
- Un cycle intersaison (selon les trajectoires saisonnières du soleil)

Domaine d'emploi

Les brise-soleils mobiles sont particulièrement intéressants pour les bâtiments de bureau qui sont généralement très vitrés et où les surchauffes et l'accès à la lumière naturelle sont des sujets auxquels une attention particulière doit être apportée afin de garantir le confort des usagers.

Les brise-soleils mobiles sont généralement appréciés sur les façades Ouest et Est, là où les brise-soleil fixes n'apportent pas une réponse satisfaisante de façon permanente. Sur ces orientations, la protection vis-à-vis du rayonnement solaire n'est utile qu'une partie de la journée.

Caractéristiques et données techniques

Paramètres de conception

Les principaux matériaux utilisés pour le brise-soleil sont le bois, le PVC, l'aluminium (extrudé ou non) et l'acier.

Il existe différentes formes de lames de brise-soleil : les lames ajourées en forme d'ellipse, les lames chevrons (non ajourées) et les lames arasées ajourées.

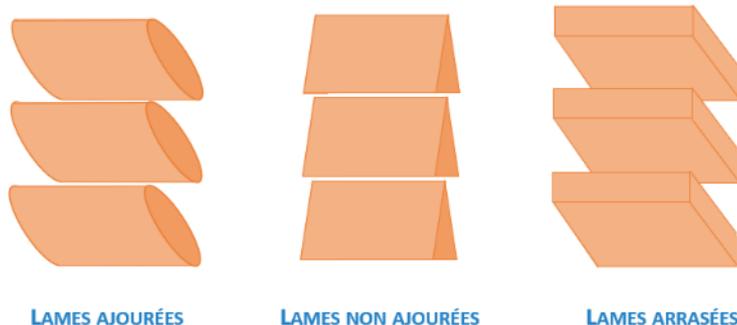


Figure 84 : Types de lames des brise-soleils



CARACTÉRISTIQUES

Coût

€€€

Impact Carbone

cc

Mise en œuvre



Entretien



Adaptabilité



Performance



Durabilité



Intégration



Architecturale

LES (+)

- Orientation des lames réglables en fonction de la luminosité souhaitée tout en garantissant une occultation totale en position fermée.
- Permet de ventiler la nuit tout en garantissant une sécurité car résistant au vent et aux intrusions.
- Régulation intelligente s'adaptant aux variations extérieures de température
- Adaptable aux bâtiments en rénovation et neufs.
- Très simple d'utilisation.

LES (-)

- Un BSO est environ deux fois plus cher qu'un volet roulant traditionnel.
- Le déroulement d'un brise-soleil peut être légèrement bruyant.
- La gestion d'un BSO est plus complexe que pour un système traditionnel manuel. La domotique et les capteurs de température nécessitent de l'entretien et de l'attention.
- Dans certains cas, un BSO nécessite une autorisation de la copropriété.
- Étude de dimensionnement pour assurer la résistance des BSO aux efforts de vent selon les règles de calcul applicables ou mise en place d'un anémomètre pilotant le relevage des stores à partir de la valeur fixée par le fabricant.
- Complexité d'intégration

D'autres types de lames moins répandus, en forme de C ou de Z, permettent d'obtenir une obscurité complète en position fermée. [86,87]

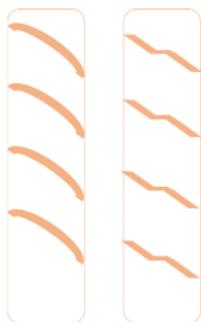


Figure 85 : Lames en forme de Z et de C vues en coupe

Paramètres de gestion

Un BSO est équipé d'un moteur radio télécommandé. L'utilisateur règle l'inclinaison et l'orientation des lames pour obtenir l'occultation souhaitée. Plusieurs appareils de mesure peuvent être mis en place pour régler l'inclinaison des lames orientables. Les capteurs solaires, placés à l'extérieur, mesurent les rayons solaires arrivant sur la maison. Il faut être vigilant à placer les capteurs dans un endroit représentatif et loin des masques solaires. Les programmeurs de brise-soleil les plus élaborés comprendront aussi des thermomètres à placer dans les pièces de la maison concernées. Cela permet de mieux calculer l'apport solaire par rapport aux besoins de la maison. Certaines marques proposent même des modules pilotant à la fois le chauffage et les apports solaires des stores.

Certains brise-soleils peuvent s'incliner différemment sur la partie haute ou basse de la fenêtre, une technologie qui peut être pratique pour une installation en bureau par exemple.

Paramètres de régulation

Grâce à l'inclinaison des lames orientables, certains brise-soleils permettent de ne contrer qu'une partie du rayonnement solaire pour pouvoir bénéficier d'un éclairage naturel suffisant tout en limitant l'éblouissement.

Inclinaison inter saisonnière : un brise-soleil orientable est une bonne formule pour ombrager des ouvertures, car la ronde des saisons ne correspond pas exactement à la course annuelle du soleil.

Dans l'hémisphère nord, le milieu de la saison chaude ne coïncide pas avec le jour le plus long de l'année (21 juin) et le milieu de la saison de chauffage intervient bien après le jour le plus court (21 décembre). En outre, un brise-soleil extérieur fixe donne la même ombre le 21 septembre, alors qu'il fait relativement encore chaud, et le 21 mars, alors qu'il fait souvent froid. Grâce à l'inclinaison de ses lames, le brise-soleil permet alors d'adapter l'ombrage souhaité en fonction de la saison.

En hiver, le brise-soleil fermé isole la nuit les surfaces vitrées contre l'hypothermie.

Inclinaison journalière : il est avantageux d'orienter les lames en position ouverte de préférence le matin afin de bénéficier d'un maximum de rayonnement solaire et d'orienter les lames en position fermée au milieu de la journée afin d'éviter la surchauffe au sein de la pièce.

Positionnement des lames : les lames horizontales sont efficaces en été en façades sud et sud-est/sud-ouest. En hiver, en fonction de leurs dimensions, elles contrarieront peu ou pas du tout l'arrivée du rayonnement solaire, car le soleil est bas dans le ciel.

Les lames verticales ont peu d'efficacité en été et contrarient, en hiver, l'apport solaire en façades est et ouest. De ce fait, ils sont rarement conseillables.



Figure 86 : Brise-soleils verticaux à lames horizontales coulissantes DUCOSLIDE LUXFRAME ©Duco

Déroulement du brise-soleil : le déroulement des brise-soleils peut se faire selon deux types : mécanisme à lacette ou mécanisme en métal. [88] La lacette est un cordon qui assure la montée et la descente de la lame finale (barre de charge). Les boucles situées aux extrémités de chaque lame assurent l'orientation et le bon empilement des lamelles afin que le BSO gagne en compacité.

Le mécanisme métallique permet l'empilement, l'orientation, mais aussi le verrouillage des lames grâce à un système à chaîne et pantographe intégrés dans les coulisses. Ce type de mécanisme assure une bonne protection contre les intrusions et une bonne résistance au vent. Néanmoins, les mécanismes métalliques peuvent être jusqu'à trois fois plus chers que les mécanismes à lacette.

Moins courants, les brise-soleils en verre permettent de refléter le rayonnement. Ils peuvent être plus au moins teintés à la fabrication en fonction de la luminosité souhaitée et certaines lames peuvent être équipées de cellules photovoltaïques.

OFFRE INDUSTRIELLE

De nombreux produits existent sur le marché. À titre d'exemple et de façon non exhaustive, les produits suivants peuvent être cités : Prodex, [Tellier](#), [Ducosun](#), Feal, [Profalux](#), [Flip protection solaire](#), [Model System Italia](#)

La gamme de lames [LIGNITI™](#) du fabricant airsun offre une gamme de BSO en bois permettant une grande liberté architecturale et une installation sur tout type de bâtiment. Les essences de bois proposées en standard (Cèdre rouge occidental, Chêne européen, Mélèze occidental, Accoya® ...) ont non seulement été sélectionnées pour leur qualité, durabilité et résistance, mais aussi pour leur provenance, dans un souci de respect de l'environnement.

L'entreprise anglaise colt développe des brise-soleils orientables en verre équipés de cellules photovoltaïques appelés « [Shadovoltaic](#) ». Les cellules monocristallines et polycristallines peuvent être utilisées. Les cellules photovoltaïques peuvent être intégrées dans le verre, soit en les fixant sur l'envers des panneaux de verre soit en les plaçant entre deux lames de verre.

Une variante similaire aux BSO sont les solutions développées par IMMOBLADE : le [verre feuilleté sérigraphié](#) et le [MiniStore](#). Ces technologies sont conçues pour offrir un facteur solaire variable en fonction de la saison avec un système fixe intégré dans le double vitrage. La technologie sérigraphiée est constituée de stries inclinées reproduites sur plusieurs épaisseurs du vitrage feuilleté d'une épaisseur total de 12mm. La technologie du MiniStore est composée de mini-lames de 10mm qui sont directement intégrées dans un double vitrage standard. Les stries et les lames des deux technologies sont inclinées de façon optimale par rapport à l'orientation et localisation de la façade. Associé à des vitrages de verre clair, ce système permet de garder une transmission lumineuse élevée, permettant d'assurer le confort visuel des usagers du bâtiment, tout en proposant un facteur solaire très faible - de l'ordre de 20% - en été. Non seulement le système ne demande aucun entretien, mais il autorise un nettoyage de fenêtre sans les contraintes que posent habituellement les brise-soleil orientables. Les points négatifs principaux des systèmes BSO sont ainsi inexistant dans cette solution.

NORMES & RÉGLEMENTATION

Normes

Les stores et brise-soleils destinés à être fixés à l'extérieur font l'objet de la norme européenne harmonisée NF EN 13561 qui impose le marquage CE.

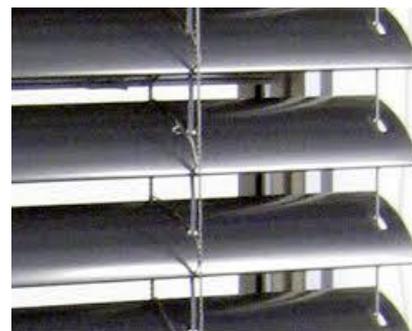


Figure 87 : Mécanisme à lacette d'un brise-soleil © Franciaflex



Figure 88 : Détail du système à chaîne et pantographe d'un brise-soleil métallique – © Baumann Hüppe



Figure 89 : Brise-soleil avec lames en verre et cellules photovoltaïques © Wikimedia Commons



Figure 90 : MiniStore ImmoBlade – système de brise-soleil fixe à propriétés variables intégré au vitrage

Traditionnalité

Les procédés de brise-soleil orientable de type store font l'objet du NF DTU 34.4 et sont donc considérés comme traditionnels.

Plusieurs procédés de BSO de type store font également l'objet d'évaluations techniques et sont donc considérés comme des techniques courantes.

Aucun document de référence ne semble porter sur les autres types de brise-soleils orientables que les stores.

Réglementation

Les brise-soleils orientables limitent le rayonnement solaire incident sur les parois vitrées. Leur présence doit être prise en compte pour l'évaluation de l'ouvrage vis-à-vis de la Réglementation Thermique 2012 (impact sur les indicateurs Bbio et Tic).

Les BSO peuvent également avoir une influence sur les niveaux d'éclairage exigés pour les locaux destinés au travail.

INTÉGRATION AUX OUVRAGES BOIS

Les brise-soleils orientables peuvent être d'une grande utilité pour limiter finement les apports solaires. Cela est d'autant plus intéressant pour des bâtiments bois à faible inertie où il est important de réduire l'ensemble des apports de chaleur afin de limiter les surchauffes estivales. En effet contrairement à des bâtiments à forte inertie la température intérieure peut augmenter rapidement. La stratégie consiste alors à déployer plusieurs solutions pour limiter drastiquement tout apport. Couplée à un système de surventilation et à une sensibilisation efficace des usagers, cette solution est souvent suffisante pour maintenir un confort estival adéquat.



FOCUS BIOMIMÉTISME [89–91]

La régulation du flux lumineux est une importante stratégie dans le vivant aussi bien pour les règnes animal, végétal que champignon. Les organismes perçoivent la lumière à des fins diverses, par exemple pour obtenir des informations sur leur milieu environnant (Figure 92), pour des questions énergétiques, pour la production de matière (photosynthèse, Figure 91), etc. En développant différents systèmes, les organismes ont mis au point des stratégies de filtration, absorption, réflexion de la lumière (stratégies de régulation de la lumière).



Figure 91 : Captation de la lumière et photosynthèse, [Licence CCO](#)



Figure 92 : Régulation du flux lumineux par la pupille, [Licence Creative Commons CCO](#)

Ces stratégies ont été mises en œuvre dans le cadre de façades bio-inspirées. Il existe deux grandes catégories de façades bio-inspirées permettant la régulation de la lumière : les façades autoréactives et actives.

Les façades bio-inspirées autoréactives ont la capacité de changer de géométrie en fonction d'un stimuli environnemental extérieur. La façade Pho'liage s'inspire des stomates des plantes (organe à la surface des feuilles permettant les échanges gazeux) (Figure 93). En s'inspirant de ce phénomène, les équipes de conception de l'agence d'architecture Art & Build ont conçu des brise-soleils à géométrie variables suivant l'ensoleillement reçu. La géométrie des modules de façade se déforme suivant l'apport solaire par déformation mécanique réversible. Positionnés en seconde peau d'une façade vitrée, les motifs en alliage métallique s'ouvrent et se ferment suivant leur échauffement (Figure 94). Ce système est également développé dans la section 7, Bâtiment exemplaire CIRC de Lyon.



Figure 93 : les stomates sont des organes à la surface des plantes permettant la régulation des échanges gazeux en surface des feuilles. [Licence CC0 Creative Commons](#)



Figure 94 : Modules de façade Pho'liage en métal s'inspirant du système d'ouverture des plantes et matériaux biologiques réactifs © ArtBuild

Le second type de façades bio-inspirées intégrant des brise-soleils orientables nécessite le recours à un système de contrôle centralisé des ouvertures et fermetures de la façade. Ces systèmes étant considérés comme énergivores, des nouveaux systèmes bio-inspirés ont été développés ces dix dernières années afin de réduire l'énergie nécessaire à l'adaptation morphologique de la façade. Le système de façade Flectofin® s'inspire des étamines de la fleur Oiseau de paradis contenant le pollen, et de sa déformation ne nécessitant que très peu d'énergie, car en instabilité mécanique (Figure 95). Le système Flectofin® a été adapté sur le pavillon One Ocean à Yoesu en Allemagne permettant une régulation de l'apport lumineux et thermique (Figure 96 et Figure 97).



Figure 95 : Fleur oiseau de Paradis, [Licence CC0 Creative Commons](#)



Figure 96 : Pavillon One Ocean avec les lamelles de façade fermées ©Kim Yong-kwan



Figure 97 : Pavillon One Ocean avec les lamelles de façade ouvertes ©Kim Yong-kwan

Ces deux types de façades peuvent être implémentés dans le cadre de construction bois. Elles permettent d'optimiser les apports solaires et peuvent s'ajouter dans le cadre de constructions neuves ou rénovations. Le premier type de façades bio-inspirées dites « autoréactives » ne nécessite pas d'équipement pour permettre la régulation : l'adaptation se fait localement en fonction des conditions météorologiques.

REFERENCES DE LA FICHE : [86–94]

TOIT RAFRAICHISSANT

Le toit rafraîchissant, également appelé « Cool roof » permet de limiter le recours à la climatisation via l'usage d'un revêtement de toiture constitué de peinture blanche ou de membranes d'étanchéité réfléchissantes servant à réfléchir les rayons du soleil et ainsi diminuer la surchauffe au sein du bâtiment en période estivale.

Domaine d'emploi

Quelle que soit la pente de la toiture ou son matériau (membrane bitumineuse, béton, bois, métal) les peintures blanches réfléchissantes peuvent s'y appliquer et recouvrir plusieurs types de bâtiments : commerciaux, industriels et résidentiels.

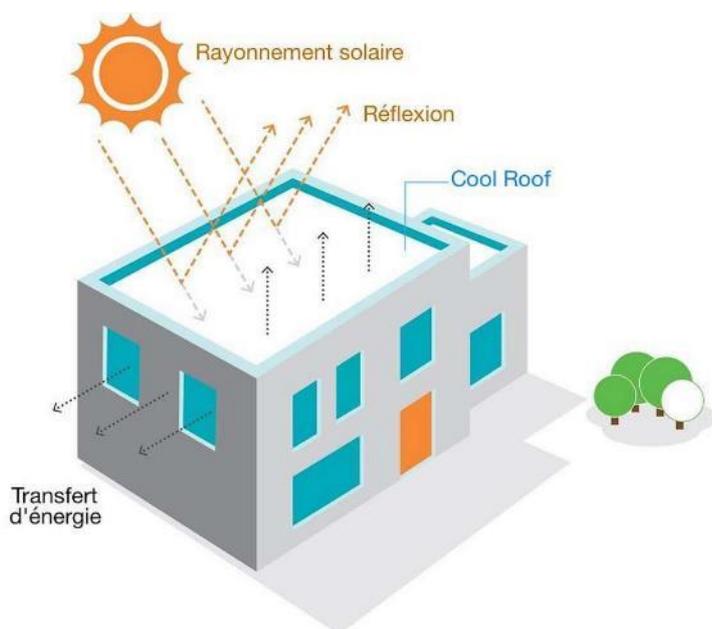


Figure 98 : Schéma toit rafraîchissant © Futura Maison

Cette solution n'est pas adaptée à toutes les zones climatiques du fait de la nécessité d'un apport supplémentaire de chauffage l'hiver, impactant l'efficacité globale du bâtiment [95]. Elle ne convient donc qu'à un panel de climats restreint, de type tropical, désertique, voire méditerranéen, c'est-à-dire en zone thermique H3 selon la réglementation thermique RT2012.

Pourtant, l'immeuble de logements sociaux « Bois Debout » à Montreuil présentant des performances énergétiques certifiées Passivhaus a choisi une membrane d'étanchéité en PVC de couleur blanche capable de réfléchir 80 % de l'énergie solaire (albédo de 0,8) en toiture-terrasse. Ceci leur a permis d'éviter les surchauffes en toiture et de lutter contre le phénomène d'îlot de chaleur urbain ainsi que de participer au confort d'été du dernier étage [96].



CARACTÉRISTIQUES

Coût

€

Impact Carbone

C

Mise en œuvre



Entretien



Adaptabilité



Performance



Durabilité



Intégration

Architecturale



LES (+)

- Peu coûteux.
- Simple à mettre en œuvre sur une toiture terrasse.
- Bonne efficacité en termes de degrés perdus pour un prix relativement faible.
- Le cool roof contribue aussi à préserver l'étanchéité de la toiture et à prolonger sa durée de vie.

LES (-)

- La peinture n'est pas adaptée à tous les climats présents en France. Certains projets visent à pallier ce défaut en mettant au point une peinture thermosensible capable de sensiblement changer de couleur entre les saisons pour être *sombre* en hiver et *claire* en été.
- Pour maintenir les performances réfléchives du revêtement un nettoyage annuel de l'ensemble de la surface est préconisé.



Figure 99 : Systèmes d'étanchéité Renolit sur le toit de logements sociaux collectifs tout bois à Montreuil © A003 Architectes

Caractéristiques et données techniques

Paramètres de conception

Cette solution est simple d'adaptation et peu coûteuse. La peinture Cool Roof France a une base aqueuse et est protégée d'une surcouche anti-UV et anti-moisissures à base de résine PVDF Kynar Aquatec®. Ce fluoropolymère très résistant a été largement utilisé notamment sur des bâtiments dans les États chauds, en Californie, Arizona ou Nevada. La surcouche en Kynar Aquatec®, imperméable, améliore considérablement la durabilité du toit blanc.

Les trois caractéristiques d'un revêtement de toiture cool roof sont : la réflectivité, l'émissivité, et le coefficient SRI (Solar Reflectance Index).

La réflectivité du rayonnement solaire est la propriété du toit à réfléchir le rayonnement solaire : visible, IR, UV. Elle varie entre 0 et 1 et est généralement de l'ordre de 0.80 (à moduler selon les fabricants).

L'émissivité thermique est la propriété radiative du toit pour le rayonnement solaire absorbé. Elle est forte pour une peinture cool roof : la peinture dissipe la puissance non-réfléchi de manière très efficace vers l'extérieur, jusqu'à l'équilibre thermique s'il n'y a plus d'apports par rayonnement conséquent. De même, elle varie entre 0 et 1 et est généralement de l'ordre de 0.90.

Le SRI intègre les propriétés de réflectivité et d'émissivité dans une mesure standardisée et facile à lire. Le SRI est calculé à l'aide d'une formule complexe énoncée dans la norme ASTM E 1980. Il s'agit d'une échelle de 1 à 100 qui permet de mesurer les propriétés thermiques combinées d'un toit. Il est défini de manière à ce qu'un noir standard (réflectivité 0,05, émittance 0,90) soit 0 et qu'un blanc standard (réflectivité 0,80, émittance 0,90) soit 100. Mais certains toits chauds peuvent avoir des valeurs négatives, et certains thermoplastiques blancs et revêtements de toits blancs ont obtenu des scores allant de 104 à 110 [97].

La conductivité thermique du revêtement cool roof est faible grâce aux nano particules en aérogel de silice amorphe qui permettent de ralentir considérablement le passage de chaleur à travers la couche de peinture.

Ainsi, la forte émissivité combinée à une faible conductivité permet d'évacuer la chaleur vers l'extérieur du bâtiment et non vers l'intérieur, ce qui diminue la température du toit et des pièces en dessous.

Paramètres de gestion

Ce type de revêtement nécessite de l'entretien. En effet, des saletés peuvent endommager la réflectivité du rayonnement solaire et ainsi diminuer l'efficacité du revêtement.

Résultats suite à deux études

Une étude menée sur trois sites : Jamaïque, Nord du Brésil (Recife) et Ghana sur le logiciel EnergyPlus a montré que les simulations annuelles indiquaient une réduction de température en moyenne entre 3.2 et 5.5 °C en surface et entre 0.75 et 1.2 °C à l'intérieur du bâtiment. Les demandes de rafraîchissement étaient alors réduites d'environ 190kWh/m²/an pour les trois localisations [98].

Une seconde étude menée en Californie (San Jose) a montré que le revêtement réfléchissant des toits de ces bâtiments a augmenté l'albédo du toit de 0,20 à 0,60 en moyenne. La température de la surface du toit pendant les après-midis d'été ensoleillés est tombée de 80°C à 50°C après l'application du revêtement [99].

OFFRE INDUSTRIELLE

État de l'offre

La société Cool Roof France propose deux produits complémentaires qui s'appliquent sur la plupart des matériaux utilisés en toiture, en application mécanique (pulvérisation au pistolet airless) ou manuelle (rouleau, brosse) :

- Le BaseCoat est le revêtement de base qui confère les propriétés thermo réfléchives.
- Le TopCoat est le revêtement de finition, qui permet la durabilité de ces propriétés thermo réfléchives dans le temps, grâce à une limitation des phénomènes d'encrassement naturel (pollutions organiques et minérales, salissures transportées par les eaux de ruissellement...) et une protection contre les UV du rayonnement solaire.

En effet, tout phénomène d'encrassement ou de dégradation par les UV provoque une baisse des propriétés thermo réfléchives. Le TopCoat et le BaseCoat sont des produits monocomposants en phase aqueuse, blanc opaque, sans émission de COV.

RENOLIT propose un produit similaire, RENOLIT ALKOBRIGHT dont la couche de protection favorise également l'écoulement des eaux et poussières.

Le groupe Soprema propose aussi une membrane Soprastar® Flam. Cette membrane possède une étanchéité à base de bitume élastomère à armature composite de polyester dont la face inférieure est protégée par un film thermo fusible et dont la face supérieure blanche est réfléchive, grâce à un revêtement quadricouche laminé croisé spécifique et exclusif. Elle possède une réfléchivité de 0.78, une émissivité de 0.89 et un coefficient SRI de 96. Elle est revêtue d'une protection de surface avec un film VALERON® exclusif sans égal pour l'entretien et la résistance à l'encrassement. Son classement au feu est Broof T3 [100].

La société Aximum propose une peinture élastomère acrylique en phase aqueuse appelée Axiroof. Elle possède une réfléchivité de 0.87 et une émissivité de 0.91. Elle est applicable manuellement grâce à un rouleau ou mécaniquement grâce à la pulvérisation airless [101].

Deux autres associations listent les produits existants cool roof :

L'association European Cool Roofs Council développe et promeut les membranes cool roof pour toute une série de types de bâtiments dans différents climats européens. Celle-ci travaille avec des organismes de normalisation pour concevoir des méthodes précises et crédibles d'évaluation des propriétés radiatives des produits de toiture. Elle permet aussi de développer des partenariats tout au long de la chaîne de valeur [102].

Le Cool Roof Rating Council créé en 1998 est un groupe d'experts développant des méthodes précises et crédibles pour évaluer et étiqueter la réfléchivité solaire et l'émittance thermique (propriétés radiatives) des produits de toiture. De nombreux fabricants de peinture cool roof du monde entier y sont recensés ainsi que les caractéristiques de leurs peintures.

Données économiques

Aux Etats Unis, les revêtements cool roof sont très appréciés et peuvent coûter entre 7 et 14 € au m², tandis que les membranes de toiture froide monocouche coûtent entre 14 et 28 € au m² (selon l'Environmental Protection Agency of United State) [103]. Néanmoins, il ne faut pas oublier que le prix de ce type de revêtement varie grandement en fonction de la localisation.

En France, la société bretonne Cool Roof propose sa peinture au prix d'environ 20 €/m².

NORMES & RÉGLEMENTATION

Normes

Les revêtements d'étanchéité pour toiture réfléchissante peuvent relever des normes NF EN 12970 (revêtement en asphaltes), NF EN 13707 (feuilles de bitume modifié par élastomères SBS) ou encore de la norme NF EN 13956 (feuilles d'étanchéités de toiture plastiques et élastomères). Les normes NF EN 13707 et NF EN 13956 imposent le marquage CE des produits concernés.

Traditionnalité

Le NF DTU 43.4 fournit les prescriptions techniques d'exécution des ouvrages de toitures en éléments porteurs en bois et panneaux dérivés du bois recevant un revêtement d'étanchéité. Ce document décrit la pose traditionnelle des revêtements d'étanchéité. Les procédés qui respectent les exigences sur les matériaux utilisés et les techniques de pose sont considérés comme traditionnels.

Le produit SOPRASTAR FLAM du groupe SOPREMA dispose d'une Enquête de Technique Nouvelle (ETN) délivrée par ALPHA CONTROLE (2014). Ce document ne permet pas de considérer le procédé comme technique courante.

Les peintures pour toits rafraichissants ne sont pas des produits d'étanchéité et se trouvent donc hors champ du DTU 43.4.

Réglementation

Depuis le 1^{er} janvier 2010 de nouveaux seuils à ne pas dépasser pour la teneur en COV [g/L] (Composés Organiques Volatils) des peintures sont fixés par une directive européenne (directive 2004/42/CE). Pour les peintures utilisées en extérieur, la teneur en COV ne peut donc pas dépasser les 40 g/L pour les peintures en phase aqueuse et les 430 g/L pour celles en phase solvant. Avant cette nouvelle directive les seuils étaient fixés respectivement à 75 et 450 g/L.

INTÉGRATION AUX OUVRAGES BOIS

Les toits rafraichissants permettent de limiter les apports de chaleur par conduction et convection à la surface de la toiture. Cela est d'autant plus intéressant pour des bâtiments bois à faible inertie où il est important de réduire l'ensemble des apports de chaleur afin de limiter les surchauffes estivales. En effet contrairement à des bâtiments à forte inertie la température peut augmenter rapidement. La stratégie consiste alors à déployer plusieurs solutions pour limiter drastiquement tout apport. Couplée à d'autres solutions telles que les brise-soleil orientables, la végétalisation aux abords du bâtiment, la surventilation et une sensibilisation efficace des usagers, cette solution est un élément bénéfique pour maintenir un confort estival adéquat.



FOCUS BIOMIMÉTISME [104]

La régulation thermique est un enjeu majeur dans le vivant. La régulation peut se faire à différentes échelles : comportementales (ex : se déplacer à l'ombre pour limiter l'apport solaire), physiologiques (ex : avoir un pelage qui absorbe ou réfléchit les rayonnements solaires), et morphologiques (ex : avoir une géométrie qui limite l'absorption du rayonnement). Il existe donc plusieurs modèles biologiques inspirants permettant de limiter l'échauffement d'une surface par réflexion.

Les ailes du papillon *Morpho* endémique des régions tropicales sont constituées de chitine. Ce matériau a la capacité d'absorber le rayonnement solaire pour stabiliser sa température autour des 40°C (température létale au-dessus). Ainsi, dès que cette température est atteinte, le papillon se met à émettre fortement dans l'infrarouge afin de faire baisser sa température par dissipation thermique. À ce jour, il n'existe pas encore de matériaux aux propriétés thermiques similaires, mais des développements sont en cours sur la création de panneaux solaires PV qui auraient ces propriétés et pourraient baisser en température pour un meilleur rendement. Ce type de matériau permettrait de développer des revêtements afin de limiter l'échauffement des toitures (Figure 100)



Figure 100 : Papillon morpho
©Wikipédia

Le zèbre présenterait une régulation thermique basée sur un principe d'absorption / réflexion du rayonnement solaire. L'alternance des bandes blanches et noires permet la création de turbulences à la surface de sa peau permettant ainsi le rafraîchissement de l'enveloppe. L'alternance des bandes absorbantes et réfléchissantes pourrait être appliquée en toiture ou façade afin de limiter l'échauffement de la toiture. (Figure 101).



Figure 101 : Pelage de zèbre Licence
[Pixabay Licence](#)

REFERENCES DE LA FICHE : [95,96,105,106,97–104]

VEGETALISATION DU BATIMENT ET DE SES ABORDS

La végétalisation d'un bâtiment et de ses abords permet de limiter le recours à la climatisation en protégeant les façades du rayonnement solaire, en les rafraîchissant via l'évapotranspiration et en ajoutant de l'inertie thermique via la présence d'un substrat, des végétaux et de l'eau. Elle peut également permettre de limiter le recours au chauffage en fournissant une isolation et en abritant les façades des vents dominants et en limitant ainsi les pertes de chaleur associées.

Il existe de nombreux types de systèmes végétalisés en interaction directe avec le bâtiment. Les systèmes ci-après ont été extraits de la base de données des solutions fondées sur la nature établie par le projet européen Nature4Cities [107] :

- Les façades végétalisées qui peuvent se classer en 3 types de murs verts :
 - **(1) Mur végétal à plantes grimpantes** : utilisation de plantes grimpantes pour recouvrir des murs et des façades. Grâce à cette caractéristique, la plante s'enracine directement dans le sol. Il s'agit de la solution la plus simple, la plus économique et la plus efficace pour végétaliser les murs et les bâtiments en suivant une longue tradition qui remonte à l'Antiquité.
 - **(2) Mur végétal à support de plantation** : utilisation de supports de plantation ou de pots avec un substrat artificiel. Ils peuvent être posés au sol ou directement sur le bâtiment ou les balcons. Ils peuvent être utilisés pratiquement avec tous les types de plantes, comme les plantes grimpantes, les arbres et/ou les arbustes.
 - **(3) Système de mur vert** : utilisation d'un substrat global installé sur la façade. Plusieurs types d'arbustes, d'herbes ou de gazons peuvent être utilisés pour générer une couverture végétale. Un système d'irrigation automatique et un approvisionnement en nutriments sont nécessaires en raison des conditions extrêmes du substrat limité.
- Les toitures végétalisées qui peuvent se classer en 3 types :
 - **(4) Toiture verte extensive** : possède un substrat de 8 à 10 cm qui peut accueillir des végétaux à enracinement superficiel tels que les mousses, sédums ou certaines herbacées. Ce système peut s'appliquer aux toits plats, inclinés ou en pente et ne nécessite pas d'irrigation une fois établi.
 - **(5) Toiture verte semi-intensive** : possède un substrat de 15 à 30 cm qui peut accueillir une végétalisation à enracinement plutôt profond adapté au développement d'arbrisseaux et de petits arbustes. Ce système peut s'appliquer aux toits plats et nécessite une irrigation.
 - **(6) Toiture verte intensive** : possède un substrat de plus de 30 cm qui peut accueillir une végétalisation à enracinement profond adapté au développement d'arbustes et de certaines espèces d'arbres. Ce système peut s'appliquer aux toits plats et nécessite une irrigation.



CARACTÉRISTIQUES

Mur végétal à plantes grimpantes*

Coût €	Impact Carbone c
<div style="width: 100%; height: 10px; background-color: #0056b3;"></div>	<div style="width: 100%; height: 10px; background-color: #0056b3;"></div>
Mise en œuvre	Entretien
<div style="width: 100%; height: 10px; background-color: #0056b3;"></div>	<div style="width: 100%; height: 10px; background-color: #0056b3;"></div>
Adaptabilité	Performance
<div style="width: 100%; height: 10px; background-color: #0056b3;"></div>	<div style="width: 100%; height: 10px; background-color: #0056b3;"></div>
Durabilité	Intégration Architecturale
<div style="width: 100%; height: 10px; background-color: #0056b3;"></div>	<div style="width: 100%; height: 10px; background-color: #0056b3;"></div>

*voir le détail de toutes les solutions en fin de fiche p. 96

LES (+)

- Amélioration du confort thermique estival en réduisant la température d'air et des façades par ombrage et évapotranspiration.
- Amélioration du confort thermique d'hiver via la protection au vent.
- Réduction de la déperdition thermique des bâtiments via l'ajout d'inertie et d'isolation.
- Procure de nombreux co-bénéfices : Amélioration de la qualité de l'air, amélioration de la qualité de vie, isolation acoustique, support à la biodiversité, séquestration de carbone, etc.

LES (-)

- Réduction d'apport solaire en hiver
- Réduction des apports lumineux
- Abaissement de la vitesse du vent : réduit la ventilation naturelle du bâtiment et les transferts convectifs.
- Humidification de l'air en été : augmente le besoin de climatisation pour déshumidifier l'air
- Présence d'insectes indésirables ou de plantes allergènes
- Besoin de dimensionner les structures pour les toitures végétalisées
- Besoin d'un contrat de maintenance spécifique à l'entretien des solutions



Figure 102 : (1) Mur à plante grimpante



Figure 103 : (2) Mur à support de plantation, Bosco Verticale, Milan, Italie © wikimedia commons



Figure 104 : (3) Mur vert Kelly Rossiter CC BY 2.0



Figure 105 : (4) Toiture verte extensive © Creative Commons



Figure 106 : (5) Toiture semi-intensive



Figure 107 : (6) Toiture intensive

- La végétalisation urbaine aux abords des bâtiments contient également de nombreuses solutions dont trois ont été sélectionnées ici en raison de leur impact potentiel sur le bâtiment :
 - **(7) Pergola végétalisée** : utilisation de structures jardinières (poutres, treillis, colonnes) constituées de divers matériaux en combinaison avec des plantes.
 - **(8) Arbres individuels** : un arbre individuel repose sur une surface sans revêtement étendu (contrairement aux arbres de rue). Il est géré indépendamment des autres éléments de la végétation environnante.
 - **(9) Forêts urbaines** : désigne tous les arbres détenus par des organismes publics et privés dans une zone urbaine. Ce terme inclut les arbres individuels le long des rues et dans les jardins ainsi que les vestiges de forêts.



Figure 108 : (7) Pergola végétalisée



Figure 109 : (8) Arbre individuel © Public domains



Figure 110 : (9) Forêt urbaine © Pixabay

Domaine d'emploi

Cette solution est applicable à tous types de bâtiments. En raison de son coût, le système de mur végétal se retrouve plus souvent dans des bâtiments tertiaires.

Concernant les toitures végétalisées, le dimensionnement des structures doit pouvoir supporter les poids additionnels apportés par le système végétal. Cela restreint donc l'usage de ces solutions en rénovation.

Caractéristiques et données techniques

L'impact de la végétalisation des bâtiments et de leurs abords est difficile à quantifier et ne peut être généralisé aux différents dispositifs existants. Il s'agit donc de sélectionner le dispositif adéquat selon le contexte et le phénomène actif recherché. Les principaux paramètres de conception sont les suivants :

- Type de système de végétalisation : façade, toiture ou autres solutions de végétalisation aux abords du bâtiment
- Végétaux qui composent le système. Leurs caractéristiques peuvent avoir des impacts différents d'une espèce à l'autre : hauteur, densité de la végétation et du feuillage, feuilles caduques ou persistantes, taux de couverture de la végétation, couleur des feuilles, etc.
- Positionnement des éléments végétalisés tels que la distance entre les éléments et le bâtiment, le positionnement des végétaux par rapport à l'ensoleillement et aux vents dominants, le nombre des éléments, etc.
- Caractéristiques des sols ou des substrats utilisés : profondeur, capacité à retenir l'eau, densité, surface, etc.

Les phénomènes qui permettent de limiter le recours aux systèmes de rafraîchissement et de chauffage sont les suivants [108] :

- **Protection solaire** : les surfaces végétalisées sont plus réfléchissantes que les surfaces minéralisées sauf dans le cas de surfaces blanches telles que pour la solution du « toit rafraîchissant ». En absorbant et en réfléchissant le rayonnement solaire, la végétalisation va ombrager les surfaces opaques et vitrées du bâtiment permettant ainsi de limiter les apports solaires.
 - En été les arbres situés au sud et à l'ouest offrent un ombrage aux bâtiments. Le choix des espèces impacte la protection solaire qu'ils procurent selon la taille, la forme et la densité du feuillage. Pour éviter des pertes de rayonnement solaire favorables en hiver, des arbres à feuilles caducs sont à privilégier sur ces orientations.
 - Cela est similaire pour les pergolas végétalisées qui procurent également des ombrages plus ou moins importants selon les espèces choisies. La forme des structures jardinières a également une importance sur l'ombrage qu'elle peut apporter.
 - La végétalisation des façades réduit également le rayonnement solaire de façon directe. Elle est particulièrement utile pour les façades de grande surface telles que celles des immeubles.

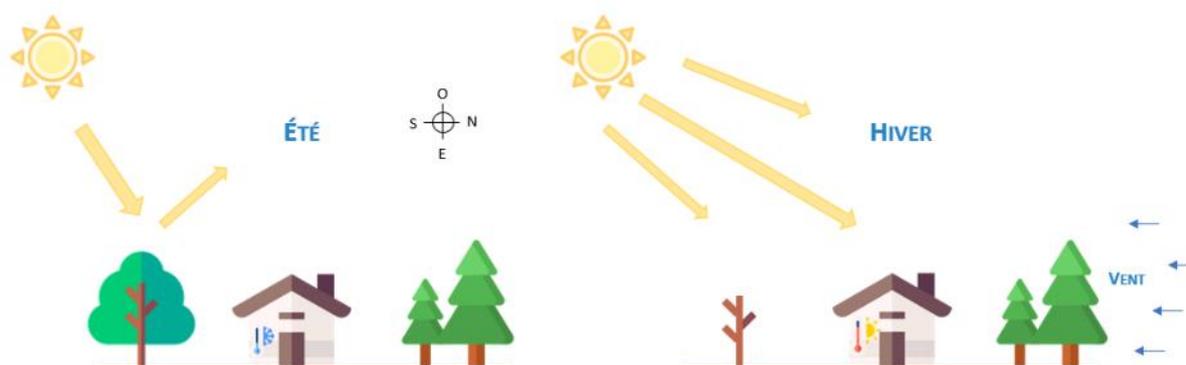


Figure 111 : Protection au rayonnement solaire et aux vents dominants offerte par les arbres environnants d'après [108]

- **Évapotranspiration** : lorsque l'eau s'évapore, elle absorbe les calories contenues dans l'air ambiant et le rafraîchit. Le système d'irrigation de certaines solutions ainsi que la transpiration naturelle des végétaux induisent un phénomène d'évaporation et donc de rafraîchissement localisé.
- **Protection des vents dominants** : en hiver la végétalisation des bâtiments et de leurs abords permet de réduire les taux d'infiltration de l'air froid et par conséquent les pertes de chaleur par convection au niveau des façades des bâtiments. En été le ralentissement des écoulements d'air chaud permet également de limiter l'infiltration d'air chaud en limitant notamment les échanges thermiques entre les parois du bâtiment et l'air extérieur.
- **Inertie et isolation thermique** : les systèmes de façades végétalisées permettent d'augmenter l'inertie et des parois et améliorent l'isolation thermique. Cette caractéristique permet de compenser le manque d'inertie de certaines constructions bois.

Les toitures et murs végétalisés demandent un entretien particulier. Il est ainsi recommandé de mettre en place un contrat de maintenance dès la réception du bâtiment, en particulier sur le premier semestre où les risques de dessiccation sont plus importants [109].

QUELQUES CHIFFRES CLEFS EXTRAITS DU GUIDE DE L'ADEME « AMENAGER AVEC LA NATURE EN VILLE » [108] PERMETTENT DE METTRE EN AVANT L'INTERET DES SOLUTIONS VEGETALES :

POUR LES FAÇADES VEGETALISEES :

- La température maximale des murs végétalisés est de 30 °C, alors que les murs classiques peuvent atteindre 60 °C en fonction du type de revêtement.
- Pour des climats océanique et méditerranéen, en été, l'ajout d'un mur vivant à la paroi externe peut diminuer la température des pièces intérieures de 1,5 à 5°C et diminuer la consommation d'énergie pour la climatisation de 37 à 51%.

POUR LES TOITURES VEGETALISEES :

- Pour une journée ensoleillée, un toit de couleur foncée peut atteindre une température de 80°C, un toit blanc 45°C et un toit végétalisé 29°C (température proche de celle de l'air)
- À Paris, sur 10 ans de simulation (1999-2008), les toitures végétalisées permettraient d'économiser de l'énergie quelle que soit la saison (par rapport à la situation de référence) : 23 % (28 % si les toitures sont arrosées) en été, 4,5% en hiver.

POUR LA VEGETALISATION URBAINE AUX ABORDS DES BATIMENTS :

- Dans le sud du Dakota (États-Unis), les maisons consomment 25% moins d'énergie lorsqu'elles sont situées sous des haies brise-vent que lorsqu'elles sont exposées en plein vent.
- L'ombrage par des dispositifs brise-soleil végétalisés (vigne vierge, Angleterre) peut réduire de 4 à 6°C les températures à l'intérieur des bâtiments lors de pics de température estivaux.

CARACTÉRISTIQUES DES SOLUTIONS

Mur végétal à support de plantation

Coût	Impact Carbone	Mise en œuvre	Entretien
€€€	cc		
Adaptabilité	Performance	Durabilité	Intégration Architecturale

Système de mur végétal

Coût	Impact Carbone	Mise en œuvre	Entretien
€€€€	ccc		
Adaptabilité	Performance	Durabilité	Intégration Architecturale

Toiture végétalisée extensive

Coût	Impact Carbone	Mise en œuvre	Entretien
€€€	cc		
Adaptabilité	Performance	Durabilité	Intégration Architecturale

Toiture végétalisée semi-intensive

Coût	Impact Carbone	Mise en œuvre	Entretien
€€€€	cc		
Adaptabilité	Performance	Durabilité	Intégration Architecturale

Toiture végétalisée intensive

Coût	Impact Carbone	Mise en œuvre	Entretien
€€€€	cc		
Adaptabilité	Performance	Durabilité	Intégration Architecturale

Pergola végétalisée

Coût	Impact Carbone	Mise en œuvre	Entretien
€	cc		
Adaptabilité	Performance	Durabilité	Intégration Architecturale

<i>Arbres individuels</i>			
<i>Coût</i>	<i>Impact Carbone</i>	<i>Mise en œuvre</i>	<i>Entretien</i>
€	c		
<i>Adaptabilité</i>	<i>Performance</i>	<i>Durabilité</i>	<i>Intégration Architecturale</i>

<i>Forêts urbaines</i>			
<i>Coût</i>	<i>Impact Carbone</i>	<i>Mise en œuvre</i>	<i>Entretien</i>
€€	c		
<i>Adaptabilité</i>	<i>Performance</i>	<i>Durabilité</i>	<i>Intégration Architecturale</i>

OFFRE INDUSTRIELLE

État de l'offre

Plusieurs entreprises proposent des composants et systèmes complets de végétalisation (murs, toitures et systèmes aux abords des bâtiments). Une liste non exhaustive de fournisseurs de systèmes complets de végétalisation (murs et toitures), de fournisseurs de composants spécifiques aux surfaces végétalisées et d'entreprises de mise en œuvre (étancheurs et autres) est donnée sur le site de l'Association des Toitures et Façades Végétales ADIVET [110].

À titre d'exemple, l'entreprise MON TOIT VERT propose un procédé de végétalisation extensif de toiture et un système de mur vert [111].

Données économiques

Quelques données économiques clefs ont été extraites des fiches de solutions fondées sur la nature du projet Nature4Cities [107].

Concernant les murs verts, il y a une grande hétérogénéité selon le type de mur:

- L'investissement pour un système de mur vert est plutôt conséquent et varie de 1000 à 1200€/m² voire plus. Les coûts de maintenance sont quant à eux de 10 à 70€/m² par an. C'est le système qui demande le plus de ressources (eau, engrais, électricité, etc.).
- Les murs à système de plantation vont nécessiter un investissement moins important variant de 400 à 1000€/m² selon le système choisi. Le prix de la maintenance quant à lui est dans les environs de 10 à 25 €/m² par an.
- La solution de mur vert à plantes grimpantes est la moins onéreuse tant au niveau de l'investissement, qui varie de 10 à 120 €/m², que de la maintenance, qui varie de 1 à 15€/m² par an.

L'investissement requis pour une pergola varie de 30 à 120€/m².

Le prix des toitures végétalisées varie aussi en fonction des systèmes : 25 à 75€/m² pour les toitures extensives, de 75 à 120€/m² pour les toitures semi-intensives et de 120 à 340€/m² pour les toitures intensives sans compter le surcoût lié au dimensionnement des structures. Le coût moyen des toitures intensives et semi-intensives est assez difficile à estimer en raison des nombreuses variables qui le composent telles que la taille, l'accessibilité, ainsi que l'usage du site qui peut nécessiter des éléments supplémentaires (par exemple une aire de jeux, une structure d'ombrage, etc.) ainsi que des types de végétaux sélectionnés. Les coûts de maintenance des toitures végétalisées extensives ou intensives par un personnel qualifié varient de 45 à 80€ de l'heure.

NORMES & RÉGLEMENTATION

Traditionnalité

La conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées sont couvertes par des Règles Professionnelles acceptées par la C2P. Ces règles concernent les procédés d'étanchéité avec végétalisation extensive et semi-intensive pour différents éléments porteurs, dont le bois et les panneaux à base de bois. Les procédés de végétalisation respectant les exigences de ces Règles Professionnelles sont donc considérés comme traditionnels.

Plusieurs procédés de végétalisation de toitures ne relevant pas des Règles Professionnelles disposent d'évaluations techniques de type ATec (VERTIGE, SARNAVERT SARNAPACK, IKO SEMPERVIVUM, VEGETAL I.D., ECOVEGETAL).

Il n'existe pas de règles de l'art permettant de considérer les procédés de façades végétalisées comme traditionnels.

La société TRACER URBAN NATURE dispose d'un ATec pour le procédé VERTIFLORE qui est donc considéré comme une technique courante.

Plusieurs évaluations techniques portent sur des revêtements d'étanchéité de toiture destinés à recevoir une végétalisation.

Les travaux d'aménagement paysager ne sont pas concernés par la garantie décennale et donc par les critères de traditionnalité / non traditionnalité. Il existe toutefois des Règles Professionnelles pour les travaux de mise en œuvre et d'entretien des plantes.

Réglementation

L'article 86 de la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages impose depuis mars 2017 pour les bâtiments d'exploitation commerciale la mise en place d'un système de végétalisation sur tout ou partie de la toiture ou d'un procédé de production d'énergie renouvelable.

<https://www.optigreen.fr/support-technique/cahier-des-clauses-techniques-ate/>

https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKewjtgmfd_droAhWJsBQKHf3VCZAQFjABegQICRAB&url=http%3A%2F%2Fwww.plante-et-cite.fr%2Ffiles%2Fressource%2Ffile%3A1191&usg=AOvVaw26bCPObtVr3Yf66u70FKWj

INTÉGRATION AUX OUVRAGES BOIS

L'usage couplé de la végétalisation des bâtiments bois avec les principes de la conception bioclimatique est recommandée. Le rafraîchissement par évapotranspiration et le masque solaire engendré par végétaux permettent de limiter directement les apports de chaleur dans le bâtiment. L'apport d'inertie des systèmes végétalisés étant modéré, voire faible, ils n'affectent pas la capacité d'un bâtiment bois à faible inertie à être rafraîchi rapidement via la surventilation. Le couplage de la végétalisation à une conception en faveur de la surventilation peut ainsi suffire à atteindre des niveaux de confort thermique estival adéquats en limitant les apports de chaleur externes tout en assurant l'évacuation des apports internes. Un tel couplage permet de limiter voire éviter le recours à la climatisation.

Les Règles Professionnelles portant sur la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées couvrent les travaux réalisés sur des éléments porteurs en bois ou en panneaux à base de bois. Une pente minimale de 3% est exigée.

Pour les travaux neufs, les éléments porteurs en bois ou panneaux à base de bois doivent être :

- > Conformes à la norme NF P 84-2017 (réf. DTU 43.4) ;
- > Ou panneaux bénéficiant d'un Avis Technique visant favorablement son emploi en élément porteur pour terrasses et toitures végétalisées ;
- > Ou panneaux OSB 3 ou OSB 4 définis dans la norme NF EN 300 et relevant respectivement des marques de qualité CTB-OSB 3 et CTB-OSB 4. L'épaisseur minimale des panneaux OSB est de 15 mm. Leurs longueurs et largeurs maximales sont respectivement de 2500 mm et de 910 mm.

Dans le cas de travaux sur ouvrages existants, le remplacement systématique de l'élément porteur bois ou à base de bois (au sens du NF DTU 43.4) est à prévoir.



FOCUS BIOMIMÉTISME & BIO-INSPIRATION [112]

Bio-utilisation (utiliser directement ce qui est vivant, comme la végétalisation d'un bâtiment) et biomimétisme (s'inspirer du vivant pour répondre durablement à un challenge technique) sont deux concepts différents. Le premier implique un recours direct à des organismes biologiques (espèces végétales, animales, champignons, espèces unicellulaires, etc.) alors que le biomimétisme n'implique pas forcément un recours direct au vivant.

L'exemple de la Biofaçade développée par d'XTU Architect, qui propose l'utilisation d'algues en double peau pour la récupération d'énergie par photosynthèse, relève uniquement de bio-utilisation. Le cas du pavillon HygroSkin, inspiré des mécanismes d'ouverture et fermeture des pommes de Pin (cf. Fiche HygroSkin opérations exemplaires partie 7), est plus nuancé. Le principe proposé implique l'utilisation de bois ; s'il s'agit de bio-utilisation, notons qu'il aurait été possible d'effectuer un transfert du modèle biologique vers une technologie sans utiliser des matériaux biologiques, avec par exemple des matériaux réactifs tels que la façade Pho'liage en alliage métallique (cf. Focus Biomimétisme Brise-soleils orientables). Ce concept relève donc bien du biomimétisme, avec de la bio-utilisation comme application technologique.

La végétalisation, en biomimétisme, est à appréhender sous l'angle des symbioses. Une symbiose est une association biologique qui bénéficie aux deux organismes. Par exemple, un couvert végétal va créer un microclimat humide lié à l'évapotranspiration des feuilles et une zone de protection du rayonnement solaire direct qui peut profiter à de nombreuses espèces.

V

STRATEGIES D'IMPLICATION DES USAGERS



Les solutions décrites dans ce guide ont pour objectif premier d'assurer le confort des usagers. Bien que passives et à faibles technicités, le fonctionnement holistique de ces solutions et du bâtiment n'en reste pas moins complexe et nécessite d'impliquer l'utilisateur en tant qu'acteur de son propre bien-être. Comme le stipulent les associations de L'Agence Qualité Construction (AQC) et de la Ville et Aménagement Durable (VAD) dans un dossier portant sur les retours d'expériences de 21 bâtiments performants de la région Rhône-Alpes, « *la complexité des installations techniques et l'inadéquation entre l'usage prévu et la réalité de l'utilisation peuvent nuire à la bonne exploitation du bâtiment* » [109]. Lorsque l'usage ne suit pas les prévisions, le risque est alors que les performances énergétiques soient dégradées et dans le pire des cas que les objectifs de confort des usagers ne soient pas respectés. D'une part le comportement réel des usagers doit être anticipé et considéré tant au niveau de l'accessibilité des équipements techniques que de la simplicité des installations et d'autre part les usagers doivent être impliqués, directement ou indirectement dans un but d'acceptation, d'action et d'approbation [113]. Pour cela de nombreux outils existent avec des efficacités et méthodes de mise en œuvre qui varient et peuvent être adaptées selon l'objectif.

ACCOMPAGNER LA PRISE EN COMPTE DES USAGERS

Depuis les phases de conception préliminaires jusqu'aux phases de réalisation et d'usage, les professionnels et usagers du bâtiment peuvent se faire accompagner par une Assistance à Maîtrise d'Usage (AMU). L'objectif de l'AMU est d'allier les objectifs de performances souhaités avec le bien-être des occupants. Son rôle est alors de mettre en place des dynamiques collectives et participatives dès la conception en vue de co-construire des outils et indicateurs de suivi, d'animer des groupes de travail sur l'usage pour aboutir à des solutions concertées, etc. Présents dès les phases préliminaires les usagers sont intégrés garantissant ainsi la prise en compte des enjeux de l'usage et l'acceptation des solutions mises en œuvre dans la gestion du bâtiment [114].

L'implication de l'utilisateur est à opposer à l'automatisation complète de la gestion des systèmes. Dans ce dernier cas, l'instrumentation et la domotisation du bâtiment vont permettre de collecter des données (via différents capteurs) qui alimenteront la gestion automatique des systèmes. Automatisation et implication de l'utilisateur peuvent aussi être utilisées conjointement, mais il faudra veiller à l'articulation entre ces deux stratégies qui ne doivent pas aller à l'encontre l'une de l'autre.

L'implication des usagers consiste à considérer l'occupant comme acteur direct dans le contrôle du bâtiment et de ses systèmes. Pour cela divers outils d'information, de sensibilisation et d'implication peuvent être déployés [109]. Ces outils peuvent être classés en trois catégories : l'information et la sensibilisation, l'incitation douce et l'incitation forte.

LE CONFORT DES USAGERS

Puisque nous passons pour la plupart d'entre nous près de 90% de notre temps dans un bâtiment, le confort est un sujet essentiel pour l'utilisateur. Le confort dépend de paramètres « mesurable » (température, ambiance sonore, lumière, ...) mais le ressenti est quant à lui fortement subjectif. Les travaux menés par le Cercle Promodul/INEF4 au sein du groupe de travail « Confort et Santé : les bonnes pratiques dans le neuf et l'existant » ont permis de mettre en avant 5 enseignements pour améliorer la qualité de vie et le confort des occupants [115] :

- > *Allier apports lumineux, protections solaires et ventilation pour une meilleure performance énergétique ;*
- > *Combiner gestion automatique des équipements et prise en main de l'utilisateur ;*
- > *Garantir un air de qualité par le choix des matériaux et d'un système de ventilation efficace ;*
- > *Assurer un confort thermique d'été comme d'hiver ;*
- > *Concilier le confort avec les coûts.*

OUTILS D'INFORMATION ET DE SENSIBILISATION DE L'USAGER

La finalité de ces outils est avant tout pédagogique et vise la prise de conscience et l'action de l'utilisateur. Ils ont pour but de présenter les différents équipements d'un bâtiment tout en spécifiant les recommandations d'usage sur les gestes à adopter pour faire des économies d'énergie et atteindre le confort souhaité. L'objectif est alors de permettre à l'utilisateur d'acquérir les connaissances nécessaires à la compréhension du fonctionnement du bâtiment et de lui donner les méthodes pour qu'il devienne acteur de son propre bien-être.

Supports d'information et de sensibilisation

Il existe plusieurs supports d'information qui présentent les différents équipements, expliquent le fonctionnement général du bâtiment et donnent des indications sur les usages à adopter pour atteindre les performances visées. Le **livret d'accueil** ou **guide utilisateur** est par exemple un document pédagogique fourni lors de l'installation des usagers dans le bâtiment.



Complémentaires à la fourniture d'un guide utilisateur, les **réunions d'information** qui peuvent prendre la forme d'une conférence animée par un acteur professionnel du projet permettent également de présenter aux usagers les équipements d'un bâtiment et son fonctionnement. Tout comme le guide, ce type de réunion donne les recommandations d'usage permettant d'assurer l'atteinte des objectifs. C'est un moment privilégié pour répondre aux questionnements des utilisateurs et s'assurer qu'ils aient bien compris tous les éléments. Pour maximiser l'impact de ces réunions, il est préférable qu'elles soient programmées de façon périodique et espacées dans le temps pour permettre aux utilisateurs de mieux appréhender l'information reçue.

D'autres supports d'information évolutifs au cours du temps peuvent également être utilisés en supplément tels que des **panneaux d'information** papier ou électronique.



Figure 113 : Laquette de bâtiment LowCal situé à Pont de Barret : bureaux d'Enertech

De tels panneaux situés dans les zones d'accueil et de passage permettent de présenter les caractéristiques du bâtiment ainsi que l'évolution de ses consommations ou autres indicateurs clefs qui peuvent être définis en concertation avec les usagers pour plus d'efficacité. Un autre format peut passer par la diffusion de ces indicateurs via des comptes rendus périodiques.

→ *Il est important de s'assurer que le livret soit bien remis aux usagers qui ne sont pas nécessairement les propriétaires [109].*

→ *Bien que la fourniture d'un guide utilisateur soit indispensable, elle n'est pas suffisante, car il peut être mal lu et compris [109].*

→ *Pour être efficace, une réunion d'information doit être réalisée plusieurs mois après l'installation de l'utilisateur afin de présenter et discuter les premières données de consommation et de confort [109].*

→ *Les supports d'information évolutifs doivent afficher des indicateurs d'intérêt ludiques et choisis par les utilisateurs [109].*

Actions de concertation et de collaboration

Au-delà d'informer l'utilisateur, le faire **participer à la conception et construction** du bâtiment lui permet de faire remonter ses besoins et de s'assurer qu'ils soient bien pris en considération. Cela permet à l'utilisateur de s'approprier les solutions proposées, de les accepter et d'approuver leur fonctionnement. Lors de **réunions de concertation** qui peuvent prendre la forme de groupes de discussion, les usagers peuvent se regrouper et échanger sur des thématiques liées au fonctionnement du bâtiment et ainsi mettre en œuvre des actions communes. De telles réunions peuvent également être réalisées avec des acteurs professionnels pour co-concevoir les outils d'implication des usagers ; par exemple ils peuvent être impliqués dans la réalisation du guide utilisateur ou encore dans la sélection des indicateurs de suivi à afficher sur les supports d'information.



→ *Lorsque l'utilisateur est intégré, il accepte et approuve les solutions et leur fonctionnement : il est alors plus facile de le rendre acteur de son bien-être en l'impliquant volontairement via des outils d'incitation douce et forte.*

OUTILS D'INCITATION DOUCE

Les outils d'incitation douce, ou Systèmes Interactifs Persuasifs [116] consistent à faire passer l'utilisateur à l'action par la persuasion ou la ludification en s'appuyant sur différents facteurs de motivation tels que la récompense, la volonté écologique, la collaboration, la comparaison sociale ou même la compétition.

Incitation via la récompense

L'incitation par la récompense consiste à récompenser l'utilisateur avec une rémunération ou compensation financière (directe ou indirecte) lorsqu'il réalise des économies d'énergie via un comportement vertueux. A titre d'exemple on peut citer la formule « Mon Programme pour Agir » lancée par Engie qui est dotée d'un système de récompense sous forme de points KiloActs. Les clients sont incités à réaliser des actions spécifiques telles que suivre leurs consommations d'énergie, donner leurs avis, s'équiper, faire des travaux pour la réduction de la consommation. Les KiloActs peuvent alors être échangés contre des récompenses individuelles (gain d'un objet pour faire des économies d'énergie, bons de réductions, etc.) ou collectives (soutien d'un projet à impact environnemental et social).

Incitation via le suivi en direct d'indicateurs : monitoring, visualisation et pilotage

L'instrumentation d'un bâtiment, ou monitoring permet de relever un certain nombre de paramètres et de les retranscrire en temps réel sous forme d'indicateurs variés. Il est par exemple possible de visualiser via divers types d'interfaces le plus souvent tactiles la consommation énergétique réelle d'un bâtiment ou les températures maximales atteintes. Des tableaux de bord disponibles sur tablettes et smartphones permettent à l'utilisateur de suivre l'évolution de ces indicateurs de manière ludique et ainsi de modifier ses comportements selon les résultats qu'il interprète. Les indicateurs présentés sur ces tableaux de bord doivent être compris par les utilisateurs. Il est par exemple plus pertinent de parler d'économies réalisées en euros plutôt qu'en kWh. Les tableaux de bord peuvent également être utilisés par l'utilisateur pour communiquer sur sa perception du confort et sur le fonctionnement du bâtiment. Les informations ainsi récoltées peuvent être utiles pour améliorer la stratégie d'implication des usagers.



Figure 114 - Suivi et affichage des consommations et températures via le système CALYBOX 2020 WT ©DELTA DORE

D'autres technologies similaires d'information en temps réel permettent des représentations physiques ambiantes non personnelles. Il s'agit des technologies de « green nudge⁵ » qui sont source d'incitation douce à adopter un comportement plutôt qu'un autre en jouant avec la configuration de l'environnement ou la transmission d'informations. Le green nudge repose sur trois principes : une liberté de choix totale laissée aux individus, la simplicité de mise en place et un coût limité de l'intervention.

⁵ Nudge signifie « coup de pouce », « coup de coude » en anglais

Le pommeau de douche intelligent Amphiro A1 est par exemple un appareil qui indique la consommation d'eau à la fois avec des chiffres et l'image d'un oursin qui finit par couler si l'utilisateur reste trop longtemps sous la douche, le bloc de glace se brisant sous ses pieds. Cet affichage ludique est extrêmement efficace. Une étude portant sur 30 000 utilisateurs a montré une diminution de leur consommation énergétique d'en moyenne 23% [117].

Selon Thorsten STAAKE, l'inventeur du pommeau de douche, le succès de son invention tient en une chose : les utilisateurs n'ont aucun *effort* à faire. L'appareil, attaché au pommeau de douche, s'active automatiquement lorsque l'eau coule et « *les informations sont directement visibles par l'utilisateur, qui peut donc agir sur son comportement* » [118]. La volonté écologique de l'utilisateur est alors confrontée aux résultats qu'il observe et l'incite indirectement à adapter son comportement.



Figure 115 : Pommeau de douche intelligent Amphiro A1

Adapter sa consommation énergétique à celle de ses voisins est une autre application du « green nudge » déployée par la société américaine O'Power [119]. Elle a développé une facturation très particulière, diffusée à présent dans plus de quinze millions de foyers. En ouvrant son courrier, le consommateur d'énergie découvre sa propre consommation ainsi que la consommation moyenne de tous les habitants de son quartier et celle de ses voisins qualifiés « économes ». En fonction de sa consommation et de celle de ses voisins, le consommateur obtient une note qualitative (« Super », « Bien » ou « En Dessous De La Moyenne ») accompagnée de deux, d'un ou d'aucun smiley. Grâce à cette comparaison, chaque individu a eu envie d'agir pour obtenir une consommation plus faible. Cette méthode a été testée en Californie pendant un an sur 600 000 foyers. La réduction de la facture énergétique a été de 250 millions de dollars, avec un coût de 0\$.

La force de la norme sociale est très forte et peut largement inciter les usagers à agir. Par exemple : (même si l'information n'est pas forcément vraie) un panneau d'affichage de type « 90 % des résidents du quartier ferment leurs volets la nuit » inciterait l'utilisateur à agir et finalement atteindre l'objectif affiché par le panneau.

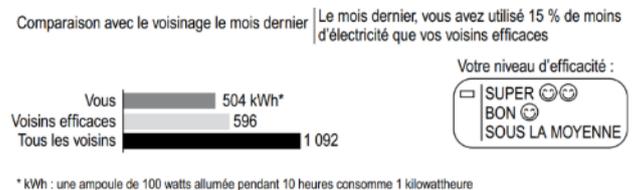


Figure 116 : Exemple de « green nudge » intégré à la facturation énergétique des occupants

Incitation via la ludification de l'information

La domotique et l'instrumentation d'un bâtiment peuvent être utilisées en tant que support de jeu pour inciter les adultes ainsi que leurs enfants à agir. Des applications basées sur les données fournies par l'instrumentation sont alors développées pour lancer des défis usagers : il faut qu'ils relèvent ces défis pour monter en compétences. Dès que le défi est réalisé, une notification est postée sur l'application et permet de monter en niveau. Le nombre d'utilisateurs ayant participé au challenge peut aussi être indiqué pour encourager les autres usagers à participer.

Par exemple Darwin a développé une plateforme web à laquelle chaque utilisateur peut se connecter. Des objectifs collectifs sont ciblés et chaque collaborateur (utilisateur) peut contribuer au challenge. Les objectifs peuvent être de différentes temporalités et concerner de nombreux sujets tels que la gestion de l'eau, de l'énergie, des déchets, de la mobilité et de la température.

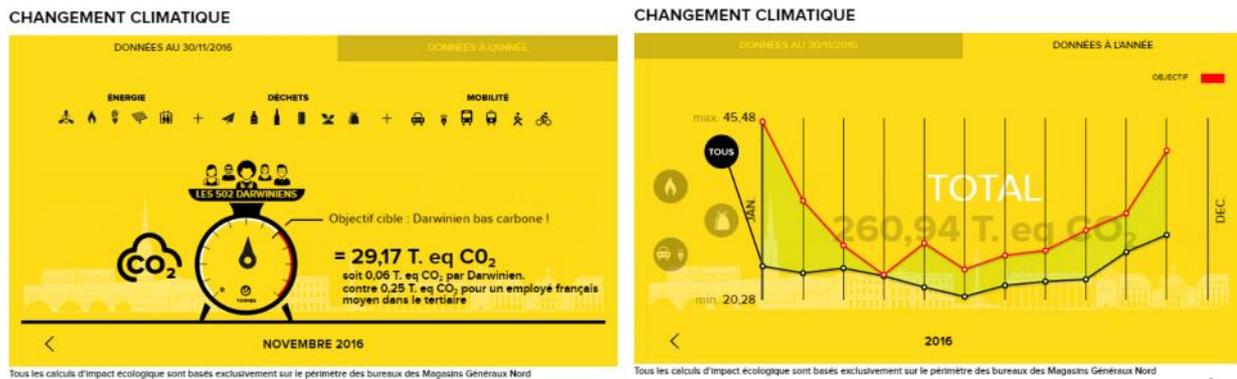


Figure 117 : Exemple de l'interface Darwin

OUTILS D'INCITATION FORTE

Les outils d'incitation forte peuvent passer par des supports similaires aux outils précités pour l'incitation douce. Ainsi divers supports peuvent être utilisés pour encourager l'utilisateur à agir en lui transmettant une alerte ou même une gêne.

Des détecteurs de dioxyde de carbone (CO₂) et de rayonnement solaire peuvent indiquer lorsqu'il faut ouvrir ou fermer les fenêtres et volets. C'est notamment le cas du Bâtiment B à Nantes où des signaux lumineux indiquent lorsque le taux de CO₂ est trop important dans les bureaux et que les portes doivent être ouvertes vers l'atrium central [Bâtiment B, Nantes] Le signal d'alerte est alors transmis sous la forme d'un son ou d'un signal lumineux.

Le GreenCube de GreenMe permet une mesure individuelle et en continu de la température, de l'humidité, de la qualité de l'éclairage, du bruit ainsi que du renouvellement d'air. Il permet aussi de mesurer le ressenti. Il peut être couplé avec une application en ligne qui analyse les données collectées et les utilise pour générer des recommandations.

Un autre exemple est l'utilisation d'interrupteurs de veille lumineux manuels. Ces interrupteurs permettent une économie de consommation d'électricité, mais aussi de surchauffe. C'est le cas notamment du Bâtiment bois debout à Montreuil où les prises sont équipées d'un petit signal lumineux qui peut être gênant la nuit s'il n'est pas débranché. Par exemple, Power AWARE Cord est une multiprise qui indique par des pulsations lumineuses qui la traversent que le système est resté branché et Flower Lamp est une lampe décorative qui représente les consommations énergétiques par une métaphore avec la floraison d'une fleur mécanique [120].



Figure 118 : Power AWARE Cord [120]



Figure 119 : Flower Lamp Static ! [120]

VI

INTÉGRATION
DES SOLUTIONS
EN CONCEPTION



Pour mettre en évidence les bénéfices apportés par les solutions présentées dans ce guide il est nécessaire que celles-ci soient correctement prises en compte lors de la conception de l'ouvrage. Ce chapitre fournit des recommandations sur la prise en compte de ces solutions lors des analyses environnementales, des calculs thermiques réglementaires et des simulations thermiques dynamiques (STD).

ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

Une analyse environnementale, aussi appelée Analyse en Cycle de Vie (ACV), vise à étudier l'impact de l'ouvrage projeté vis-à-vis de différents indicateurs. Dans les normes relatives à l'évaluation de la performance environnementale des bâtiments (NF EN 15978) et des produits de la construction (NF EN 15804), ces indicateurs sont classés en quatre catégories : impacts environnementaux (réchauffement climatique, appauvrissement de la couche d'ozone ...), utilisation de ressources (matières et énergie primaire renouvelables/non renouvelables, eau ...), déchets et flux sortants (par exemple composants destinés à la réutilisation ou au recyclage).

La future réglementation environnementale (RE 2020) d'application prévue en 2021 vient compléter avec l'analyse environnementale de l'ouvrage l'actuelle réglementation thermique (RT 2012) qui s'intéresse principalement à la consommation énergétique. Aujourd'hui la RE 2020 est en phase d'expérimentation au travers du label E+/C-. Ce label et donc la future RE 2020 s'intéressent plus spécifiquement aux émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage, c'est-à-dire à son impact sur le phénomène de changement climatique. L'indicateur étudié est nommé *Eges* (Emissions de GES) et s'exprime en kg eq. CO₂/m²SDP puisque le CO₂ est le principal gaz à effet de serre lié à l'activité humaine. Cet indicateur présente quatre composantes principales :

- Les émissions de GES liées aux produits de construction et équipements (indicateur *Eges*, *pce*) ;
- Les émissions de GES liées à l'énergie consommée dans le bâtiment pendant le temps de son utilisation considéré égal à 50 ans par convention ;
- Les émissions de GES liées aux consommations et rejets d'eau du bâtiment pendant le temps de son utilisation ;
- Les émissions de GES liées à la phase de construction du bâtiment (chantier).

Les solutions présentées dans ce guide ont principalement un impact sur la première de ces composantes (indicateur *Eges*, *pce*). Elles nécessitent la mise en œuvre de matériaux (brise-soleil, peinture pour les toits rafraichissants ...) et d'équipements (ventilateur, capteur ...). Dans une moindre mesure, elles impactent également la seconde composante relative aux consommations d'énergie du bâtiment. Mêmes si ces solutions permettent de limiter le recours au chauffage, à la climatisation, à la ventilation mécanique et à l'éclairage artificiel (et donc d'éviter les consommations énergétiques associées), elles peuvent nécessiter un peu d'énergie pour leur fonctionnement. Ce sont les calculs thermiques (RT 2012) qui permettent de définir les consommations énergétiques et donc les émissions de GES associées.

Pour tenir compte des émissions de gaz à effet de serre liées aux produits de construction et équipements utilisés (indicateur *Eges*, *pce*), le label E+/C- et la future RE 2020 s'appuient sur les données contenues dans les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) des produits de la construction et les Profils Environnementaux Produits (PEP) des équipements. Les FDES et PEP qui peuvent être considérés sont regroupés sur la base INIES (<http://www.inies.fr>). Il existe plusieurs types de données environnementales :

- **Données spécifiques** : il s'agit de FDES ou PEP dédiés à un produit. Ces données sont produites sous la responsabilité du fabricant et font l'objet d'une vérification par un organisme tiers ;
- **Données collectives** : il s'agit de FDES ou PEP dédiés à une gamme de produits similaires. Ces données sont produites sous la responsabilité d'un regroupement de fabricants (association, syndicat ...). Ces données font également l'objet d'une vérification par un organisme tiers ;
- **Données par défaut** : il s'agit de modules de données environnementales génériques par défaut (MDEGD) dédiés à une gamme de produits similaires. Ces données sont utilisées en l'absence de données spécifiques et collectives. Elles sont produites par les pouvoirs publics.

Les données par défaut (MDEGD) sont produites pour pallier un manque de données spécifiques et collectives. Les impacts associés sont volontairement majorés pour inciter les fabricants à réaliser leurs propres FDES et PEP. Ces MDEGD sont donc à utiliser à défaut d'autres données disponibles. Lors de la conception d'un bâtiment, le choix entre une donnée spécifique ou une donnée collective doit se faire au regard des objectifs. L'utilisation d'une donnée collective permet d'évaluer l'impact d'un type de produit (gamme de produits). Ces données sont le plus souvent utilisées pour comparer deux types de produits différents (par exemple bardage bois avec bardage métal). Elles sont aussi utilisées lorsque la référence du produit mis en œuvre n'est pas encore connue ou si celui-ci ne dispose pas de donnée spécifique. Une donnée spécifique permet de considérer les impacts liés à un produit en particulier. Ces données sont généralement sélectionnées lorsque le produit

utilisé est connu ou bien pour comparer deux produits similaires (par exemple bardage bois du fabricant X avec celui du fabricant Y).

Dans le label E+/C- et la future RE 2020, les matériaux et équipements sont regroupés dans les 13 lots suivants :

- Lot 1 : VRD (Voirie et Réseaux Divers)
- Lot 2 : Fondations et infrastructures
- Lot 3 : Superstructure – Maçonnerie
- Lot 4 : Couverture – Etanchéité – Charpente – Zinguerie
- Lot 5 : Cloisonnement – Doublage – Plafonds suspendus – Menuiseries intérieures
- Lot 6 : Façades et menuiseries extérieures
- Lot 7 : Revêtements des sols, murs et plafonds – Chape – Peintures – Produits de décoration
- Lot 8 : CVC (Chauffage – Ventilation – Refroidissement – Eau chaude sanitaire)
- Lot 9 : Installations sanitaires
- Lot 10 : Réseaux d'énergie (courant fort)
- Lot 11 : Réseaux de communication (courant faible)
- Lot 12 : Appareils élévateurs et autres équipements de transport intérieur
- Lot 13 : Équipements de production locale d'électricité

À ce jour, plusieurs de ces lots font l'objet de valeurs forfaitaires. Celles-ci peuvent être utilisées pour tenir compte des émissions de GES associées à ces lots. Le recours à des valeurs forfaitaires est temporaire. Lorsque le nombre de FDES et PEP disponibles pour ces lots sera jugé suffisant, les lots sortiront du cadre de la méthode forfaitaire. À ce jour, cinq lots sont concernés par les valeurs forfaitaires. Il s'agit des lots 8, 9, 10, 11 et 12. Le recours aux valeurs forfaitaires ne permet pas de valoriser vis-à-vis du label E+/C- et de la future RE 2020 les éventuels efforts de conception sur ces lots. En effet, les valeurs forfaitaires traduisent l'impact environnemental d'une conception conventionnelle.

[Recommandation pour l'évaluation de l'indicateur Eges, pce des solutions présentées](#)

Les fiches qui suivent fournissent pour chaque solution étudiée dans ce guide des recommandations pour l'évaluation de l'indicateur *Eges, pce* du label E+/C- et de la future réglementation RE 2020. Les lots impactés par la solution sont identifiés. Il est précisé si ces lots peuvent faire l'objet du recours à des valeurs forfaitaires. Les fiches donnent également un aperçu des données environnementales (FDES et PEP) disponibles sur la base INIES qui peuvent être considérées pour tenir compte de l'impact carbone des solutions.

La base INIES est en constante évolution. De nouvelles données sont intégrées très régulièrement alors que d'autres sont supprimées, car obsolètes. Les informations fournies dans ce guide ne dispensent donc pas le concepteur de s'intéresser aux dernières données disponibles.

ANALYSE ENERGETIQUE

La RT 2012 est la réglementation thermique française cadrant la thermique des bâtiments pour les constructions neuves en France. Elle succède à plusieurs versions antérieures RT 1974, 1982, 2000 et 2005. Depuis le 1er janvier 2012, l'application de la RT2012 est obligatoire pour tout projet de construction neuf en France.

Courant 2021, la future réglementation environnementale RE 2020 sera applicable aux bâtiments neufs. Le terme thermique sera ainsi remplacé par environnement tel qu'explicité dans la section portant sur l'analyse environnementale. En effet, cette nouvelle réglementation introduit une innovation majeure : elle ne contrôle plus seulement la consommation énergétique des bâtiments neufs, mais aussi leur bilan carbone, en incluant l'analyse du cycle de vie des matériaux et équipements employés. Tous les bâtiments neufs devront également être à énergie positive.

Le calcul réglementaire (calcul RT) permet de vérifier que le projet de construction d'un bâtiment respecte les standards réglementaires imposés par la réglementation thermique en vigueur. Il est basé sur la méthode Th-BCE 2012 développée par le CSTB. La RT 2012 établit 3 indicateurs réglementaires et leurs limites à ne pas dépasser : le *Bbio* (Besoin Bioclimatique), le *Cep* (Coefficient d'Énergie Primaire) ou encore la *Tic* (Température Intérieure Conventionnelle) :

- Le *Bbio* permet de caractériser l'impact de la conception bioclimatique sur la performance énergétique d'un bâtiment indépendamment des équipements énergétiques. Il tient compte des besoins de refroidissement, de chauffage et d'éclairage artificiel. Cet indice doit être inférieur à une valeur maximale, le *Bbio_{max}* pondérée selon le type de bâtiment et son implantation géographique.
- Le *Cep* représente la consommation d'énergie primaire⁶ relative aux postes de chauffage, de refroidissement, de l'éclairage, de la production d'eau chaude et des auxiliaires. Il doit être inférieur à une limite pondérée d'environ 50 kWh_{ep}/m²/an. La pondération de cette valeur est fonction de l'implantation géographique, de l'altitude à laquelle l'habitation se situe, du type de bâtiment, de sa surface et des émissions de gaz à effet de serre des énergies utilisées.
- La *Tic*⁷ représente la température maximale atteinte dans le bâtiment après une séquence de cinq jours très chauds. Elle ne doit pas dépasser une valeur de référence appelée *Tic_{ref}* dont la valeur est calculée par le moteur de calcul RT et est spécifique au projet étudié. Selon leur zone climatique, type d'usage et exposition au bruit, certains bâtiments ne sont pas concernés par cette exigence.

De plus, la RT 2012 impose des exigences de résultats de calcul selon plusieurs coefficients, mais aussi de nombreuses exigences de moyens (étanchéité, surface vitrée, etc.).

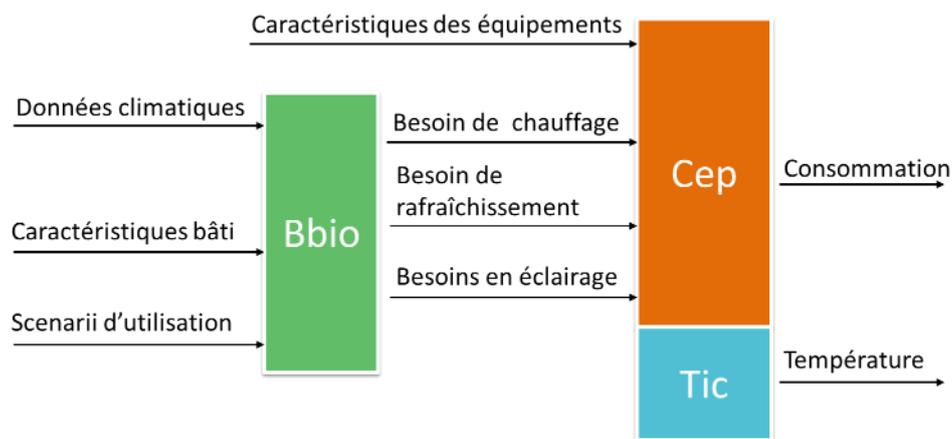


Figure 120 : Indicateurs réglementaires de la RT 2012

⁶ L'exigence sur la consommation est exprimée en énergie primaire. L'énergie primaire est un indicateur qui tient compte des pertes liées à la production, à la transformation, au transport et au stockage de l'énergie. Le coefficient affecté à l'électricité est de 2,58 et de 1 pour les autres énergies (gaz naturel, GPL, bois-énergie, réseau de chaleur).

⁷ La RE 2020 abordera plus spécifiquement le confort d'été avec un nouvel indicateur, la Dies ou Durée d'inconfort d'été statique.

Les solutions présentées dans ce guide jouent sur les caractéristiques du bâtiment et/ou les caractéristiques des équipements et peuvent ainsi impacter les trois indicateurs réglementaires.

Afin de faire respecter la RT2012, la DHUP⁸ met à disposition une méthode de calcul Th-BCE 2012 (arrêtés du 20 juillet 2011 et du 30 avril 2013) qui permet de vérifier ces différents indicateurs réglementaires. Bien que très complète cette méthode de calcul ne peut intégrer toutes les spécificités des systèmes existants. L'arrêté du 26 octobre 2010 permet d'intégrer de telles spécificités au travers d'un dispositif appelé communément « TITRE V ». Celui-ci permet ainsi d'intégrer de nouveaux systèmes et innovations non pris en compte dans la méthode de calcul RT sous réserve de justifications. Un titre V doit être agréé et peut être de trois types :

- « Titre V opération » : dédié à une unique opération de construction et généralement fait par un maître d'ouvrage.
- « Titre V système » : dédié à un produit ou système énergétique et fait soit par un industriel soit par un groupement d'industriels souhaitant valoriser leurs produits ou systèmes dans le calcul RT. Une fois agréée une telle demande est valable pour le produit ou système énergétique donné, quel que soit l'opération visée dans le champ d'application de l'agrément. Cela peut se faire de deux manières :
 - Pré/Post traitement : l'adaptation proposée consiste à établir des règles de saisies par équivalence de données d'entrées déjà présentes dans la méthode de calcul RT et/ou la proposition de traitement des données de sortie du calcul.
 - Extension dynamique : la méthode de prise en compte du système peut être constituée d'un algorithme s'intégrant dans la méthode de calcul réglementaire.
- « Titre V réseau » : dédié à un réseau de chaleur ou de froid généralement réalisé par un gestionnaire de réseau. La demande porte sur l'agrément d'une valeur de contenu CO₂ des kWh énergétiques livrés aux sous-stations du réseau.

Le calcul réglementaire permet de positionner un bâtiment par rapport à des standards réglementaires indépendamment de son utilisation réelle. De nombreuses hypothèses sont alors standardisées et fixées et correspondent à des moyennes statistiquement établies pour l'ensemble des projets étudiés. Par conséquent, les résultats du moteur de calcul réglementaire sont approchés. Bien que la réglementation thermique ait pour atout de réguler, contrôler et valider la consommation globale du parc immobilier français sur une base commune, elle n'est pas suffisante pour concevoir un système constructif dans un environnement précis. D'autres modèles plus détaillés doivent alors être utilisés pour la conception de systèmes constructifs performants. Ces logiciels de simulations thermiques dynamiques (STD) doivent pouvoir prendre en compte de manière précise les caractéristiques du système constructif du bâtiment étudié et de son environnement ainsi que des scénarios d'utilisation dynamiques précis qui diffèrent généralement de ceux de la réglementation thermique. Il est donc important de bien dissocier les calculs RT et de calculs STD qui ont des objectifs à la fois distincts et complémentaires.

Le calcul RT permet, comme cité précédemment, de vérifier qu'un projet respecte les réglementations et ainsi d'attester de la conformité du projet selon les exigences énergétiques pour le dépôt de permis de construire. Ce calcul n'a pas pour objet d'aider à la conception énergétique du bâtiment.

Le calcul STD fait appel à un moteur de calcul qui permet de modéliser le comportement thermique prévisionnel d'un projet. Contrairement au calcul réglementaire, le thermicien en charge de l'étude a la possibilité de modifier l'ensemble des données en entrée (occupation du bâtiment heure par heure, équipements installés, etc.) et d'adapter la modélisation à l'usage réel prévisionnel. Les calculs sont donc réalisés au cas par cas, avec pour objectif de s'approcher au maximum de la réalité et de comparer plusieurs variantes afin de guider les décisions.

Recommandations pour intégrer les solutions présentées dans les calculs RT et STD

Les fiches qui suivent fournissent pour chaque solution étudiée dans ce guide des recommandations pour leur intégration dans les calculs RT et STD. Les indicateurs réglementaires impactés par la solution sont identifiés et quelques variables d'intérêt à étudier en STD sont spécifiées. Il est précisé si certains produits ou systèmes correspondant à ces solutions font l'objet d'un TITRE V. Quelques instructions et astuces sont données à titre d'exemple pour faciliter la saisie des solutions dans les logiciels de calcul STD.

⁸ Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages

SYSTEME D'ÉCLAIRAGE NATUREL INDIRECT

ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

Étagères à lumière

PRODUITS ET EQUIPEMENTS CONCERNES	Les étagères à lumière sont des dispositifs installés en façade et assimilables à des protections solaires.
LOT E+/C- CONCERNE	Lot 6 : Façades et menuiseries extérieures
RECOURS POSSIBLE A DES VALEURS FORFAITAIRES	NON
NIVEAU D'ARBORESCENCE BASE INIES	- Bâtiment -> Produits de la construction -> Menuiseries intérieures et extérieures / fermetures -> Volets / volets roulants / persiennes / stores / brise-soleil ET - Bâtiment -> Produits de la construction -> Menuiseries intérieures et extérieures / fermetures -> Divers
DONNÉES	
SPECIFIQUES	NON
COLLECTIVES	NON
PAR DEFAUT (MDEGD)	NON
CONSEIL SUR LE CHOIX DE LA DONNEE ENVIRONNEMENTALE	Il n'existe pas de donnée environnementale spécifique, collective ou de MDEGD dédiée aux étagères à lumière. Dans l'attente de telles valeurs, une étagère à lumière peut être assimilée à l'assemblage d'un brise-soleil et d'un revêtement réfléchissant (miroir). Pour le brise-soleil il existe des MDEGD pour différents matériaux. Une MDEGD est également disponible dans la catégorie "Divers" pour les miroirs.

Réflecteurs de lumière

PRODUITS ET EQUIPEMENTS CONCERNES	Les réflecteurs de lumière sont des dispositifs indépendants installés en façade.
LOT E+/C- CONCERNE	Lot 6 : Façades et menuiseries extérieures
RECOURS POSSIBLE A DES VALEURS FORFAITAIRES	NON
NIVEAU D'ARBORESCENCE BASE INIES	- Bâtiment -> Produits de la construction -> Menuiseries intérieures et extérieures / fermetures -> Divers
DONNÉES	
SPECIFIQUES	NON
COLLECTIVES	NON

PAR DEFAUT (MDEGD)	NON
CONSEIL SUR LE CHOIX DE LA DONNÉE ENVIRONNEMENTALE	Il n'existe pas de donnée environnementale spécifique, collective ou de MDEGD dédiée aux réflecteurs à lumière. Dans l'attente de telles valeurs, un réflecteur à lumière peut être assimilé à un revêtement réfléchissant (miroir). Une MDEGD est disponible pour les miroirs.

Conduits de lumière

PRODUITS ET EQUIPEMENTS CONCERNES	Les conduits de lumière sont composés d'une partie vitrée installée en toiture et d'un conduit qui apporte la lumière jusqu'à l'intérieur.
LOT E+/C- CONCERNE	Non défini
RECOURS POSSIBLE A DES VALEURS FORFAITAIRES	Non défini
NIVEAU D'ARBORESCENCE BASE INIES	- Bâtiment -> Produits de la construction -> Menuiseries intérieures et extérieures / fermetures -> Divers
DONNÉES	
SPECIFIQUES	NON
COLLECTIVES	NON
PAR DEFAUT (MDEGD)	NON
CONSEIL SUR LE CHOIX DE LA DONNÉE ENVIRONNEMENTALE	La base INIES ne comporte à ce jour aucune donnée environnementale pour les conduits de lumière. Il s'agit de produits bien spécifiques qu'il ne semble à ce jour pas possible de prendre en compte dans le cadre du label E+/C- et de la future RE 2020.

Puits de lumière

PRODUITS ET EQUIPEMENTS CONCERNES	Les puits de lumière sont réalisés au moyen d'une paroi vitrée installée en toiture et éventuellement de parois vitrées intérieures pour le passage de la lumière au travers des planchers et cloisons.
LOTS E+/C- CONCERNE	Lot 6 : Façades et menuiseries extérieures Lot 5 : Cloisonnement - Doublage - Plafonds suspendus - Menuiseries intérieures
RECOURS POSSIBLE A DES VALEURS FORFAITAIRES	NON
NIVEAU D'ARBORESCENCE BASE INIES	- Bâtiment -> Produits de la construction -> Menuiseries intérieures et extérieures / fermetures -> Fenêtres de toit ET - Bâtiment -> Produits de la construction -> Menuiseries intérieures et extérieures / fermetures -> Fenêtres / portes-fenêtres ET - Bâtiment -> Produits de construction -> Façades -> Bardage (vêtire / vêtage / parement) -> Verre
DONNÉES	
SPECIFIQUES	OUI

COLLECTIVES	OUI
PAR DEFAUT (MDEGD)	OUI

CONSEIL SUR LE CHOIX DE LA DONNÉE ENVIRONNEMENTALE	Il existe des données environnementales spécifiques pour les fenêtres de toit, verrières et autres parois vitrées qui peuvent entrer dans la composition d'un puits de lumière. Le fabricant VELUX propose 3 FDES pour des fenêtres de toit et verrières. Il existe également une MDEGD pour les lanternes. Pour les éventuelles parois vitrées intérieures qui peuvent entrer dans la composition d'un puits de lumière, il existe plusieurs données spécifiques, collectives et également des MDEGD.
--	---

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

L'éclairage naturel indirect permet d'avoir accès à une luminosité naturelle dans des zones où l'accès à l'éclairage naturel direct est insuffisant ou inadapté. Certains systèmes d'éclairage naturel direct tels que les réflecteurs, les étagères à lumière et les conduits de lumière n'affectent pas ou peu les besoins de chauffage ou de rafraîchissement d'un bâtiment. Les puits de lumière demandent quant à eux une certaine vigilance quant aux risques de surchauffe qu'ils peuvent engendrer et peuvent également être étudiés vis-à-vis de l'impact qu'ils peuvent avoir en termes de besoin de chauffage.

Calcul RT

Le calcul RT valorise le besoin en éclairage naturel (*Becl*) via l'indicateur réglementaire *Bbio*. Plus il y a de surfaces vitrées (horizontales ou verticales), meilleur sera le *Becl* [121]. Ainsi le *Bbio* est directement impacté par la présence de puits de lumière facilement modélisables dans les outils de calcul réglementaires.

En revanche les besoins de chauffage (*Bch*) peuvent être augmentés en raison des déperditions thermiques qui sont plus importantes pour des surfaces vitrées que des surfaces isolées. Ces déperditions peuvent néanmoins être compensées par les apports solaires engendrés par le puits de lumière.

Ces apports solaires peuvent par ailleurs augmenter les besoins de refroidissement (*Bfr*) dans le cas de bâtiment climatisé ou bien la valeur de l'indicateur de température intérieure, la *Tic*. Cet indicateur n'est pas suffisant pour assurer le dimensionnement au confort thermique. Il est alors recommandé de faire une étude STD pour assurer le dimensionnement et de ne considérer la *Tic* qu'en tant que garde-fou à respecter [121].

INTEGRATION AUX CALCULS RT	
ÉTAGÈRES À LUMIÈRE	Nécessité de réaliser un TITRE V pour une opération ou un produit spécifique. Il n'existe à ce jour aucun TITRE V pour ce type de produit.
REFLECTEURS DE LUMIÈRE	
CONDUITS DE LUMIÈRE	Saisie d'une menuiserie en toiture avec les propriétés thermiques et lumineuses du produit.
PUITS DE LUMIÈRE	

Calcul STD

Il est intéressant lors des simulations thermiques dynamiques de comparer l'évolution de la température intérieure avec et sans solution.

D'autres simulations complémentaires peuvent être faites avec des modèles de calcul d'éclairage naturel permettant de calculer des variables d'intérêt liées à la luminosité. Plusieurs indicateurs existent pour évaluer l'impact du système constructif sur le confort visuel :

- Le Facteur de Lumière du Jour (FLJ) [122] : indicateur le plus couramment employé qui représente le facteur de l'éclairement naturel extérieur reçu en un point donné. C'est un indicateur statique basé sur un ciel couvert. Un facteur FLJ élevé indique une pénétration de la lumière naturelle élevée dans la zone d'activité. Cet indicateur ne permet pas de tenir compte de l'inconfort lié à l'éblouissement.
- La probabilité d'éblouissement lumineux [123] : facteur d'éblouissement qui, selon une direction donnée, calcule le potentiel d'éblouissement en termes de pourcentage d'occupants qui pourraient être éblouis dans un local. Plus celui-ci est élevé, plus l'inconfort est important. Cet indicateur est complémentaire au FLJ.
- L'autonomie lumineuse [124] : pourcentage ou nombre d'heures d'occupation annuelle où le niveau minimum d'éclairement requis est assuré par la seule lumière naturelle. Cet indicateur est utile pour concevoir des solutions

dynamiques qui prennent en compte les conditions météorologiques, mais également pour estimer les besoins en matière d'éclairage artificiel. Une autonomie lumineuse élevée est représentative d'un système constructif favorable à la lumière naturelle. Tout comme le FLJ cet indicateur ne permet pas de tenir compte de l'éblouissement.

- L'autonomie lumineuse maximum : pourcentage ou nombre d'heures d'occupation annuelle où le niveau d'éclairage dépasse une valeur seuil. C'est un indicateur permettant de valoriser les solutions qui limitent l'éblouissement. Plus l'autonomie lumineuse maximum est importante, plus il y a un risque d'inconfort visuel. Cet indicateur est complémentaire à celui de l'autonomie lumineuse.
- L'éclairage naturel utile [125] : pourcentage ou nombre d'heures d'occupation annuelle où le niveau d'éclairage assuré par la seule lumière naturelle est compris dans un intervalle de tolérance préalablement fixé. Un indicateur élevé est représentatif d'un bon confort visuel. C'est l'indicateur dynamique le plus complet en termes de confort visuel puisqu'il permet de valoriser les systèmes constructifs qui favorisent l'éclairage naturel au détriment de l'éclairage artificiel sans toutefois qu'il devienne une source d'éblouissement importante.

Ces indicateurs peuvent être calculés à l'aide de logiciels d'éclairage global, qui à partir d'algorithmes spécifiques (radiosité et lancer de rayons) font un calcul tridimensionnel de la propagation de la lumière [126].

L'insertion d'un puits et d'un conduit de lumière peut s'effectuer via des modèles de calcul STD et d'éclairage naturel.

Par exemple dans un logiciel de calcul STD tel que Pléiades, l'insertion d'une toiture vitrée ou d'un velux se fait en trois temps :

- Tracé du périmètre de la menuiserie au niveau de la toiture
- Spécification de l'inclinaison de la menuiserie
- Sélection du type de menuiserie qui précise les caractéristiques telles que le coefficient de transmission lumineux, le facteur solaire et le coefficient de déperdition thermique.

Dans le module STD Comfie de Pléiades la bibliothèque des menuiseries est composée de conduits de lumières de la marque Solarspot®. Leur diamètre varie entre 250 mm et 900 mm et leur longueur entre 0.6 m et 1.2m. Ce logiciel permet ensuite de calculer le facteur de lumière du jour.

Concernant l'étagère à lumière et le réflecteur, il est possible d'insérer des casquettes de dimensions choisies et de les revêtir d'un matériau réfléchissant. La saisie de ce type de système passe par la caractérisation des états de surface qui les composent en indiquant notamment le coefficient de réflexion lumineuse. Ce coefficient devra aussi bien être renseigné pour les surfaces réfléchissantes composées de miroirs tels que les réflecteurs et les étagères que pour les murs et plafonds sur lesquels la lumière est réfléchie.

BRASSEUR D'AIR

ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

PRODUITS ET EQUIPEMENTS CONCERNES	Les brasseurs d'air sont des équipements électriques fixés au plafond.
LOT E+/C- CONCERNE	Lot 8 : CVC (Chauffage - Ventilation - Refroidissement - Eau chaude sanitaire)
RECOURS POSSIBLE A DES VALEURS FORFAITAIRES	OUI
NIVEAU D'ARBORESCENCE BASE INIES	Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Équipements de génie climatique -> Divers
DONNÉES	
SPECIFIQUES	NON
COLLECTIVES	NON
PAR DEFAUT (MDEGD)	OUI
CONSEIL SUR LE CHOIX DE LA DONNÉE ENVIRONNEMENTALE	La base INIES présente une seule donnée par défaut (MDEGD) permettant de tenir compte de la présence de brasseurs d'air (plafonnier).

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

Le confort hygrothermique d'un individu dépend d'un ensemble de paramètres tels que la température radiante, la température de l'air ambiant, l'humidité, les mouvements d'air, le métabolisme et l'habillement. Pour atteindre un confort hygrothermique suffisant, la combinaison de ces paramètres doit se situer à l'intérieur des limites d'une « zone de confort ». En période estivale, le brasseur d'air permet d'améliorer le confort thermique via les mouvements d'air qu'il induit. En hiver la déstratification thermique permet d'homogénéiser la température et d'améliorer la température de confort localisée au niveau de l'individu.

Calcul RT

Les mouvements d'air n'entrent pas en compte dans les calculs RT 2012. Les brasseurs d'air n'ont donc pas d'impact sur les indicateurs réglementaires actuels. Il semblerait a contrario que leur impact sera considéré dans la RE 2020 au travers du nouvel indicateur de confort thermique, la Dies [37].

Calcul STD

Les logiciels de STD ne permettent pas de prendre en compte l'influence des brasseurs d'air sur le confort de l'utilisateur. En effet, les maillages sont limités. Il n'est pas possible d'obtenir les différentes températures du haut et du bas d'une pièce : la température en sortie est la moyenne de la température obtenue dans une pièce.

La mécanique des fluides, aussi appelée CFD (Computational Fluid Dynamics) peut s'effectuer sur différents logiciels disposant d'une très grande précision de maillage 3D. Celle-ci permet de calculer à n'importe quel point d'un volume d'air prédéfini dans et autour d'un bâtiment, la température, la vitesse et d'autres propriétés. Différents logiciels tels que DesignBuilder⁹, Flow 3D, Autodesk CFD, etc. permettent de faire ces études et ainsi estimer la vitesse d'air et la température à une hauteur définie suite à l'implémentation d'un brasseur d'air.

⁹ Le logiciel DesignBuilder ne permet pas de considérer les mouvements d'air en STD, mais en CFD.

SURVENTILATION, Puits Climatique, Ventilation Naturelle & Hybride et Ventilation Double Flux

ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

Surventilation

<p>PRODUITS ET EQUIPEMENTS CONCERNES</p>	<p>La surventilation peut être naturelle, hybride ou mécanique. Dans le cas des systèmes hybrides et mécaniques, c'est généralement le système de renouvellement d'air hygiénique qui est conçu pour assurer également la surventilation. Des entrées d'air spécifiques peuvent compléter le système. Dans le cas de la surventilation naturelle, l'air circule sans l'aide de ventilateur. Des extracteurs placés en toiture sont généralement utilisés. Les menuiseries extérieures peuvent également jouer le rôle d'entrée/sortie d'air.</p> <p>Les systèmes de surventilation font donc appel à divers composants : ventilateurs, entrées d'air, extracteurs, gaines, menuiseries extérieures, motorisation, capteurs ...</p>
<p>LOTS E+/C- CONCERNE</p>	<p>Lot 8 : CVC (Chauffage - Ventilation - Refroidissement - Eau chaude sanitaire) Lot 6 : Façades et menuiseries extérieures Lot 10 : Réseaux d'énergie (courant fort)</p>
<p>RECOURS POSSIBLE A DES VALEURS FORFAITAIRES</p>	<p>OUI pour les lots 8 et 10</p>
<p>NIVEAU D'ARBORESCENCE BASE INIES</p>	<p>- Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Diffusion d'air -> Entrées d'air ET - Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Caisson de ventilation ET - Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Appareillage d'installation pour les réseaux d'énergie électrique et de communication (≤ 63 Ampères) -> Appareillage modulaire destiné aux enveloppes (gestion des ouvrants et volets ; capteurs pluie, soleil ...) ET - Bâtiment -> Produits de construction -> Menuiseries intérieures et extérieures / fermetures (fenêtres / portes-fenêtres ; fenêtres de toit) ET - Bâtiment -> Produits de construction -> Façades -> Murs rideaux et verrières</p>
<p>DONNÉES</p>	
<p>SPECIFIQUES</p>	<p>OUI</p>
<p>COLLECTIVES</p>	<p>OUI</p>
<p>PAR DEFAUT (MDEGD)</p>	<p>OUI</p>
<p>CONSEIL SUR LE CHOIX DE LA DONNEE ENVIRONNEMENTALE</p>	<p>Les composants d'un système de surventilation peuvent être nombreux. Pour chacun d'eux, il convient de vérifier l'existence de données spécifiques, collectives ou de MDEGD.</p> <p>Concernant le lot 8 : La base INIES présente des données spécifiques et des MDEGD pour les caissons de ventilation/extraction, les Centrales de Traitement d'Air (CTA) ainsi que pour les conduits et accessoires de réseaux. Il n'existe à ce jour aucune donnée environnementale pour les extracteurs d'air de type tourelle à vent.</p> <p>Des MDEGD sont disponibles pour les entrées d'air et bouches d'extraction.</p>

Dans le cas où les données environnementales disponibles ne sont pas suffisantes, il convient d'avoir recours aux valeurs forfaitaires pour le lot 8.

Concernant le lot 6 :

La base INIES présente des données spécifiques, collectives et des MDEGD pour tenir compte des menuiseries extérieures (menuiserie de façade, fenêtre de toit, verrière) qui peuvent entrer dans la composition d'un système de surventilation. Il convient de sélectionner en priorité les données spécifiques puis collectives si elles existent pour les produits mis en œuvre. Autrement, il convient d'utiliser les MDEGD disponibles.

Concernant le lot 10 :

Des données spécifiques et des MDEGD sont disponibles pour tenir compte des éventuels capteurs de température, pluie et soleil. Un MDEGD est disponible pour la gestion des ouvrants qui peuvent composer le système de surventilation.

Dans le cas où les données environnementales disponibles ne sont pas suffisantes, il convient d'avoir recours aux valeurs forfaitaires pour le lot 10.

Puits climatique

PRODUITS ET
EQUIPEMENTS
CONCERNES

Un système de **puits climatique** est généralement couplé au système de renouvellement d'air hygiénique (non considéré dans cette fiche). Le puits climatique se compose d'un réseau de canalisations enterré dans lequel circule de l'air (système aéraulique) ou un fluide caloporteur (système hydraulique). Pour les systèmes aérauliques, l'air neuf pénètre dans le réseau enterré via une borne de prise d'air extérieure équipée d'un filtre à air. Dans le cas d'un système hydraulique, un échangeur de chaleur (air/eau) permet le raccord au système de renouvellement d'air. Alors que pour les systèmes aérauliques c'est le système de renouvellement d'air qui assure la circulation de l'air à l'intérieur du réseau enterré, pour les systèmes hydrauliques la mise en place d'un circulateur est nécessaire.

LOTS E+/C-
CONCERNE

Lot 8 : CVC (Chauffage - Ventilation - Refroidissement - Eau chaude sanitaire)
Lot 1 : VRD (Voirie et Réseaux Divers)

RECOURS POSSIBLE A
DES VALEURS
FORFAITAIRES

OUI pour le lot 8

NIVEAU
D'ARBORESCENCE
BASE INIES

- Bâtiment -> Produits de construction -> Voirie / réseaux divers (y compris réseaux intérieurs) et aménagements extérieurs à la parcelle -> **Gaines / fourreaux**
ET
- Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Équipements de génie climatique -> **Traitement d'air**
ET
- Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Équipement de génie climatique -> **Divers**

DONNÉES

SPECIFIQUES

OUI

COLLECTIVES

OUI

PAR DEFAUT (MDEGD)

OUI

CONSEIL SUR LE CHOIX
DE LA DONNEE
ENVIRONNEMENTALE

Concernant le lot 8 :

Les composants d'un puits climatique pris en compte au travers du lot 8 sont les entrées d'air, filtres, éventuels échangeurs de chaleur (eau/air) et circulateurs pour les systèmes hydrauliques. À ce jour il n'existe aucune donnée environnementale pour les bornes de prise d'air extérieur, les échangeurs de chaleur eau/air et les circulateurs hydrauliques. Il existe un MDEGD pour les filtres à air. En l'absence de donnée il convient d'utiliser les valeurs forfaitaires pour le lot 8.

Le produit INNOVERT (puits climatique et système de plafond rafraichissant associé) fait l'objet d'une FDES. Il s'agit à ce jour de la seule donnée spécifique de la base INIES associée au puits

climatique. Cette donnée environnementale inclut le réseau de canalisations (celui-ci ne doit pas être comptabilisé une seconde fois au travers du lot 1).

Concernant le lot 1 :

Le réseau de canalisations enterré du puits climatique aéraulique ou hydraulique est pris en compte au travers du lot 1. Il existe des données collectives et des MDEGD pour tenir compte des gaines enterrées. Il convient de sélectionner les données correspondant aux matériaux utilisés et aux sections des gaines mises en œuvre.

Ventilation naturelle ou hybride

PRODUITS ET
EQUIPEMENTS
CONCERNES

La mise en place d'une **ventilation naturelle ou hybride** nécessite de nombreux composants. L'entrée d'air neuf peut se faire au niveau des menuiseries extérieures dont l'ouverture peut être motorisée et automatisée (système de gestion et capteurs). Des témoins lumineux peuvent également être utilisés pour avertir l'usager de la nécessité d'actionner les ouvertures. L'entrée d'air neuf peut également être réalisée au travers d'entrées d'air classiques. L'évacuation de l'air vicié est généralement réalisée au travers d'ouvertures en partie haute de l'ouvrage (fenêtres de toit, verrières). Là aussi les ouvertures peuvent être motorisées et automatisées. L'air vicié peut également être évacué via des extracteurs en toiture (torelles à vent par exemple). Dans le cas de la ventilation hybride, des ventilateurs viennent compléter le dispositif.

LOTS E+/C-
CONCERNE

Lot 8 : CVC (Chauffage - Ventilation - Refroidissement - Eau chaude sanitaire)
Lot 6 : Façades et menuiseries extérieures
Lot 10 : Réseaux d'énergie (courant fort)

RECOURS POSSIBLE A
DES VALEURS
FORFAITAIRES

OUI pour les lots 8 et 10

NIVEAU
D'ARBORESCENCE
BASE INIES

- Bâtiment -> Produits de construction -> **Menuiseries intérieures et extérieures / fermetures (fenêtres / portes-fenêtres ; fenêtres de toit)**
ET
- Bâtiment -> Produits de construction -> Façades -> **Murs rideaux et verrières**
ET
- Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Appareillage d'installation pour les réseaux d'énergie électrique et de communication (≤ 63 Ampères) -> **Appareillage modulaire destiné aux enveloppes (gestion des ouvrants et volets ; capteurs pluie, soleil ... ; organes de signalisation)**
ET
- Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Diffusion d'air -> **Entrées d'air**
ET
- Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> **Caisson de ventilation**

DONNÉES

SPECIFIQUES

OUI

COLLECTIVES

OUI

PAR DEFAUT (MDEGD)

OUI

CONSEIL SUR LE CHOIX
DE LA DONNEE
ENVIRONNEMENTALE

Concernant le lot 8 :

La base INIES présente une donnée par défaut (MDEGD) pour les entrées d'air classique. Il n'existe à ce jour aucune donnée environnementale pour les extracteurs d'air de type tourelle à vent (ventilation naturelle). Des données spécifiques et des MDEGD sont disponibles pour les extracteurs mécaniques.

Dans le cas où les données environnementales disponibles ne sont pas suffisantes, il convient d'avoir recours aux valeurs forfaitaires pour le lot 8.

Concernant le lot 6 :

La base INIES présente des données spécifiques, collectives et des MDEGD pour tenir compte des menuiseries extérieures (menuiseries de façade, fenêtres de toit, verrières) qui peuvent entrer dans la composition d'un système de ventilation naturelle ou hybride. Il convient de sélectionner en priorité les données spécifiques puis collectives si elles existent pour les produits mis en œuvre. Autrement, il convient d'utiliser les MDEGD disponibles.

Concernant le lot 10 :

Des données spécifiques et des MDEGD sont disponibles pour tenir compte des éventuels capteurs de température, pluie et soleil.

Un MDEGD est disponible pour la gestion des ouvrants qui peuvent composer le système de ventilation naturelle ou hybride.

Il n'existe à ce jour aucune donnée environnementale pour les témoins lumineux qui permettent d'avertir l'utilisateur de la nécessité d'actionner les ouvrants.

Dans le cas où les données environnementales disponibles ne sont pas suffisantes, il convient d'avoir recours aux valeurs forfaitaires pour le lot 10.

Ventilation double flux

PRODUITS ET EQUIPEMENTS CONCERNES	Un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur se compose d'un caisson de ventilation, d'un ensemble de conduits pour la circulation de l'air, de bouches de soufflage et d'extraction, d'entrées pour l'air neuf et de sorties pour l'air vicié.
LOT E+/C- CONCERNE	Lot 8 : CVC (Chauffage - Ventilation - Refroidissement - Eau chaude sanitaire)
RECOURS POSSIBLE A DES VALEURS FORFAITAIRES	OUI
NIVEAU D'ARBORESCENCE BASE INIES	<ul style="list-style-type: none"> - Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Équipements de génie climatique -> Traitement d'air -> Centrale double flux ET - Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Équipements de génie climatique -> Caisson de ventilation -> VMC double flux ET - Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Équipements de génie climatique -> Conduits et accessoires de réseaux ET - Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Équipements de génie climatique -> Diffusion d'air ET - Bâtiment -> Produits de construction -> Couverture / étanchéité -> Divers
DONNÉES	
SPECIFIQUES	OUI
COLLECTIVES	OUI
PAR DEFAUT (MDEGD)	OUI
CONSEIL SUR LE CHOIX DE LA DONNEE ENVIRONNEMENTALE	<p>La base INIES propose des données collectives et par défaut (MDEGD) pour les caissons et centrales de traitement d'air (CTA) double flux. Ces données tiennent généralement compte des filtres à air nécessaires pour le bon fonctionnement du système. Il convient de privilégier l'utilisation des données collectives lorsque cela correspond au produit réellement mis en œuvre.</p> <p>Il convient de tenir compte également des conduits, des bouches de soufflage et d'extraction ainsi que des prises d'air extérieur et de rejet de l'air vicié.</p> <p>Concernant les conduits, la base INIES présente des données individuelles, collectives et par défaut (MDEGD).</p> <p>Des données par défaut (MDEGD) sont disponibles et peuvent être utilisées pour tenir compte des bouches de soufflage et d'extraction.</p>

Concernant l'évacuation de l'air vicié en toiture, la base INIES présente des données par défaut (MDEGD) pour tenir compte des chapeaux de toiture et autres sorties de toit.

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

Calcul RT

Le calcul du BBIO considère un système de ventilation à débit soufflé et extrait constant avec une efficacité d'échangeur de 50%. Ainsi les choix de systèmes de ventilation double flux, de puits climatique, de ventilation naturelle & hybride et de surventilation n'ont pas d'impact sur cet indicateur.

	INTEGRATION AUX CALCULS RT
SURVENTILATION NATURELLE	
SURVENTILATION MECANIQUE	Intégré dans la méthode réglementaire Th-BCE 2012 avec des limites tant au niveau de la saisie des composants que de la régulation.
PUITS CLIMATIQUE	
VENTILATION NATURELLE & HYBRIDE	Il existe des titres V adaptés à la réhabilitation des bâtiments collectifs d'habitation en ventilation naturelle et hybride.
VENTILATION DOUBLE FLUX	Intégré dans la méthode réglementaire Th-BCE 2012. Titre V existant (extensif dynamique) pour la ventilation double flux thermodynamique.

Dans la méthode TH-BCE, la ventilation naturelle par conduit et la ventilation hybride ne s'appliquent qu'aux usages de maison individuelle ou accolée et de logements collectifs. Le conduit, les bouches d'extraction ainsi que l'extracteur statique doivent être renseignés.

L'usage de la surventilation naturelle est partiellement pris en compte dans la méthode de calcul de la RT2012. La méthode prévoit un scénario de gestion manuelle (par les occupants) de l'ouverture des baies à des fins de surventilation naturelle (pour le confort thermique). Elle prévoit également la présence éventuelle d'un système de gestion automatique de l'ouverture, permettant la surventilation nocturne et hors occupation. Cela peut, selon les cas, impacter les calculs réglementaires (BBIO, CEP et Tic). Dans le cas particulier de la ventilation naturelle par ouverture des fenêtres, on fait l'hypothèse que la réglementation d'hygiène (réglementation ventilation) impose par local soit des débits à fournir (soufflage) ou des débits à extraire (débit repris). Dans le cas (exceptionnel) où cette hypothèse ne serait pas vérifiée, il conviendrait pour chaque local de prendre soit en extraction soit en fourniture le plus grand des débits (en valeur absolue) conforme à la réglementation et de mettre l'autre à 0 avant de cumuler les débits par groupe.

Dans le cas du fonctionnement d'un système actif de refroidissement, la méthode ne permet pas de considérer l'ouverture des baies sauf pour le calcul de la Tic pour les groupes climatisés en catégorie CE1, car le calcul s'effectue sans climatisation. Dans tous les cas, la prise en compte de la surventilation naturelle est limitée et ne permet pas de tenir compte de composantes spécifiques.

La valorisation des systèmes tels que le puits climatique ou la VMC double flux est limitée dans le calcul RT. La RT 2012 est un calcul qui ne se base pas sur le futur usage du logement, mais sur des hypothèses standardisées. Par exemple, une étude faite par Fiabitat montre un gain brut de -1°C sur la Tic avec un calcul RT 2012 contre -4.7°C sur la température maximale par un calcul STD [70]. Cette étude souhaite démontrer que la Tic n'est pas toujours pertinente globalement pour l'appréciation du confort. Il est alors conseillé de ne pas se fier aux prédictions de l'outil RT 2012 et de réaliser un calcul plus poussé en simulation thermique afin d'évaluer plus précisément la surchauffe des pièces et les gains en été du puits. Dans le cas de la VMC double flux la RT2012 considère un usage à débit constant et ne tient pas compte des possibilités de régulation automatique en période d'absence ou de programmation hebdomadaire selon l'occupation.

De plus, lors d'un couplage du puits avec une VMC double flux, les consommations électriques induites par une protection antigèle ne sont pas calculées en RT 2012 et le puits canadien aura donc une influence négligeable pour ce calcul.

Notons que la RE 2020 permettra au travers du nouvel indice Dies, la prise en compte des puits hydrauliques et non plus seulement le puits climatique [37].

Calcul STD

La simulation thermique dynamique des systèmes de ventilations permet d'analyser plusieurs variables d'intérêt et donc de concevoir ou évaluer la pertinence d'un système selon les résultats obtenus :

- L'évolution de la température dans les différentes zones thermiques
- L'évolution de l'humidité relative dans les différentes zones thermiques
- L'évolution des besoins/consommations de chauffage et de refroidissement (dans le cas de bâtiment équipés d'un système de refroidissement) ainsi que des puissances thermiques appelées pour atteindre les consignes de température.

Ces variables d'intérêt permettent de générer divers indicateurs liés au besoin de chauffage et de rafraîchissement d'un bâtiment et au confort thermique ou hygrothermique.

Modélisation STD de la surventilation

La réalisation d'une STD est indispensable au dimensionnement d'une surventilation. Dans un premier temps le bâtiment doit être conçu selon les principes du bioclimatisme en limitant les apports internes et externes de chaleur. Le recours de la STD pour concevoir la surventilation doit ensuite permettre d'estimer la quantité d'énergie que le bâtiment va stocker puis décharger (restitution de la chaleur stockée via l'inertie thermique). Les objectifs de modélisation sont les suivants :

- Définir le débit de renouvellement d'air nécessaire (débit et durée) selon les performances et le confort thermique recherché. Les taux de renouvellement d'air de surventilation. Ils peuvent varier de 2vol/h à 6 vol/h [127].
- Dimensionner le système de surventilation en faisant varier les paramètres de conception (hauteur de tirage, surface d'ouverture, niveau d'inertie du bâtiment, etc.) dans le cas d'un système de surventilation naturelle.

Il est alors possible de définir l'efficacité de la surventilation en analysant les indicateurs suivant [127]. :

- Le potentiel de déstockage thermique : différence de température extérieure entre le début de la surventilation et la température extérieure la plus basse sur cette durée
- Le ratio entre le déstockage obtenu et ce potentiel évalue la performance de la surventilation et constate si une meilleure exploitation du potentiel serait possible sur ce site et dans ces circonstances.
- Pour la surventilation mécanique, le coefficient d'efficacité se calcul avec le ratio de l'énergie thermique évacuée par la surventilation sur la consommation énergétique induite par celle-ci.

Ce type de modélisation peut se faire via la plupart des logiciels de simulations thermiques dynamiques. La saisie simplifiée du logiciel Pléiades permet d'obtenir rapidement les débits de renouvellement d'air nécessaires pour une enveloppe donnée. Il est possible de paramétrer les ratios d'ouvertures des menuiseries et de les scénariser à un pas de temps horaire. Néanmoins le logiciel est assez limité au niveau du paramétrage des ouvertures et donc du dimensionnement du système de surventilation naturelle. Par exemple la modélisation fine d'une aération de 5 min à 100% d'ouverture des fenêtres réalisée toutes les heures n'est pas possible. La meilleure approximation qui puisse être faite est de considérer un équivalent d'ouverture à 8% sur une heure (car 5 min représentent 8% d'une heure). D'autres outils tels que Design Builder permettent de planifier plus finement avec des pas de temps réduits les ouvertures et fermetures des ouvertures. Dans tous les cas la saisie des composants reste simplifiée et l'ensemble des spécificités d'un système ne peut être représenté par défaut. Néanmoins les logiciels de STD suffisent à définir les éléments de base de la conception d'un système de surventilation nocturne.

Modélisation STD d'un puits climatique

Certains logiciels de STD offrent la possibilité de saisir un puits climatique aéraulique tels que Pléiades et Design Builder. Les puits hydrauliques nécessitent le recours à des modules spécifiques qui ne sont par exemple pas prévus dans les logiciels précités.

Dans le logiciel Design Builder, un programme spécifique intitulé [CalcSoilSurfTemp](#) est utilisé. Il s'agit ici de caractériser le puits, le transfert thermique du sol, les paramètres de contrôle et le système de ventilation ainsi que les débits et plannings associés. Dans le logiciel Pléiades, l'ajout d'un puits climatique se fait directement via l'[interface STD](#). Il est alors possible de le coupler à un système de VMC en caractérisant le sol, la géométrie du puits, les tubes, l'influence du bâtiment et le système de ventilation tel que décrit dans le Tableau 12. Cette modélisation permet d'obtenir la température de l'air en entrée du puits ; la température de l'air au milieu du puits (position médiane entre l'entrée et la sortie) et la température de l'air en sortie du puits (avant un éventuel échangeur).

Tableau 12 : Exemple de paramètres de conception du puits climatique (Pléiades)

ELEMENTS A CARACTERISER	PARAMETRES DE CONCEPTION
PARAMETRE DU SOL	<ul style="list-style-type: none"> • Exposition au vent au niveau du sol • Type de surface • Humidité à la surface • Caractéristiques du sol (conductivité, capacité thermique, masse volumique).
GEOMETRIE DU PUIT	<ul style="list-style-type: none"> • Le nombre de nappes • La largeur maximale du puits • La longueur moyenne des tubes • Les profondeurs des différentes nappes • Le nombre de tubes de chaque nappe
CARACTERISTIQUES DES TUBES	<ul style="list-style-type: none"> • L'épaisseur de la paroi des tubes (m) • Le diamètre extérieur des tubes (m) • La conductivité de la paroi des tubes (W/m.K) • La masse volumique de la paroi des tubes (kg/m³) • La capacité thermique de la paroi des tubes (J/kg.K)
INFLUENCE DU BATIMENT	<ul style="list-style-type: none"> • Surface au sol de la partie chauffée du bâtiment : permet de calculer l'influence de la température du bâtiment sur le sol. • Distance entre le centre du puits et le centre du bâtiment : du centre de la superficie du puits au centre du bâtiment. Permet de quantifier l'influence du bâtiment sur le puits • Température moyenne du bâtiment des zones chauffées en contact avec le sol. • Résistance thermique de la dalle du bâtiment
CARACTERISTIQUES DE VENTILATION	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement de l'échangeur placé en série à la sortie du puits • L'activation ou non d'un bypass de l'échangeur pour les périodes chaudes permet de récupérer l'énergie de l'air extrait. La température d'activation du bypass. La température de désactivation du bypass. • Les débits de ventilation pour chaque zone concernée

Modélisation STD de la ventilation naturelle & hybride et modélisation STD de la ventilation double flux

La plupart des logiciels de STD permettent une saisie adaptée des systèmes de ventilation hygiénique.

Lors d'un calcul STD, les variables d'intérêt pour mesurer l'impact de la ventilation sont :

- L'évolution de la température intérieure : permettant de vérifier le confort thermique des occupants
- Le taux d'humidité permettant de valider le confort hygrothermique des occupants
- Les besoins de chauffage et de refroidissement (si bâtiment climatisé) : permettant de mesurer l'impact du renouvellement d'air sur cette variable.

Les paramètres de conception sont alors les suivants :

- Le débit de renouvellement d'air et son évolution selon un planning ou des paramètres de contrôle donnés
- Le coefficient de perméabilité à l'air de l'enveloppe aéralique du bâtiment qui est relatif à l'étanchéité à l'air de l'enveloppe et qui va avoir une influence sur l'efficacité des systèmes de ventilation, et plus particulièrement de la ventilation double flux
- L'efficacité de l'échangeur thermique dans le cas d'un double-flux
- Le débit de bouches de ventilation et des entrées d'air
- Le pourcentage d'ouverture des fenêtres et autres ouvertures dans le cas d'une ventilation naturelle ou hybride

FAÇADE A DOUBLE PEAU

ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

PRODUITS ET EQUIPEMENTS CONCERNES	Une façade double peau se compose de deux parois vitrées séparées par une lame d'air. Une protection solaire de type store peut être mise en place dans la lame d'air. La lame d'air peut également être ventilée naturellement ou mécaniquement (les composants liés à la ventilation ne sont pas traités dans cette fiche). Des ouvrants peuvent également être intégrés à la façade.
LOTS E+/C- CONCERNE	Lot 6 : Façades et menuiseries extérieures Lot 10 : Réseaux d'énergie (courant fort)
RECOURS POSSIBLE A DES VALEURS FORFAITAIRES	OUI pour le lot 10

NIVEAU D'ARBORESCENCE BASE INIES	<ul style="list-style-type: none"> - Bâtiment -> Produits de construction -> Façades -> Murs rideaux et verrières ET - Bâtiment -> Produits de construction -> Façades -> Bardage (vêtture / vêtage / parement) -> Verre ET - Bâtiment -> Produits de construction -> Menuiseries intérieures et extérieures / fermetures -> Fenêtre / portes-fenêtres ET - Bâtiment -> Produits de construction -> Menuiseries intérieures et extérieures / fermetures -> Volets / volets roulants / persiennes / stores / brise-soleil ET - Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Appareillage d'installation pour les réseaux d'énergie électrique et de communication (≤ 63 Ampères) -> Appareillage modulaire destiné aux enveloppes -> Gestion des ouvrants et volets ET - Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Appareillage d'installation pour les réseaux d'énergie électrique et de communication (≤ 63 Ampères) -> Autres -> Motorisation d'ouverture de volets
----------------------------------	---

DONNÉES	
SPECIFIQUES	OUI
COLLECTIVES	OUI
PAR DEFAUT (MDEGD)	OUI

CONSEIL SUR LE CHOIX DE LA DONNEE ENVIRONNEMENTALE	<p>Concernant le lot 6 :</p> <p>La base INIES présente une donnée collective pour les façades rideau acier qui peuvent constituer les peaux d'une façade double peau. Des MDEGD sont également disponibles pour les murs rideau à structure acier, aluminium et bois/aluminium.</p> <p>Pour les ouvrants des façades double peau, des données spécifiques, collectives et des MDEGD sont disponibles. Il convient d'utiliser en priorité les données spécifiques puis collectives si elles correspondent aux produits effectivement mis en œuvre. Autrement, les MDEGD sont disponibles pour différents matériaux et performances de vitrage.</p> <p>Des données individuelles et des MDEGD sont disponibles pour tenir compte des stores en tissu PVC ou en textile. Aucune donnée environnementale n'est disponible à ce jour pour les autres types de stores qui peuvent être intégrés à une façade double peau.</p> <p>Concernant le lot 10 :</p> <p>Une donnée par défaut (MDEGD) et des données individuelles sont disponibles pour les systèmes de gestion des ouvrants et volets qui peuvent être utilisés dans une façade double peau pour automatiser ou motoriser l'ouverture des ouvrants et des stores.</p>
--	--

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

Calcul RT

La prise en compte des double-peaux dans les calculs RT nécessite le recours à des TITRES V pour être considérées à l'échelle de l'opération ou du produit. Néanmoins des méthodes approximatives peuvent être utilisées pour valoriser le bénéfice d'une double peau dans les indicateurs RT. Une première méthode consiste à saisir la partie vitrée de la double peau comme un triple vitrage au sein duquel se trouve un espace ventilé important. Il s'agira alors de calculer les caractéristiques équivalentes de ce triple vitrage et de substituer la partie vitrée de la double peau. Une autre méthode consiste à modéliser l'espace double-peau comme un espace tampon solarisé.

Calcul STD

D'une manière générale, un système double-peau est assez complexe à modéliser. L'ajout d'une façade double peau varie d'un logiciel de STD à l'autre. Dans Pléiades [une méthode est proposée](#) pour simuler ce cas complexe, car il n'est pas possible dans ce logiciel de modéliser un vitrage intérieur. Les apports solaires traversant les différents vitrages doivent être quantifiés et évalués. Il s'agit donc de recalculer les facteurs solaires pour générer un système équivalent constitué d'un seul vitrage. Dans Design Builder les façades double-peau peuvent [directement](#) être modélisées dans le logiciel.

Les variables d'intérêt pour la conception d'une façade double peau sont :

- L'évolution de la température intérieure du bâtiment
- L'évolution de la température dans le complexe double-peau
- Les besoins de chauffage annuel/mensuel
- Le facteur lumière jour (taux de luminosité)

Les paramètres de conception identifiés sont :

- Le coefficient d'isolation thermique des vitrages
- La surface des vitrages
- Le facteur solaire de la double peau
- La nature du vitrage utilisé en particulier pour la peau intérieure (simple, double, double avec faible émissivité, double avec faible émissivité et remplissage gaz lourd, triple, vitrage à contrôle solaire...)
- Le type de profilé utilisé (avec ou sans rupture de pont thermique)
- La géométrie de la façade (nombre de profilés, ratio clair moyen...)
- Le type de ventilation et pour la ventilation naturelle, les sections de ventilation de l'espace d'air entre peaux en partie haute et basse de la façade
- La présence ou non de protections solaires pour réduire les apports solaires estivaux et limiter ainsi le recours au système de refroidissement
- La nature des protections solaires employées

VITRAGE A PROPRIETES VARIABLES

Il existe 3 sortes de vitrages à propriété variable :

- Les vitrages **électrochromes** (ou *électrochromiques*) : modification des propriétés optiques sous l'effet d'un courant électrique
- Les vitrages **thermochromes** (ou *thermotropes*) : modification des propriétés optiques liée à un changement de température
- Les vitrages **photochromes** : modification des propriétés optiques sous l'action de la lumière ultraviolette (utilisés pour les verres polarisants des lunettes de soleil)

ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

PRODUITS ET EQUIPEMENTS CONCERNES	Les vitrages à propriété variable sont des menuiseries extérieures dont les vitrages possèdent des propriétés particulières.
LOT E+/C- CONCERNE	Lot 6 : Façades et menuiseries extérieures
RECOURS POSSIBLE A DES VALEURS FORFAITAIRES	NON
NIVEAU D'ARBORESCENCE BASE INIES	Bâtiment -> Produits de construction -> Menuiseries intérieures et extérieures / fermetures
DONNÉES	
SPECIFIQUES	NON
COLLECTIVES	NON
PAR DEFAUT (MDEGD)	NON
CONSEIL SUR LE CHOIX DE LA DONNÉE ENVIRONNEMENTALE	Il n'existe pour le moment pas de donnée environnementale propre aux vitrages à propriétés variables. Dans l'attente de telles valeurs, il semble pertinent d'utiliser les MDEGD qui sont fournies pour les menuiseries extérieures acier, aluminium, bois-aluminium, PVC et aluminium-PVC. Pour chacune de ces catégories, des MDEGD sont proposées pour les menuiseries doubles ou triples vitrages ainsi que pour certains niveaux de performances énergétiques. Il convient alors d'utiliser la donnée MDEGD qui correspond au matériau utilisé, au type de vitrage et à la performance de la menuiserie avec vitrage à propriétés variables.

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

Calcul RT

Il n'est pas possible de saisir la solution de vitrages à propriétés variables dans un calcul RT sans TITRE V.

INTEGRATION AUX CALCULS RT	
VITRAGE ELECTROCHROME	TITRE V proposé par la société Sageglass®.
VITRAGE THERMOCHROME	Nécessité de réaliser un TITRE V pour une opération ou un produit spécifique. Il n'existe à ce jour aucun TITRE V pour ce type de produit.
VITRAGE THERMOCHROME	

Le titre V du vitrage électrochrome existe (MEDDE-METL n°2014/3 du 25 février 2014). La méthode propose l'intégration d'une baie munie du système Sageglass® dans la méthode de calcul Th-BCE, comme d'une baie munie d'une protection mobile.

Les paramètres suivants sont considérés :

- U : le coefficient de transmission thermique (conduction et convection)
- Sw : le facteur solaire
- Tli : le facteur de transmission lumineuse

Tli a uniquement une influence sur la luminosité uniquement alors que U et Sw influencent la chaleur et la luminosité.

On considère deux baies :

- La première baie est sans protection solaire. Elle a par pour paramètres Usp, Sw_sp et Tli_sp qui représentent le vitrage dans son état le plus clair (Sans Protection)
- La deuxième baie est avec protection solaire. Elle a pour paramètres Uap, Sw_ap et Tli_ap qui représentent le vitrage dans son état le plus teinté (Avec Protection)

Si la commande de teinte du vitrage est manuelle, le type de gestion de la protection mobile est le mode 3 : autre cas avec gestion manuelle motorisée.

Si la commande de teinte du vitrage est automatique, le type de gestion de la protection mobile est le mode 1 : autre cas avec gestion automatique. Dans ce cas, il n'y a ni distinction jour-nuit ni détecteur de présence.

Conventionnellement, dans le cadre de cet arrêté, la consommation électrique due à la commande de la teinte du vitrage est négligée.

Calcul STD

La prise en compte des vitrages à propriété variable varie selon les logiciels. Certains ont un module dédié permettant de saisir directement le vitrage et ses spécificités. Par exemple, le logiciel Design Builder permet de modéliser le [vitrage électrochrome](#). Le type de vitrage peut être sélectionné à partir de l'onglet « Propriétés du vitrage » dans « Electrochrome ». Les différents types de vitrages Sageglass® peuvent directement être sélectionnés selon leur couleur. Les propriétés solaires du vitrage sont alors dépendantes des apports solaires extérieurs.

D'autres logiciels de STD ne contiennent pas ce type de vitrage dans leur bibliothèque produit. Dans ce cas, la modélisation STD consiste à reprendre l'idée du titre V de Sageglass en ajoutant un scénario d'occultation en fonction du rayonnement solaire (pour le vitrage électrochrome ou photochrome) ou de la température extérieure (pour un vitrage thermochrome). L'exemple de Pléiades est décrit dans l'encadré ci-dessous.

Exemple de saisie du vitrage dans Pléiades

L'objectif est de passer par le contrôle des occultations. Le logiciel Pléiades ne permet pas de « contrôler » les occultations directement. Une solution consiste à lancer une première simulation de rayonnement solaire ($W.m^{-2}$) ou de température et d'exporter les résultats sur un fichier Excel. La seconde étape est de créer un nouveau scénario d'occultation à partir des données du fichier Excel. Il s'agit alors de générer ce scénario selon divers paramètres tels que le rayonnement solaire, l'évolution de la température intérieure, extérieure, etc. Selon qu'il s'agisse de vitrage électrochrome, photochrome ou thermochrome le paramétrage du scénario d'occultation sera différent et doit être réalisé selon le fonctionnement réel du vitrage indiqué dans sa documentation technique.

Un fichier texte doit alors être créé avec une succession de 0 (pas d'occultation) de 1 (occultation totale volet) et de ratios correspondant au masque effectif dû à l'effet du vitrage à propriétés variables. À titre d'exemple, lorsque le vitrage a pour facteur solaire : $Sw_1 = 0,4$ et que le facteur solaire final (intérieur) avec le système activé est de $Sw_2 = 0,1$ l'occultation est alors de 25% : $0,1/0,4 = 25\%$

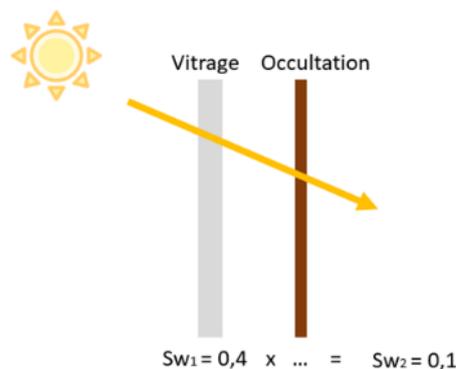


Figure 121 : Schéma des facteurs solaires

Pour l'importation du scénario d'occultation en fichier texte, il est nécessaire de respecter les consignes suivantes :

1. Dans le fichier texte les colonnes sont séparées par des tabulations.
2. La ligne 1 peut être utilisée pour donner le nom du scénario (extension nom).
3. Il faut renseigner le type de scénario en ligne 2 du fichier. Dans ce cas il sera indiqué OL (pour occultation). (Sinon d'autres scénarii peuvent être implémentés : CH = chauffage, CL = climatisation, P = apports internes, V = ventilation, OL = occultation, OP = occupation, EC = éclairage, ECS = besoins ECS, MET = métabolisme, OV = ouverture).
4. L'unité peut être renseignée en ligne 3. Il est important de renseigner l'unité affichée dans le menu déroulant suivant le cas (ici l'unité est le pourcentage pour le scénario d'occultation).
5. Une option peut être insérée en ligne 4 (C=Coché, NC = Non coché). Dans notre cas la ligne 4 sera vide, mais il se peut que la mention C apparaisse pour inclure l'opacité.
6. Aucune valeur additionnelle ne peut être insérée dans le fichier texte.

BRISE-SOLEIL ORIENTABLE

ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

PRODUITS ET EQUIPEMENTS CONCERNES	Les brise-soleils orientables sont des dispositifs installés en façade du bâtiment. Ils sont équipés de mécanismes à commande manuelle ou motorisée qui permet de les orienter en fonction des conditions extérieures. La gestion de l'orientation des brise-soleils peut être automatisée au moyen de capteurs et d'un système de pilotage.
LOTS E+/C- CONCERNE	Lot 6 : Façades et menuiseries extérieures Lot 10 : Réseaux d'énergie (courant fort)
RECOURS POSSIBLE A DES VALEURS FORFAITAIRES	OUI pour le lot 10

NIVEAU D'ARBORESCENCE BASE INIES	<p>- Bâtiment -> Produits de construction -> Menuiseries intérieures et extérieures / fermetures -> Volets / volets roulants / persiennes / stores / brise-soleil</p> <p>ET</p> <p>- Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Appareillage d'installation pour les réseaux d'énergie électrique et de communication (≤ 63 Ampères) -> Appareillage modulaire destiné aux enveloppes -> Gestion des ouvrants et volets</p> <p>ET</p> <p>- Bâtiment -> Équipements électriques, électroniques et de génie climatique -> Appareillage d'installation pour les réseaux d'énergie électrique et de communication (≤ 63 Ampères) -> Appareillage modulaire destiné aux enveloppes -> Mesure -> Capteurs pluie, soleil, ...</p>
----------------------------------	---

DONNÉES	
SPECIFIQUES	OUI
COLLECTIVES	NON
PAR DEFAUT (MDEGD)	OUI

CONSEIL SUR LE CHOIX DE LA DONNEE ENVIRONNEMENTALE	<p>Il n'existe pas de donnée environnementale dédiée à des systèmes de brise-soleils orientables. Les données disponibles concernent les brise-soleils fixes. Il convient alors de tenir compte à la fois des brise-soleils, des éventuels systèmes de gestion et des capteurs dans le cas d'une gestion automatisée.</p> <p>Concernant le lot 6 : Des données par défaut (MDEGD) sont disponibles pour les brise-soleils en acier, aluminium, bois, cuivre et terre cuite.</p> <p>Concernant le lot 10 : Pour les systèmes de gestion, la donnée par défaut (MDEGD) pour la gestion des ouvrants et volets peut être utilisée. Enfin, pour les éventuels capteurs (soleil, pluie, ...), les données spécifiques proposées par DELTA DORE peuvent être utilisées s'il s'agit effectivement des produits réellement mis en œuvre. Autrement, des données par défaut (MDEGD) sont disponibles.</p>
--	--

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

Calcul RT

Les brise-soleils impactent l'ensemble des indicateurs réglementaires. La saisie des brise-soleil orientables dans la méthode de calcul RT 2012 est néanmoins limitée et ne permet pas de saisir l'intégralité des systèmes existants ou certaines de leur spécificité. La RT 2012 offre la possibilité de modéliser des brise-soleils à lames orientées, mais statiques. Il n'est alors pas possible de mesurer le bénéfice apporté par la mobilité des brise-soleils orientables. En revanche, il est possible d'utiliser

des stores vénitiens positionnés à l'extérieur, qui peuvent s'incliner, s'ouvrir et se fermer en fonction des conditions d'utilisation. Les caractéristiques du brise-soleil (distance avec la baie, niveau de recouvrement, caractéristiques thermiques et solaires) peuvent alors être renseignées ainsi que d'autres éléments tels qu'un seuil de vitesse de vent au-delà duquel la protection sera fermée pour des raisons de sécurité ou encore un ratio de fermeture en fonction de la saison. Il est également possible de spécifier une gestion manuelle ou automatique des stores en fonction de l'occupation, d'un seuil d'éclairement, de deux seuils de température intérieure (maximale et minimale) et de la période de l'année (hiver, mi-saison, été) ou de la journée (jour-nuit).

Calcul STD

L'insertion de brise-soleil en calcul STD peut se faire simplement. Généralement, des modules d'affectation sont déjà présents dans les logiciels. C'est par exemple le cas pour Pléiades et Design Builder. Comme pour le calcul RT les modules correspondant aux brise-soleils ne permettent que la modélisation de systèmes statiques. Afin de tenir compte de la mobilité des stores dans Design Builder il est néanmoins possible de passer par les [modules de stores vénitiens](#) et d'ajouter des paramètres de contrôle.

Dans Pléiades il est possible d'insérer des scénarios d'occultation horaires en indiquant le pourcentage de fermeture de la protection (variant de 0 à 100%). La même méthode que celle illustrée dans la section des vitrages à propriétés variables peut être employée.

Les variables d'intérêt identifiées pour mesurer l'impact des brise-soleils sur le bâtiment sont :

- Bilan des consommations énergétiques (mensuel/annuel)
- Évolution de la température au cours d'une journée

Les paramètres de conception à saisir dans un logiciel de STD sont :

- L'emprise du brise-soleil sur la façade
- L'espacement entre deux lames successives
- L'orientation des lames : verticales ou horizontales
- L'inclinaison des lames
- La taille des lames : Profondeur, épaisseur et largeur
- La composition des lames : opacité, transparence, coefficient de réflexion, etc.
- La distance entre le vitrage et le brise-soleil
- Le scénario d'occultation et les paramètres de gestion correspondants

TOIT RAFRAICHISSANT

ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

PRODUITS ET EQUIPEMENTS CONCERNES	Les solutions de toit rafraichissant nécessitent la mise en œuvre d'une peinture aux propriétés spécifiques ou bien d'une membrane d'étanchéité, elle aussi dotée de propriétés spécifiques.
LOT E+/C- CONCERNE	Lot 4 : Couverture - Etanchéité - Charpente - Zinguerie
RECOURS POSSIBLE A DES VALEURS FORFAITAIRES	NON
NIVEAU D'ARBORESCENCE BASE INIES	- Bâtiment -> Produits de construction -> Couverture / étanchéité -> Produits pour étanchéité de toiture ET - Bâtiment -> Produits de construction -> Revêtement des sols et murs / peintures / produits de décoration -> Peintures, lasures et vernis, enduits de peintures (hors saturateurs)
DONNÉES	
SPECIFIQUES	NON
COLLECTIVES	NON
PAR DEFAUT (MDEGD)	OUI
CONSEIL SUR LE CHOIX DE LA DONNEE ENVIRONNEMENTALE	<p>À ce jour, la base INIES ne présente aucune donnée spécifique aux produits pour toit rafraichissant. Il convient alors d'utiliser les données collectives ou par défaut (MDEGD) qui semblent les plus représentatives des produits réellement mis en œuvre.</p> <p>La base INIES présente des données collectives et par défaut (MDEGD) pour différents types de membranes d'étanchéité : asphalte, bitume, PVC, polyoléfines, ... Il convient d'utiliser les données correspondant à la matière principale constituant la membrane d'étanchéité pour toit rafraichissant.</p> <p>Pour les peintures, des données par défaut (MDEGD) sont disponibles pour les produits destinés à un usage en extérieur. Un MDEGD est relatif aux produits en phase aqueuse et un autre aux produits en phase solvant. Il convient alors d'utiliser la donnée qui correspond au type de peinture pour toit rafraichissant utilisé (phase aqueuse ou solvant).</p>

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

La solution du toit rafraîchissant est très simple à saisir dans les logiciels de calcul RT et STD. Il s'agit de modifier les propriétés de surface du revêtement de toiture.

Calcul RT

Dans la RT2012, les calculs prennent en compte les flux de chaleur dus au rayonnement solaire absorbé par les parois opaques à travers un facteur solaire noté généralement S_w permettant de traduire la réflectivité de la paroi.

Celui-ci est de 0,8 pour les parois opaques horizontales (c'est-à-dire que les calculs considèrent par défaut que 80% du rayonnement solaire est absorbé par la paroi et 20% réfléchis). Ce paramètre est accessible et donc ajustable dans les outils de modélisation. L'application d'un revêtement réfléchissant sur une paroi va impacter son facteur solaire : par exemple Cool Roof France préconise dans le cas d'utilisation de leur revêtement réfléchissant de passer de 80% d'absorption (donnée par défaut) à 2,5% d'absorption, soit un delta de plus de 65%¹⁰.

Calcul STD

Pour modéliser un toit rafraîchissant dans une STD il est possible d'appliquer un revêtement de peinture blanche à la toiture. L'émissivité infrarouge (Grandes longueurs d'onde), l'absorptivité solaire (courtes longueurs d'onde) et la réflexion lumineuse (ρ) peuvent être modifiées manuellement afin d'obtenir les caractéristiques souhaitées.

¹⁰ <https://www.coolroof-france.com/faq>

VEGETALISATION DU BATIMENT ET DE SES ABORDS

ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

PRODUITS ET EQUIPEMENTS CONCERNES

La **végétalisation du bâtiment et de ses abords** peut prendre différentes formes : toiture végétalisée, mur végétalisé, support végétalisé (par exemple pergolas) ou encore végétalisation plantée à proximité de l'ouvrage. Lors de l'analyse environnementale du bâtiment, il convient alors de prendre en compte les supports végétalisés (complexe de toiture, support, bac, ...) et les éventuels dispositifs nécessaires à l'entretien de la végétalisation comme les systèmes d'arrosage. Les systèmes de récupération d'eau de pluie éventuellement utilisés pour l'arrosage de la végétalisation (réservoir, pompe, canalisations ...) ne sont pas considérés dans cette fiche, mais sont à prendre en compte lors d'une analyse environnementale complète.

LOTS E+/C- CONCERNE

Lot 4 : Couverture - Etanchéité - Charpente - Zinguerie
Lot 6 : Façades et menuiseries extérieures
Lot 1 : VRD (Voirie et Réseaux Divers)

RECOURS POSSIBLE A DES VALEURS FORFAITAIRES

NON

NIVEAU D'ARBORESCENCE BASE INIES

- Bâtiment -> Produits de construction -> Couverture / étanchéité -> **Éléments de toiture végétalisée**
ET
- Bâtiment -> Produits de construction -> Menuiseries intérieures et extérieures / fermetures -> **Gardes corps**
ET
- Bâtiment -> Produits de construction -> Menuiseries intérieures et extérieures / fermetures -> **Volets / volets roulants / persiennes / stores / brise-soleil**
ET
- Bâtiment -> Produits de construction -> Voirie / réseaux divers (y compris réseaux intérieurs) et aménagements extérieurs de la parcelle -> **Espace vert**

DONNÉES

SPECIFIQUES

NON

COLLECTIVES

OUI

PAR DEFAULT (MDEGD)

OUI

CONSEIL SUR LE CHOIX DE LA DONNEE ENVIRONNEMENTALE

Concernant le lot 4 :

La base INIES présente des données par défaut (MDEGD) pour les éléments de toiture végétalisée (couche drainante et substrat).

Il convient également de tenir compte des produits permettant de réaliser l'isolation thermique et l'étanchéité de la toiture (membrane, éléments de couverture ...).

Concernant le lot 6 :

À ce jour, aucune donnée n'est disponible pour tenir compte des supports de végétalisation de façade (bacs, grilles, substrats ...). En l'absence de donnée, il convient de tenir compte seulement des matériaux constituant la façade.

Dans le cas des supports végétalisés (garde-corps, brise-soleil, ...), il est possible de tenir compte des éléments constituant les supports. Des données collectives et par défaut (MDEGD) sont disponibles pour différents types de garde-corps (acier, aluminium, bois, polycarbonate, polyméthacrylate, PVC, verre). Des données par défaut (MDEGD) sont disponibles pour différents types de brise-soleil (acier, aluminium, bois, cuivre, terre cuite).

Concernant le lot 1 :

Une donnée par défaut (MDEGD) est disponible pour tenir compte de l'éventuel système d'arrosage manuel utilisé pour l'entretien de la végétalisation. À ce jour aucune donnée n'est directement disponible pour tenir compte des systèmes d'arrosage automatique. Si un tel système est mis en place, il convient de considérer les différents composants un à un (capteur pluie, tuyaux, robinet, système de gestion ...) en sélectionnant les données les plus appropriées.

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

Calcul RT

L'ombrage apporté par la végétalisation des bâtiments et de leurs abords peut être pris en compte dans les calculs RT. Par exemple les arbres et autres éléments de végétation aux abords du bâtiment peuvent être saisis sous la forme de masques proches. Le concepteur devra alors indiquer les dates de début et de fin de végétalisation pour les espèces caduques.

La végétalisation des parois et des casquettes n'est pas prise en compte dans les calculs RT 2012.

Les effets de l'évapotranspiration, de l'inertie et de la protection au vent apportés par les systèmes ne sont pas pris en compte dans le calcul RT.

La toiture végétalisée peut directement être prise en compte dans le calcul RT 2012 en saisissant les données complémentaires de la paroi. La résistance thermique et l'état de surface peuvent être considérés. Il sera alors demandé les périodes ainsi que le type de végétalisation.

Calcul STD

De manière générale l'ombrage apporté par les solutions de végétalisation des bâtiments et de leurs abords est pris en compte dans les logiciels de STD. Différentes sortes de végétaux peuvent ainsi être intégrés : des arbres ponctuels, des murs végétaux, mais aussi des toitures végétales. Les paramètres de conception communément proposés sont :

- Les scénarios de végétalisation où les plannings des végétalisations (pour les feuilles) peuvent être précisés
- Le coefficient de transparence
- L'émissivité infrarouge
- L'absorptivité solaire
- Le pourcentage de réflexion lumineuse
- La géométrie de la plante qui induit un masque : par exemple la hauteur et largeur du tronc d'un arbre ainsi que son emprise ou parfois l'index de surface de feuillage

Cette approche est assez limitée et certains logiciels de STD permettent également de saisir des solutions végétales avec des modules spécifiques afin de tenir compte du phénomène d'évapotranspiration. Par exemple dans Design Builder, un module de [toiture végétalisée](#) permet de tenir compte de l'échange radiatif à courte longueur d'onde, du transfert convectif de chaleur, de l'évapotranspiration au niveau de la terre et des plants et de la conduction thermique.

VII

INSPIRATIONS
&
OPERATIONS EXEMPLAIRES



BATIMENT B, NANTES



© Philippe Ruault

Situé sur l'île de Nantes (44), le bâtiment « B » (pour Bois) d'une surface de 1562 m² en R+3 abrite les bureaux d'Atlanbois, de l'Office National des Forêts Pays de la Loire, de l'UNIFA, une antenne du FCBA ainsi qu'un espace d'exposition.

Démarche exemplaire

Ce bâtiment vise à démontrer les potentialités du matériau bois. Le bois est présent au niveau de la structure, de l'enveloppe et de l'aménagement intérieur. Les différentes pièces proviennent pour la grande majorité de la région et ont été sciées, séchées, aboutées et transformées par des sociétés locales.

Lors de ce projet, la maîtrise d'œuvre ne souhaitait pas « *appliquer les recettes des certifications, mais bel et bien tester des systèmes* ». Cette opération exemplaire a mis en œuvre pas moins de cinq solutions décrites dans ce guide : Le renouvellement d'air est assuré par une ventilation naturelle pilotée par les usagers. L'été, le bâtiment est rafraîchi avec une surventilation naturelle par tirage thermique assurée notamment via le pilotage de l'ouverture de la verrière. Cette même verrière permet d'assurer un puits de lumière conséquent dont la lumière est rediffusée via l'atrium. Des brise-soleil orientables permettent de limiter les apports solaires en été et d'en profiter en période hivernale. Enfin la végétalisation du bâtiment et de ses abords a été réalisée pour bénéficier de rafraîchissement par évapotranspiration et d'ombrage permettant de protéger une partie du bâtiment des apports solaires.

Labels, certifications, référentiels et démarches

Le projet a appliqué volontairement les principes du label BBC.



FICHE TECHNIQUE

Maitrise d'ouvrage

Atlanbois

Maitrise d'œuvre

Agence Barré-Lambot

Conseil en ventilation naturelle

Jacques Gandemer

BET Structure

AREST

BET Bois

Synergie Bois

BET Fluides

TUAL

Réalisation du lot bois

AXE 303

Surface

1 562 m² SHON

Coût de construction

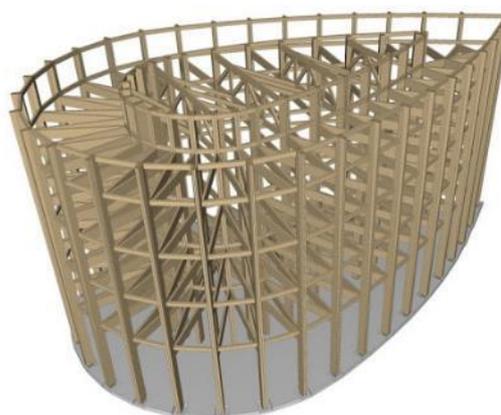
4,2 M€ HT (TCE)

Année de livraison

2013

Localisation

Nantes, Loire-Atlantique, France

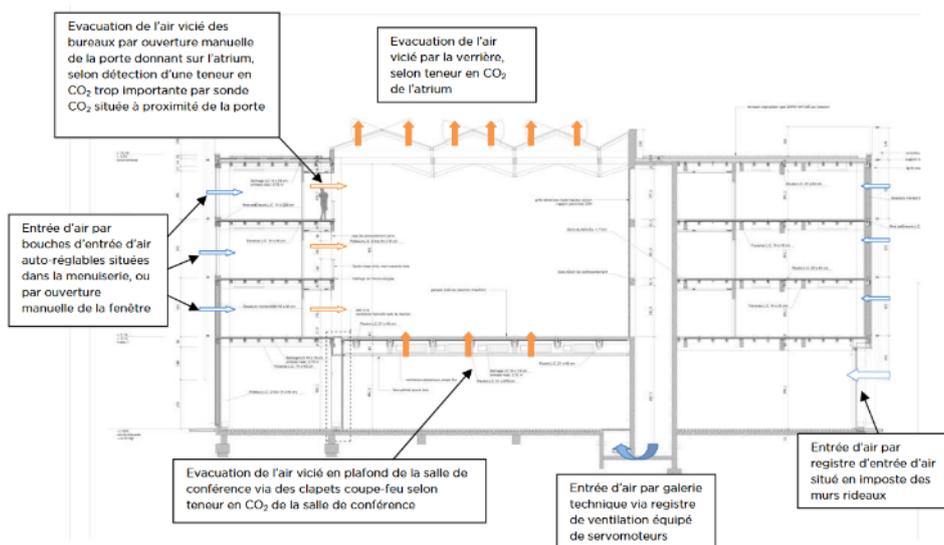


© Synergie Bois

Solutions mises en œuvre

Ventilation naturelle

L'entrée d'air neuf s'effectue en façades par les fenêtres ainsi que par une galerie technique et transite par l'atrium qui dispose d'une ouverture en toiture. La verrière est équipée d'une régulation automatique d'ouverture et de fermeture fonction de l'humidité et de la teneur en CO₂ de l'atrium et des conditions extérieures (vent et précipitations). Cette solution évite le recours à un système de ventilation mécanique (sauf dans les sanitaires qui sont équipés d'une VMC simple flux).



Principe de fonctionnement de la ventilation naturelle ; [128]



Atrium élément central de la ventilation naturelle ; © Philippe Ruault



Système d'ouverture automatique de la verrière ; [129]

Implication de l'utilisateur dans le pilotage de la ventilation naturelle

La solution de ventilation repose sur un système semi-manuel. Les usagers sont incités à ouvrir leur porte de bureau pour évacuer l'air vicié vers l'atrium. Une sonde CO₂ informe l'utilisateur d'une teneur trop importante en indiquant une couleur rouge et reste verte si la teneur est correcte. En période d'inoccupation, les usagers doivent fermer les portes. Cette solution évite l'installation d'une motorisation des portes de bureau.

Surventilation naturelle

En cas de fortes chaleurs, le rafraîchissement des locaux est assuré par une augmentation du débit de ventilation naturelle par ouverture accentuée des entrées d'air et de la verrière. Des sondes de température intérieures et extérieures pilotent l'ouverture de la verrière. Une fois ouverte, la verrière sert de pompe à air permettant ainsi d'évacuer par le haut du bâtiment l'air provenant de la cour anglaise située au rez-de-chaussée. La verrière sert aussi de désenfumage en cas d'incendie. La surventilation permet de créer une sensation de « courant d'air » qui participe à l'amélioration du confort estival. S'agissant d'un bâtiment bois à faible inertie thermique, la surventilation permet également de rafraîchir rapidement les locaux lorsque la température extérieure est plus faible que la température intérieure (cas de la surventilation nocturne).

Cette solution permet de se dispenser d'un système de climatisation pour les bureaux. Seule la salle de conférence est équipée d'un système de rafraîchissement adiabatique, car les apports internes ont été évalués comme trop importants pour être compensés par la seule surventilation. En effet, une étude STD a démontré que la salle pouvait atteindre 32°C.

Brise-soleil

Des brise-soleil extérieurs équipent les parois vitrées. Ils réduisent les apports solaires en été et donc l'augmentation de la température intérieure. Les brise-soleils sont pilotés automatiquement avec une fermeture programmée en fonction de l'orientation.

Puits de lumière

Le bâtiment possède en son centre un gigantesque puits de lumière supporté par une charpente bois, aussi appelé atrium. Il est de type serre horticole et permet une excellente luminosité au centre du bâtiment. Il a été observé que cette verrière n'engendre pas de surchauffe en été. En effet, du fait de l'importante hauteur de l'atrium, l'air est stratifié. L'air chaud est en hauteur alors que le frais stagne au rez-de-chaussée. Grâce au système de surventilation nocturne, l'air chaud est évacué lorsque la verrière est ouverte.

Végétalisation de la toiture et abords du bâtiment

Le bâtiment est recouvert d'une toiture végétalisée. Par le biais du phénomène d'évapotranspiration des plantes, ce couvert végétal permet d'évacuer une partie des calories incidentes sur la toiture. Aucun entretien n'a été fait depuis la mise en œuvre. La toiture végétalisée a été installée dans le but d'améliorer le confort d'été, mais également d'aider au maintien de la biodiversité.

Les arbres plantés à proximité du bâtiment ombragent les parois vitrées du RDC permettant de limiter les apports solaires en été. Cette végétation participe au maintien d'une température intérieure confortable.



Végétalisation de la toiture du bâtiment

Retours d'expérience

Le bâtiment est qualifié de très agréable de manière générale par les occupants et possède un très bon niveau d'isolation acoustique. Le RDC reste frais en été et la température du bâtiment n'excède jamais 28 °C (même pendant les canicules). La surventilation améliore le confort lors des épisodes de fortes chaleurs par la création d'un courant d'air.

Les sondes CO₂ (témoins lumineux) utilisées pour la ventilation naturelle fonctionnent correctement, mais les utilisateurs ont tendance à agir par habitude sur l'ouverture des portes des bureaux donnant sur l'atrium sans consulter les indications fournies par les sondes. Les sondes devraient être étalonnées périodiquement pour fournir une indication fiable.

En hiver, les portes de bureaux doivent rester fermées, car celles-ci donnent sur l'atrium qui lui, n'est pas chauffé. Les bureaux sont chauffés par de petits radiateurs avec robinet thermostatique. Le RDC possède un plancher chauffant. Il est nécessaire d'indiquer aux nouveaux usagers l'intérêt de fermer les portes de bureaux en hiver pour le bon fonctionnement du bâtiment.

La surventilation permet de limiter le recours à la climatisation dans la salle de conférence. Ainsi à l'été 2013 (période de fortes chaleurs), la ventilation adiabatique installée pour le refroidissement de la salle de conférence n'a pas été déclenchée. Le système de ventilation adiabatique n'a d'ailleurs jamais été utilisé, car la température de la salle de conférence n'a jamais dépassé le seuil de confort.

L'exemple du système de ventilation adiabatique montre l'importance de l'étude du coût d'exploitation lors de la conception de l'ouvrage. Ce système, a priori non essentiel au confort du bâtiment, nécessite un coût d'entretien conséquent (risque de légionellose). Aujourd'hui ce système n'est plus opérationnel et le moteur a été démonté. Le confort de la salle de conférence est assuré par la seule surventilation.

Références : [128–132]

LOW CAL, PONT DE BARRET



Situé à Pont de Barret (26), le bâtiment Low Cal d'une surface de 730 m² abrite les bureaux d'Enertech (bureau d'études fluides). Il possède deux niveaux plus un demi-niveau en rez-de-jardin. Il est composé de matériaux naturels tels que le bois, la paille et la terre crue.

Démarche exemplaire

LowCal est un bâtiment démonstrateur de la construction frugale, qui se veut innovant sur le plan énergétique et environnemental. Il est le premier bâtiment à avoir obtenu la labellisation E4 C2, démontrant ainsi la faisabilité technique du niveau le plus performant du label E+/C-.

Il est équipé de panneaux photovoltaïques, ce qui lui permet de produire 7 fois plus d'énergie qu'il n'en consomme. Aucun système de chauffage fixe n'est installé. Ses ressources matérielles et humaines proviennent de moins de 40 km ce qui lui a permis de maîtriser son coût de construction et son coût environnemental. De plus, il a été conçu de sorte à pouvoir être reconverti en six logements.

FICHE TECHNIQUE

Architecte

Cabinet Traversier

BET Structure Béton

Bureau Mathieu

BET Structure Bois

SIB Solutions

BET Fluides

Enertech

BE VRD

CERTIB

Bureau de contrôle / SPS

SOCOTEC

Réalisation du lot bois

Vive le bois (Dieulefit)

Sud-Est Charpentres (Cléon d'Andran)

Surface

730 m² SHON

Coût de construction (hors VRD)

817 600€ HT

Soit 1 120€ HT/m² SHON

Année de livraison

2016

Localisation

Ponts de Barret, Drôme, France

Labels, certifications, référentiels et démarches

Le bâtiment a été récompensé par plusieurs labels à leurs niveaux les plus performants : labels énergie et Carbone (E4 C2), BBCA niveau Excellence et BEPOS+ Effinergie 2017.

© Enertech



Solutions mises en œuvre

Ventilation double flux décentralisée

En journée, le renouvellement d'air est assuré soit par ouverture des fenêtres, soit par la ventilation double-flux. La bascule de l'un à l'autre est conditionnée par des capteurs de température intérieure, extérieure et de masse. Le but est de maintenir une température inférieure à 26°C en été. La VMC peut être pilotée indépendamment bureau par bureau grâce aux interrupteurs. Le confort est ainsi obtenu grâce à **l'implication des usagers**.

Chaque bureau dispose d'un ou plusieurs caissons de ventilation indépendants, prenant et rejetant l'air à travers la façade, pilotés par un simple interrupteur et modulables sur 4 débits. Sans réseau collectif, les pertes de charges sont très réduites et, ainsi, chaque caisson ne consomme que 5 W pour un débit de 25 m³/h, soit 0,2 W/(m³/h), soit deux fois moins que la meilleure des centrales double-flux sur le marché.



Figure 122 : Caisson de ventilation avant et après pose © Enertech

Construction bois paille terre crue

La terre crue apporte une forte inertie au bâtiment. Le choix des matériaux naturels et sains influence aussi la qualité de l'air intérieur. L'isolation paille apporte une isolation thermique et acoustique performante.



Figure 123 : Intérieur du bâtiment en briques de terre crue © Yves Charmont pour Enertech

Bâtiment basse consommation et à énergie positive tous usages

Ce bâtiment allie sobriété énergétique et production d'énergie renouvelable. Le bâtiment est résolument compact et de conception bioclimatique : la façade principale est orientée plein sud et est fortement vitrée, ce qui permet de chauffer passivement. Lors de la période la plus froide de l'année (durant moins de 2 mois) des radiateurs électriques mobiles ont été installés. Le besoin de chauffage calculé est alors de 4 kWh/m²SU.an.

L'éclairage, à très basse consommation, a été conçu à l'aide du logiciel Dialux pour assurer 200 lux en base plus appoint par des lampes de bureau. Les luminaires sont équipés de LED, ce qui a permis de réduire la puissance installée à 2 W/m².

La toiture sud est couverte de 153 m² capteurs photovoltaïques. Avec une puissance crête de 24 kWc, le bâtiment produit 7 fois sa consommation tous usages confondus.

Brise-soleil orientables

Les BSO sont électriques à commande manuelle. Des volets bois sont présents à l'est et à l'ouest ainsi qu'au nord.

Retours d'expérience

Le confort d'été est très agréable. En effet, les températures ne dépassent jamais 28 °C. Construit de manière bioclimatique, le bâtiment ne présente pas de surchauffe, car la surface vitrée représente 18% de la surface totale. En hiver, le bâtiment est aussi très agréable malgré l'absence d'installation de chauffage fixe. Les bureaux au nord avoisinent les 19°C alors que ceux du sud 21°C. La répartition des employés sur les bureaux s'est donc faite selon le ressenti de chacun : les frileux au sud et les moins frileux au nord.

Le bâtiment est particulièrement résilient aux coupures d'énergies grâce à ses installations low-tech et sa production d'électricité sur site.

Les usagers sont naturellement très impliqués (car participants au projet d'élaboration des locaux). L'été, l'aération des pièces se fait le matin (ouverture des fenêtres manuelle). Un guide d'utilisation du bâtiment (de quelques pages) a été donné aux usagers : il sert de référence et permet de garder une trace des consignes à suivre. Il informe aussi les nouveaux arrivants.

L'isolation acoustique entre les niveaux n'est pas excellente, car les solives traversant la terre crue sont en contact avec le linoléum (bio sourcé). Le bruit du premier étage était perceptible au RDC. Pour y remédier, un faux plafond acoustique a été installé.

Le bâtiment est un démonstrateur du savoir-faire de la SCOP. Il est efficient grâce à une bonne conception et une architecture sobre. Cette sobriété se remarque grâce à un coût de construction vraiment faible 1120 € HT/m² SHON pour un bâtiment aussi efficace. Le niveau E4C2 est atteint. Néanmoins, le lot électrique forfaitaire pris en compte dans l'ACV n'est pas représentatif de la réalité : les consommations électriques réelles sont bien plus faibles. Le bâtiment produit tout de même 7 fois l'énergie qu'il consomme et atteint tout juste le niveau E4.

Références : [133]

BOIS DEBOUT, MONTREUIL

© Stéphane Cochet



Situé à Montreuil (93), le bâtiment regroupe 17 logements collectifs et sociaux sur 6 niveaux.

Démarche exemplaire

Le bâtiment vise à montrer les potentialités du matériau bois. Son ossature est faite de bois sans recours aux systèmes de bois lamellé croisé, hormis pour la cage d'ascenseur. Il s'agit donc d'un bâtiment réalisé en filière sèche complète (pas de béton coulé en élévation). Sa performance énergétique est remarquable grâce à une enveloppe optimisée et à des systèmes énergétiques efficaces. Sa compacité est maximale dans le but de laisser le cœur d'îlot en pleine terre et de privilégier une parfaite intégration urbaine avec un retrait de la façade sur rue.

Labels, certifications, référentiels et démarches

Le bâtiment est labellisé H&E profil A, bâtiment biosourcé et PassivHaus : il répond à l'ensemble des critères suivant le protocole PHPP (Passive House Planning Package) s'assurant du respect des objectifs de la construction passive.



© S2T

FICHE TECHNIQUE

Maîtrise d'ouvrage

GIE grand Paris Habitat pour OSICA

Architecte associé

BGA Architecture

BET thermique et fluides

AMOES

Architecte mandataire

A003 architectes

BET structure béton et bois

S2T

Économiste

J. Lot

Réalisation du lot bois

SOCOPA Construction Ossature Bois

Surface

1 323 m² SHON

Coût travaux

1,9M € HT hors démolition

2M€ HT cc démolition et reprises mitoyens

Année de livraison

2016

Localisation

Montreuil, Seine-Saint-Denis, France

Solutions mises en œuvre

Enveloppe thermique performante et installations techniques collectives simples

La composition des parois évite au maximum les ponts thermiques (depuis l'intérieur vers l'extérieur) : cloison, vide technique, pare-vapeur, ossature, laine de verre, contreventement, laine de roche semi-rigide, pare pluie, lame d'air ventilée et bardage ainsi qu'un triple vitrage. Le U moyen de l'enveloppe bâtie est de $0,278\text{W/m}^2\text{K}$, avec un U_p moyen des parois opaques à $U_p=0,138\text{W/m}^2\text{K}$.

Les systèmes énergétiques installés pour assurer le chauffage, la ventilation et d'eau chaude sanitaire sont les suivants :

- Une chaudière gaz à ventouse de 24kW est centralisée à tout le bâtiment et sert au chauffage et à l'eau chaude sanitaire (ECS).
- La production d'ECS et le chauffage sont constitués d'une unique boucle de chaleur.
- Les ballons d'eau chaude sont individualisés sur l'échangeur thermique et sont équipés d'un système de récupération de chaleur low-tech RECOH-VERT ne nécessitant pas de maintenance. Celui-ci permet d'échanger la chaleur de l'eau grise vers l'eau propre froide neuve.
- Une CTA (centrale de traitement d'air) double flux à récupération de chaleur centralisée.

Construction bois

Tout le bâtiment est en **ossature bois** excepté la cage d'ascenseur qui est en CLT avec un palier double solivage. La cage d'escalier est en bois et l'escalier est en béton préfabriqué. Ce type d'escalier est simple à mettre en œuvre et répond à la réglementation incendie qui exige l'usage d'un escalier incombustible.

Toit rafraîchissant

La toiture est revêtue d'une **membrane d'étanchéité « cool roof »**, Renolit Alkorbrigh, permettant de refléter les rayonnements solaires et d'éviter la surchauffe en été. Le toit est aussi dimensionné pour pouvoir recevoir des panneaux photovoltaïques.

VMC double flux

Le bâtiment est équipé d'un système de **VMC double flux centralisée** dans tous les logements avec échangeur rotatif qui permet de récupérer l'humidité pour humidifier l'air en hiver à un taux de renouvellement de $0.5\text{ vol.h}^{-1}/\text{SHAB}$. La VMC double flux centralisée est aussi présente dans la cage d'escalier ce qui permet d'évacuer l'air chaud. Le taux de renouvellement d'air dans la cage d'ascenseur est de $30\text{ m}^3/\text{h}$. Des tests d'étanchéité ont été réalisés sur l'ensemble de l'enveloppe extérieure et garantissent une très bonne étanchéité à l'air. De plus la VMC double flux permet une bonne filtration de la pollution de l'air extérieur. Les bouches de soufflage permettent d'assurer une qualité acoustique importante avec une nuisance inférieure à 25 dB. Le système transite via la cage d'ascenseur qui est incluse dans le volume chauffé.

Implication des usagers

Des stratégies ont été mises en place grâce à :

- Des interrupteurs de veille lumineux. Ces interrupteurs permettent une économie de consommation d'électricité et évitent les apports de chaleur inutiles (car les appareils en veille sont source de chaleur). La nuit, la petite lumière de l'interrupteur peut être gênante pour l'utilisateur ce qui l'oblige ainsi à éteindre les appareils en veille.
- Un petit guide utilisateur précisant le fonctionnement du logement est remis au locataire à son arrivée.

Végétalisation

Un **jardin** situé au nord/nord-est sert de petit potager pour les résidents. La façade nord est aussi végétalisée par des plantes grimpantes. Les eaux pluviales sont récupérées pour alimenter le jardin.

Protections solaires

Afin de se protéger des apports solaires, des volets **brise-soleil** en bois manuels coulissants ainsi qu'une **casquette** au-dessus de chaque fenêtre en acier galvanisé et une casquette brise-soleil au dernier étage ont été mis en place.

La performance énergétique atteint le $Cep=50kWh.ep/m^2.an$ sans recours aux énergies renouvelables.



© Stéphane Cochet

Retours d'expérience

Globalement, le maître d'ouvrage et les occupants des logements sociaux sont satisfaits. Les consommations énergétiques sont très faibles. De manière générale le bâtiment permet de bien conserver la chaleur. Par ailleurs, le bâtiment est uniquement construit en filière sèche. Il possède très peu d'inertie et a donc une réactivité très rapide : en hiver le chauffage des logements peut se faire rapidement.

En été, la boucle de chaleur reliée aux systèmes d'eau chaude sanitaire est une source de chaleur qui engendre des inconforts thermiques. Afin d'y remédier, il a été décidé de mettre les systèmes en marche tôt le matin afin que les usagers aient de l'eau chaude puis de les éteindre en milieu de journée. Les usagers bénéficient tout de même d'ECS en journée grâce au ballon d'eau chaude qui a une bonne capacité de stockage (par exemple 150 litres pour un T4). De plus les sèches serviettes ne sont pas utilisées de façon optimale. Des sèches serviettes électriques plutôt que des radiateurs à eau reliés à la boucle d'eau chaude auraient été préférables.

Les espaces communs sont également source d'inconfort thermique en été et ne permettent pas de rafraîchissement naturel. En effet le Skydome vitré qui sert de trappe de désenfumage est source de chaleur en été (effet verrière). Il aurait été préférable de pouvoir l'ouvrir et ainsi permettre une ventilation. La cage d'escalier possède des fenêtres orientées nord qui ne peuvent pas être ouvertes et pour lesquelles un remplacement par des fenêtres oscillo-battantes est à l'étude.

Le dernier étage est particulièrement chaud. Les protections solaires sont à rayures verticales et non horizontales comme ceux d'en dessous avec un apport de chaleur plus conséquent. Il est envisagé de les modifier pour y remédier.

Malgré cette surchauffe estivale, les habitants se disent plutôt satisfaits.

Il a été remarqué que la CTA consomme de plus en plus chaque année. Cela serait dû au fait que certains usagers bouchent les entrées d'air pour ne pas ressentir de courant d'air. Une démarche de sensibilisation est en cours afin de remédier à cette problématique.

Références : [134,135]

CENTRE ŒNOLOGIQUE VIAVINO, SAINT-CHRISTOL



Démarche exemplaire

Situé en climat méditerranéen, à Saint-Christol (34), le centre œnologique Viavino est un bâtiment low tech principalement construit à partir de matériaux locaux (bois, pierre et terre battue). Le site est réparti sur 7 bâtiments couvrant 900 m² de plancher. L'objectif « énergie zéro tous usages » a été visé sur tous les bâtiments à l'exception de la restauration.

Solutions mises en œuvre

Matériaux naturels

Les bois proviennent des forêts des Cévennes proches : Douglas, Peuplier, Pin. Les pierres calcaires viennent des carrières de Lunel, Roquemalière et Beaulieu. La peinture a été réalisée à l'argile et le revêtement de sol est en terre battue.

Ventilation naturelle assistée et contrôlée

L'air entre par des bouches dans les parois ou en allège des fenêtres selon les bâtiments, et sort par des tourelles assistées (par des turbines actionnées par le vent) et contrôlées (par registre asservi à une vitesse d'air dans le conduit). La régulation se fait via un tableau de commande par bâtiment qui pilote les différentes zones. Le système permet d'assurer les débits de ventilation hygiénique toute l'année, ainsi que la **surventilation** pour le confort d'été.

FICHE TECHNIQUE

Maîtrise d'ouvrage

Communauté de communes du Pays de Lunel

Maîtrise d'œuvre

Atelier Philippe Madec, architectes.
Nathaël Raus, chef de projet.

BET

Tribu (qualité environnementale et développement durable), Arc-en-scène (scénographie), in situ (paysage), 3B Batut (bois), Mc Pro (TCE, économiste), ICC (VRD).

Principales entreprises

Paje construction : gros-œuvre
Eurovia : VRD, p paysage
Spie : CVC, plomberie
Energys : électricité
GL Events : mobilier, agencement

Réalisation du lot bois

Structure Bois Couverture (Le Crès)

Surface du terrain

2 ha.
Surface aménagées paysagées : 6 445 m²

Surface des bâtiments

1 432 m² SHON

Coût travaux

7,3 M€ HT

Année de livraison

2012

Localisation

Saint-Christol, Hérault, France

Puits provençal

Assuré par une ventilation mécanique uniquement lorsque la salle camarguaise est occupée, le puits provençal est composé de 14 tubes de diamètre 20 cm, de longueur 28 m et de profondeur de 2 à 4 m.



Figure 124 : Puits provençal

Gestion du confort

Le confort estival est obtenu grâce à des protections solaires par **brise-soleil** fixes ou mobiles selon les orientations, **surventilation nocturne** et des **brasseurs d'air**.



Figure 125 : Brasseurs d'air du centre Viavino © Atelier Philippe Madec

Chauffage

Par chaudière bois de 50 kW sur les bâtiments d'accueil et de vente ou par un poêle bois sur la halle camarguaise (celui-ci n'est mis en route manuellement que lorsqu'elle la salle est utilisée).

Panneaux photovoltaïques

104 panneaux photovoltaïques de 25 kWc sont répartis sur 170 m².

Espaces extérieurs

La gestion des eaux pluviales se fait grâce à :

- Une récupération des eaux de pluie pour alimentation des sanitaires des bâtiments accueil, restaurant et salle polyvalente.
- Une infiltration sur la parcelle via un bassin de rétention.

Végétalisation

Un jardin ampélographique est composé d'une prairie, d'un jardin méditerranéen et aromatique, ainsi que d'une roseraie. Afin de préserver au mieux cet espace naturel, la circulation automobile est interdite sur le site.

Références : [93,136]

BATIMENT MAX WEBER, UNIVERSITE NANTERRE



© Agence Pascal Gontier

Réalisé par l'architecte Pascal Gontier, le bâtiment Max Weber est destiné à accueillir les chercheurs en Sciences Sociales et Humaines à Nanterre (92).

Démarche exemplaire

Les 5 niveaux du bâtiment sont 100% en structure bois, y compris les cages d'ascenseurs et d'escaliers. Le bâtiment est de type passif, sans climatisation et est ventilé naturellement grâce à un dispositif en toiture constitué de 25 cheminées de ventilation de 3,80 mètres de haut. Ce bâtiment se devait d'être adapté à ses usages et à son équipe, tout en répondant à une volonté d'attractivité nationale et internationale et tout en s'insérant également dans le site et dans la ville. Ce bâtiment vise l'exemplarité notamment grâce à :

- La réduction de l'emprise en sol en limitant l'imperméabilisation de la parcelle et en développant des surfaces végétalisées
- La gestion de terres végétales grâce à un stockage et une réutilisation sur site
- La réduction des consommations effectives d'énergie du bâtiment par une conception sobre et efficace
- La réduction des consommations d'eau potable grâce à l'installation d'équipements hydroéconomiques et de récupération d'eau de pluie
- La réduction de l'empreinte carbone des usagers grâce aux installations favorisant la mobilité douce.

Labels, certifications, référentiels et démarches

Lauréat des Green Building Solutions Awards 2016 dans la catégorie bas carbone et 1^{er} prix des trophées bois Ile-de-France 2016.



© Agence Pascal Gontier

FICHE TECHNIQUE

Caractéristiques environnementales

Bâtiment RT 2012 -27%, ventilation naturelle, Ossature bois

Maitre d'ouvrage

Université de Nanterre
Mandataire : ICADE Promotion

Assistance à maîtrise d'ouvrage HQE

SLH ingénierie

Architecte

Atelier Pascal Gontier

Bureau d'Étude

Batiserf, Inex, Cabinet MIT, J.P. Lamoureux

Réalisation du lot bois

Charpente Houot

Surface

4 904m² SDP
5 339 m² SHON

Coût de construction

11,7M € HT

Livraison

Février 2016

Durée du chantier

22 mois (préparation incluse)

Localisation

Nanterre, Hauts-de-Seine, France

Solutions mises en œuvre

Ventilation naturelle contrôlée et assistée

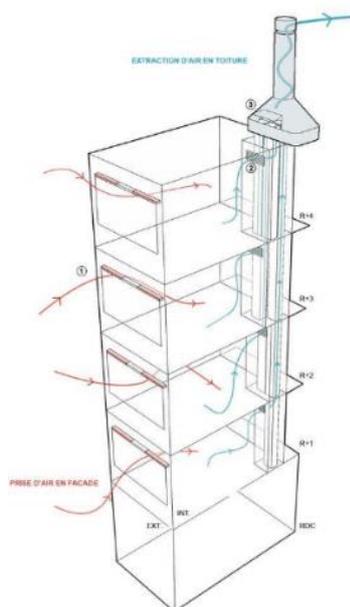
Une prise d'air est installée en façade au-dessus des fenêtres dans chaque bureau. La ventilation fonctionne de manière naturelle, mais peut être motorisée et autoréglable si le débit d'air doit être ajusté. La circulation d'air est assurée par une grille et une gaine d'extraction situées à l'opposé de la prise d'air dans la pièce. Un clapet contrôle les débits d'extraction d'air pour chaque gaine, et donc pour chaque bureau, grâce à un capteur de mesure. Son pilotage est réglable en fonction des saisons.

La hauteur de la tourelle de 3,80 m en toiture permet d'augmenter le tirage de l'air et donc d'améliorer le fonctionnement du système. Lorsque le fonctionnement en naturel ne permet pas d'assurer les débits requis, un extracteur installé en haut de chaque tourelle peut être activé afin d'aspirer l'air intérieur pour l'expulser vers l'extérieur.



© C. Bertolin

FONCTIONNEMENT HIVER



FONCTIONNEMENT MI-SAISONS / ETE

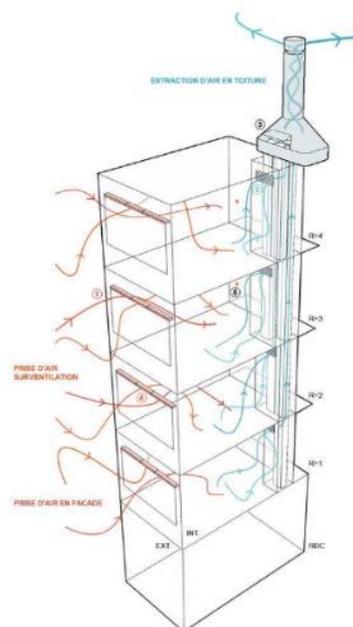


Figure 126 : Fonctionnement de la VNAC en fonction des saisons

Implication de l'utilisateur dans la ventilation naturelle

Le pilotage du système est différencié selon la destination des locaux. Pour les bureaux ou les salles d'expérimentation, un pilotage horaire « tout ou rien » est appliqué. En période d'occupation, le débit maximum est extrait sans modulation. En période d'inoccupation, la nuit et le dimanche, aucune extraction n'est possible. Pour les salles de réunion ou de convivialité, le pilotage est géré par l'utilisateur au moyen d'un actionneur numérique offrant trois possibilités de débit (faible/ moyen/ élevé). Ce système est associé à une sonde CO₂ qui permet de lancer la ventilation et d'augmenter son débit si le pilotage utilisateur n'est pas adapté à l'utilisation du local.

Rafraîchissement grâce à un puits canadien

Le rafraîchissement est réalisé grâce à un puits canadien avec réseau de canalisations enterrées en fonte, qui apporte gains de confort et de coût de chauffage. Le puits canadien permet notamment une meilleure qualité de l'air intérieur.

Matériaux naturels

Les bois utilisés sont l'Épicéa pour la structure, le Mélèze pour le revêtement extérieur abrité ainsi que du Chêne, de l'Épicéa, du Hêtre et du Pin pour les menuiseries, le mur rideau, les escaliers et les revêtements intérieurs.

Récupération d'eau de pluie pour l'arrosage et les sanitaires

Un volume de stockage des eaux pluviales provenant de la toiture du bâtiment a été prévu. Le volume de la cuve de stockage a été déterminé par la maîtrise d'ouvrage à 20 m³ afin de couvrir les besoins en eau pour l'arrosage des espaces verts de l'université. Ces besoins s'étalant sur une période de six mois maximums, la maîtrise d'œuvre a proposé de raccorder cette cuve aux sanitaires du bâtiment de sorte à couvrir également les besoins en eau non potable lorsqu'il n'y a aucun besoin pour l'arrosage. Le taux de couverture pour les sanitaires a été estimé à 35 %.

Végétalisation

Au pied du bâtiment, les noues, plantées d'espèces adaptées (Carex comans et Carex Elata), permettent le recueil des eaux, la protection de la façade en lui apportant moins de réverbération de la chaleur.

Retours d'expérience

Le **confort d'été** est assuré par différentes dispositions : l'optimisation de la taille des fenêtres (pas d'allèges vitrées par exemple), la mise en place de protections solaires extérieures, l'inertie thermique par les chapes en béton de 7 cm, la surventilation naturelle possible depuis chaque bureau.

Confort acoustique

Les isolements requis par rapport aux bruits extérieurs se situent entre 30 et 34 dBA selon les façades. Les menuiseries extérieures ont, quant à elles, un indice d'affaiblissement acoustique de 31 à 34 dB. Les grilles de ventilation naturelle présentaient une difficulté particulière, car le projet se situe dans un environnement marqué par la présence de l'autoroute A86 à 200 m. En effet, elles devaient à la fois présenter de faibles pertes de charge de façon à être compatibles avec le dispositif de ventilation naturelle hybride (pour la ventilation hygiénique comme pour le confort d'été), et être très performantes d'un point de vue acoustique.

Consommation d'énergie primaire faible

Une étude de faisabilité des approvisionnements en énergie a été réalisée et c'est la solution de raccordement au réseau de chaleur de l'université de Nanterre qui a été choisie. Le calcul des charges pour le raccordement au réseau de chaleur de l'université de Nanterre a été effectué sur des hypothèses d'un coût d'abonnement de 34 euros HT/kW par an et d'un coût de l'énergie fournie de 40 euros HT/ MWh.

L'étude thermique a permis de calculer une consommation d'énergie primaire (Cep) pour le bâtiment à hauteur de 51,60 kWh/m².an, soit 30 % de moins que le niveau réglementaire maximum (Cep max : 71,50 kWh/m².an. La consommation d'énergie primaire avoisine la consommation d'un bâtiment passif.

Références : [137–139]

BAITYKOOL, DUBAI, ÉMIRATS ARABES UNIS



© Université de Bordeaux

Conçue et bâtie dans le cadre du Solar Decathlon Middle East 2018, la maison Baitykool est le fruit d'un consortium parmi lesquels on retrouve l'université de Bordeaux et NOBATEK/INEF4. Le projet a remporté la troisième place du concours, et a fini premier dans les catégories « développement durable » et « efficacité énergétique » et second dans la catégorie « architecture ».

Le bâtiment a été organisé pour répondre aux besoins d'une famille, mais a été pensé pour facilement évoluer vers un espace de coworking.

Démarche exemplaire

Située en climat désertique, dans un désert proche de Dubaï, cette maison en bois lamellé croisé (CLT) rassemble plusieurs technologies novatrices, permettant de rafraîchir la maison en autoconsommation la plupart du temps.

Solutions mises en œuvre

Ventilation naturelle

Les fenêtres de la maison sont motorisées et commandées afin de s'ouvrir aux heures les plus froides de la nuit et permettent une décharge thermique partielle du bâtiment. De plus, cela permet de remonter le taux d'humidité intérieur le jour, pour respecter les critères de confort de vie.

Pour maximiser ces phénomènes, deux dispositions ont été prises. Premièrement, la maison est en forme de U et le patio orienté vers les vents dominants. Ainsi le vent « s'engouffre » dans le patio, accentuant l'effet de ventilation par l'effet Venturi. Deuxièmement, l'entrée d'air se fait via des ouvertures en dessous du dispositif d'aquaponie¹¹. L'air entrant peut alors se charger en humidité permettant d'améliorer les taux en journée.

En étant combiné à une bonne isolation, ce système permet de soulager le besoin en climatisation le jour.

FICHE TECHNIQUE

Maitre d'ouvrage

Projet étudiant - pas de maîtrise d'ouvrage

Assistance à maîtrise d'ouvrage HQE

Projet étudiant - pas de maîtrise d'ouvrage

Architecte

Équipe regroupant enseignant et étudiant de l'université ENSAPBx

Bureau d'Étude

Équipe regroupant enseignant et étudiant de l'université de Bordeaux, de l'Ensam, d'Amity University Dubaï et d'An Najah university. NOBATEK/INEF4 est aussi intervenu.

Réalisation du lot bois

CILC (Jaunay Clan)

Surface

73 m² SDP

Coût de construction

1,2M€ HT

Livraison

Novembre 2018

Durée du chantier

2 mois (préparation incluse)

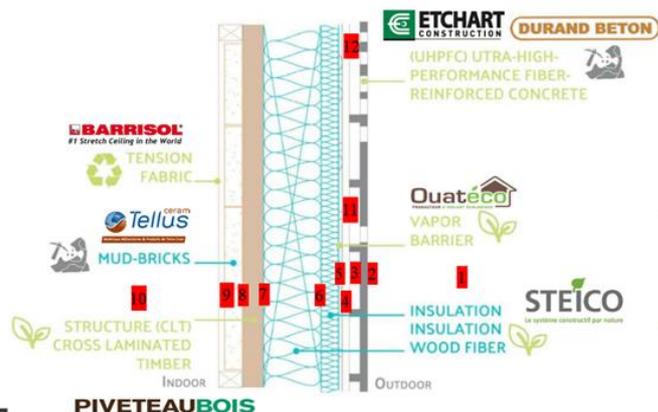
Localisation

Dubaï, Émirats arabes unis

¹¹ L'aquaponie est un système qui unit la culture de plante et l'élevage de poissons.

Matériaux naturels

L'isolation est obtenue par la juxtaposition de plusieurs couches jouant chacune un rôle déterminant pour l'équilibre humidité/température. Plusieurs matériaux naturels sont utilisés pour leurs propriétés physiques intéressantes. La maçonnerie intérieure utilise des briques en terre crue pour ses propriétés de régulation thermique et hygrométrique. Ce composant possède une inertie relativement importante permettant de stocker la fraîcheur sur de plus longues périodes que les matériaux utilisés classiquement. L'isolation thermique est assurée via de la fibre de bois à conductivité thermique basse ($\lambda = 0,036 \text{ W/m.K}$) et à très faible impact sur la qualité de l'air intérieur (étiquette A+ qualité de l'air intérieur). Enfin, la structure est composée de bois lamellé croisé.

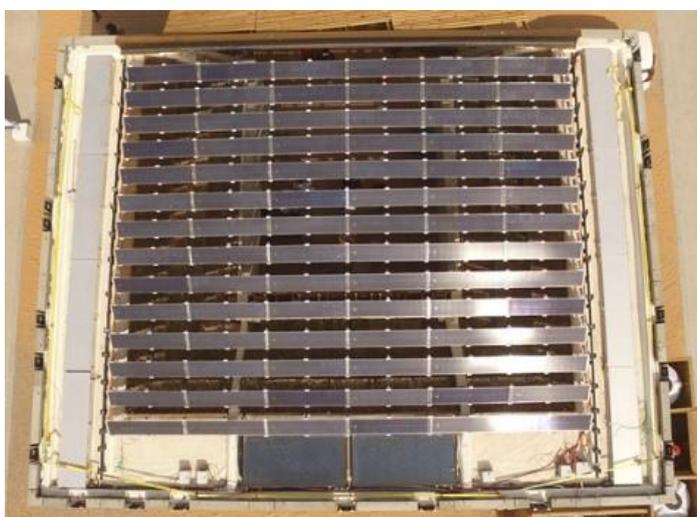


Radiative Sky Cooling

Des panneaux fortement émissifs installés sur le toit permettent de capter le froid de la voûte céleste lorsque le ciel de nuit est dégagé. Un réseau hydraulique permet alors de stocker ce froid via un ballon d'eau, et de le redistribuer en journée. La température de l'eau circulant dans le réseau peut être abaissée jusqu'à 5°C par rapport à la température ambiante nocturne.

Pergola innovante

Pour améliorer le confort de vie dans le patio en journée, il est nécessaire de recourir à une pergola pour générer de l'ombre. Afin de tirer parti au maximum de cette structure, des panneaux solaires photovoltaïques inclinés sont fixés sur cette dernière. Ceux-ci présentent la particularité d'être semi-transparents



11 m² de panneaux radiants installés en toiture

pour garder un confort visuel acceptable dans le patio.

Il a été décidé d'utiliser comme matériau un composite à couche bois et carbone ce qui permet de réduire la section des profilés. Cette structure peut être rétractée la nuit suivant un mouvement de translation généré par un moteur. L'effet Venturi décrit précédemment est alors maximisé.

Moucharabieh

Pour filtrer la lumière entrant dans la maison, l'équipe de Baitykool a repris la solution séculaire du moucharabieh. Cependant, ce dernier a été réalisé grâce à des panneaux béton percés de 4m de haut. Pour assurer la tenue mécanique de cette structure, il a été nécessaire d'utiliser un béton haute performance constitué de paillettes de fer projetées. Architecturalement, l'emploi de ce matériau brut fait référence aux formations rocheuses que l'on peut trouver dans ces régions, ce qui favorise son intégration dans le paysage.

D'extérieur, il est impossible de distinguer l'intérieur du bâtiment. A l'inverse, l'extérieur est parfaitement visible depuis l'intérieur de la maison.

Végétalisation

Une partie de la toiture sous la pergola ainsi que les murs du patio sont végétalisés afin d'apporter un confort de vie aux résidents en augmentant l'humidité du milieu via le phénomène d'évapotranspiration. Le besoin en eau de la végétation a été dimensionné pour correspondre à la quantité d'eau grise rejetée par une famille de trois personnes. Cette eau est

purifiée via le système Lombrifiltre¹² et par une purification biosolaire. La qualité d'eau en sortie de ce système est telle qu'elle est propre à la consommation.

Un système aquaponique murale permet de produire localement des légumes via l'élevage de poissons. L'aquarium fait alors office de fenêtre pour l'habitation, et les plantes qui poussent verticalement participent elles aussi au confort de vie du patio.

Retours d'expérience

La maison Baitykool est particulièrement adaptée à son environnement. Les températures intérieures du bâtiment sont satisfaisantes compte tenu du climat très chaud et humide (30°C en hiver et 50 °C en été). Les moucharabiehs permettent de rafraîchir l'intérieur en diffusant un courant d'air très léger. L'ouverture vers le ciel du patio associé à une pergola innovante procure une lumière de jour très agréable.

Le radiative sky cooling permet de refroidir le bâtiment la nuit et l'expérimentation a été concluante durant les quelques semaines d'utilisation de la compétition et a posteriori lors des phases de caractérisation du système. Il ne pourra cependant pas couvrir l'entièreté du besoin.

Le patio central, l'aquarium et les végétaux créent une ambiance très vivante contrastant avec le désert. Les panneaux végétaux ont permis de faire pousser certains fruits dans ces conditions extrêmes. L'atmosphère « vivante » offerte par la maison a particulièrement attiré la curiosité des visiteurs durant la compétition ainsi que celle des oiseaux (certains ont même décidé de s'y nicher).

Les vitrages intérieurs s'ouvrent sur le patio et confèrent à la maison une atmosphère très sociale et familiale en respect avec la culture de la région sur l'ouverture vers la famille.

Les panneaux solaires photovoltaïques produisent de l'électricité (en période d'ensoleillement maximal) qui est stockée afin d'être réutilisée la nuit. Les panneaux permettent d'assurer la totalité de la consommation électrique (y compris de la climatisation) ce qui permet à la maison d'être à énergie positive. Suite au concours, et aux vues des excédents de production électrique, la maison a servi d'expérimentation taille réelle pour le Smart Grid de Dubaï.

Références : [140]

¹² Le Lombrifiltre est un système de traitement des eaux usées développé par NOBATEK/INEF4. Son fonctionnement est basé sur l'action de vers de terre et de microorganismes.

GROUPE SCOLAIRE STEPHANE HESSEL / LES ZEFIROTTE, MONTREUIL



© Luc Boegly

Situé à Montreuil (93), le groupe scolaire Stéphane Hessel - Les Zéfirottes d'une surface de 6200 m² se développe sur 3 niveaux et peut accueillir jusqu'à 650 enfants.

Démarche exemplaire

Le projet est exemplaire en termes de développement durable. Il vise une performance ambitieuse sur tout son cycle de vie, de la maîtrise des gaz à effet de serre en phase d'usage jusqu'à la maîtrise des ressources épuisables utilisées lors de la construction. L'objectif visé est triple : « zéro énergie, zéro carbone, zéro déchet nucléaire ».

L'opération s'inscrit dans le cadre du projet MUSIC (Mitigation in Urban areas and Solutions for Innovative Cities) qui, retenu par le programme européen Interreg, regroupe plusieurs villes européennes sur la problématique de l'efficacité des mesures d'économie d'énergie en ville.

Labels, certifications, référentiels et démarches

Du point de vue énergétique, l'exigence d'une neutralité en énergie primaire, en carbone et en déchets nucléaires induits, tous usages confondus, va très au-delà du label Bepos. Le bâtiment est considéré comme un précurseur des points de vue constructif et énergétique.

Cette opération est lauréate 2015 du 1er prix des Trophées bois en Ile-de-France.



© Luc Boegly

FICHE TECHNIQUE

Maîtrise d'ouvrage

Mairie de Montreuil

Architecte

Christian Hackel, associé : Méandre

AMO HQE

TRIBU - Concevoir durable

Paysagiste

Panorama paysagistes

BET fluides, thermique

Alto Ingénierie

BET structure bois

Gaujard Technologie Scop

Réalisation du lot bois :

Charpentes Cénomane (Requeil)

Isopaille (Cherré)

Surfaces

Surface SHON 6 200 m²

Surface de cour : 2 000 m²

Surface de jardins 3 800 m²

Bâtiment R+2

Construction filière sèche

Coût de construction

13 M€ HT

Année de livraison

2014

Localisation

Montreuil, Seine-Saint-Denis, France

Solutions mises en œuvre

Mur à ossature bois et paille

Les murs ont été préfabriqués sous forme de caisson. L'isolation de 35 cm est composée de près de 6 000 m² de ballots de paille qui viennent de la Sarthe. La structure des murs est réalisée via des montants en bois lamellé-collé et des panneaux de contreventements OSB. Ils sont situés à l'intérieur et assurent également le rôle de pare-vapeur. Un doublage intérieur est utilisé pour le passage des réseaux et l'isolation acoustique. Les ponts thermiques ont été limités par une isolation extérieure.

Protections solaires

Des brise-soleil amovibles suivant la course du soleil ont été mis en place :

- À l'Est et Ouest : brise-soleils verticaux
- Au Sud : stores à lames horizontaux
- Au Nord, des rideaux sur anneaux permettent l'occultation des salles de classe.

Confort estival

Les salles de classe possèdent chacune deux ouvrants suivant une orientation Nord-Sud et permettant une **surventilation naturelle**. Des **brasseurs d'air** ont aussi été mis en place et améliorent le confort d'été.

Ventilation

Un système de **ventilation mécanique double-flux** est utilisé afin de limiter les pertes de calories par renouvellement d'air et une centrale de traitement d'air (CTA) à débit variable réduit les besoins en période d'inoccupation. Des **détecteurs de présence et sondes CO₂** ont été implémentés dans les locaux fortement occupés et permettent un ajustement des débits de ventilation. Pour plus de confort sanitaire, les débits de renouvellement d'air ont été augmentés par rapport aux débits réglementaires : 20 m³/h au lieu de 15 m³/h.

Production d'énergie renouvelable et gestion énergétique

Le bâtiment est également doté d'une production solaire photovoltaïque (un peu plus de 600 m²), solaire thermique (25 m²) pour l'eau chaude sanitaire et chaufferie à cogénération huile végétale avec planchers chauffants. Le bâtiment est à énergie positive : annuellement, il produit 550 000 kWh et consomme 487 000 kWh. Les 55 000 kWh restants sont alors réinjectés sur le réseau.

Des consignes de chauffage limitées à 20°C pour les classes et 16°C pour les circulations permettent d'éviter une surconsommation de chauffage. De plus les parois isolantes permettent de garder les apports thermiques des élèves. La consommation annuelle de chauffage est d'environ 9kWh/m² (contre 220 kWh/m² pour un bâtiment traditionnel).

Végétalisation

L'école est située dans un jardin de 3 500 m² apportant ombre et fraîcheur. Un travail en amont a été réalisé par des paysagistes afin d'implémenter l'école au sein de l'espace vert et non l'inverse. De nombreux arbres, un potager ainsi que de petits étangs intègrent de la biodiversité au cœur de l'école. Au nord, de grands platanes assurent un bel ombrage et au sud des plantations arborent la cour de récréation. Le recyclage de l'eau de pluie pour les toilettes de l'école primaire et l'arrosage du jardin, avec 8 000 plantes vivaces, a également été pensé durant l'étape de programmation. Les eaux de toitures de l'école sont stockées dans une cuve enterrée de 10 m³.

Confort visuel

La lumière naturelle est assurée par de grands vitrages et une double exposition des salles de classe. La circulation monodistributive y diffuse un éclairage naturel en second jour et via des puits de lumière.

Retours d'expérience

La question du confort a été abordée de façon transversale en intégrant l'ensemble des aspects - lumière naturelle, ambiance acoustique, thermique d'été, qualité de l'air - grâce à des choix de conception bioclimatique et techniques rigoureux et efficaces. L'école est jugée très agréable par les usagers, car le jardin apporte beaucoup de fraîcheur en été. De plus, le potager, ludique et éducatif est très apprécié des enfants.

L'intérieur de l'école est très lumineux et le bois apporte une sensation de chaleur en hiver.

Concernant les systèmes, les brasseurs sont fréquemment utilisés par les enseignants, mais aussi par les agents d'entretien pour accélérer le séchage. La surventilation n'est pas utilisée la nuit, mais plutôt la journée pour créer des courants d'air.

Références : [141–143]

EASTGATE BUILDING : « LE BÂTIMENT TERMITIÈRE », HARARE, ZIMBABWE



FICHE TECHNIQUE

Équipe de design et de construction

Old Mutual Properties
Pearce Partnership (Harare)
Arup Engineers (Londres)
Quantity Surveyors Hawkins, Lesnick et Bath

Surface

Surface du terrain : 5 300 m² (RDC)
+ 26 000 m² (bureaux dans les étages supérieurs)

Coût de construction (hors VRD)

28M d'euros, soit 1040 € / m²

Année de livraison

1996

Localisation

Harare, Zimbabwe

Démarche exemplaire

L'Eastgate Building est un centre commercial se trouvant à Harare au Zimbabwe. L'objectif du projet était de construire un bâtiment ne nécessitant pas l'utilisation d'air conditionné et de chauffage, ce qui représentait un grand défi au vu du climat de la région (chaud et humide en été et froid et sec en hiver).

Ce bâtiment abrite un système de ventilation inspiré du fonctionnement des termitières lui permettant une excellente rentabilité énergétique.

Dans une termitière, l'air est aspiré dans les parties inférieures grâce à des ouvertures situées tout autour du nid où les larves sont élevées. Il circule ensuite sous terre où il est rafraîchi au contact de puits dont la profondeur varie suivant les espèces (de quelques à plusieurs dizaines de mètres) que les termites creusent pour atteindre la nappe phréatique. Cet air frais remonte ensuite par tirage thermique vers l'intérieur de la termitière. Une fois réchauffé, du fait de sa densité, l'air chaud migre vers le haut de la termitière pour être ensuite évacué par une cheminée centrale. Ce phénomène entraîne une ventilation naturelle de l'ensemble de l'habitat. Les termites peuvent alors réguler très précisément le taux d'humidité et en partie la température de la termitière en faisant varier la porosité à l'eau et à l'air.



Figure 127 : Termitières *Odontotermes Transvaalensis*, vue de dessus. [CCO Creative Commons](#), Estelle Cruz

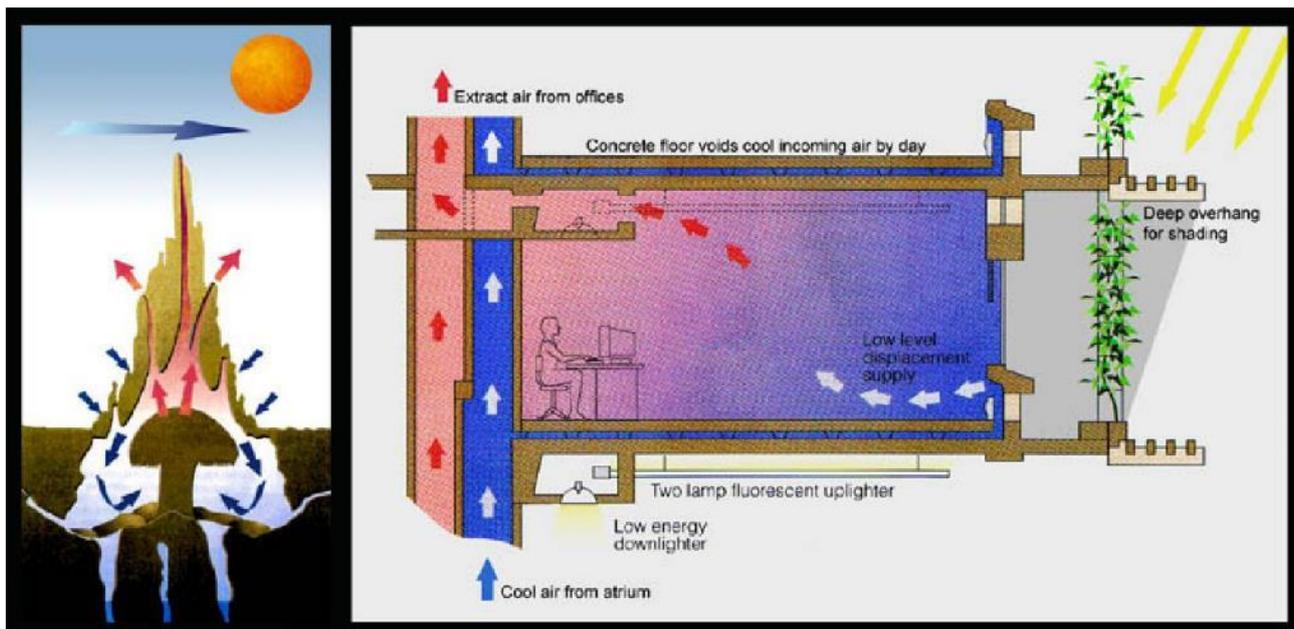


Figure 128 : Schéma de fonctionnement des termitières et section d'un étage de l'Eastgate © Ove Arup

L'Eastgate Building absorbe la fraîcheur durant la nuit et la restitue durant la journée grâce à la combinaison de deux principes : un matériau à forte inertie thermique et la convection naturelle. Des prises d'air en partie basse du bâtiment (à 9 m du sol) assurent la captation de l'air. Celui-ci est ensuite refroidi au contact de la structure du bâtiment puis lorsqu'il se réchauffe naturellement, il est attiré vers le haut où il est évacué par 48 grandes cheminées positionnées en toiture. Ce flux correspond au phénomène de tirage thermique semblable à celui mis en œuvre dans les termitières. Pour gagner en efficacité lorsque la différence de température entre l'intérieur et extérieur du bâtiment n'est pas suffisante, le mouvement de l'air est accentué durant la nuit par des ventilateurs positionnés au niveau de cheminées.

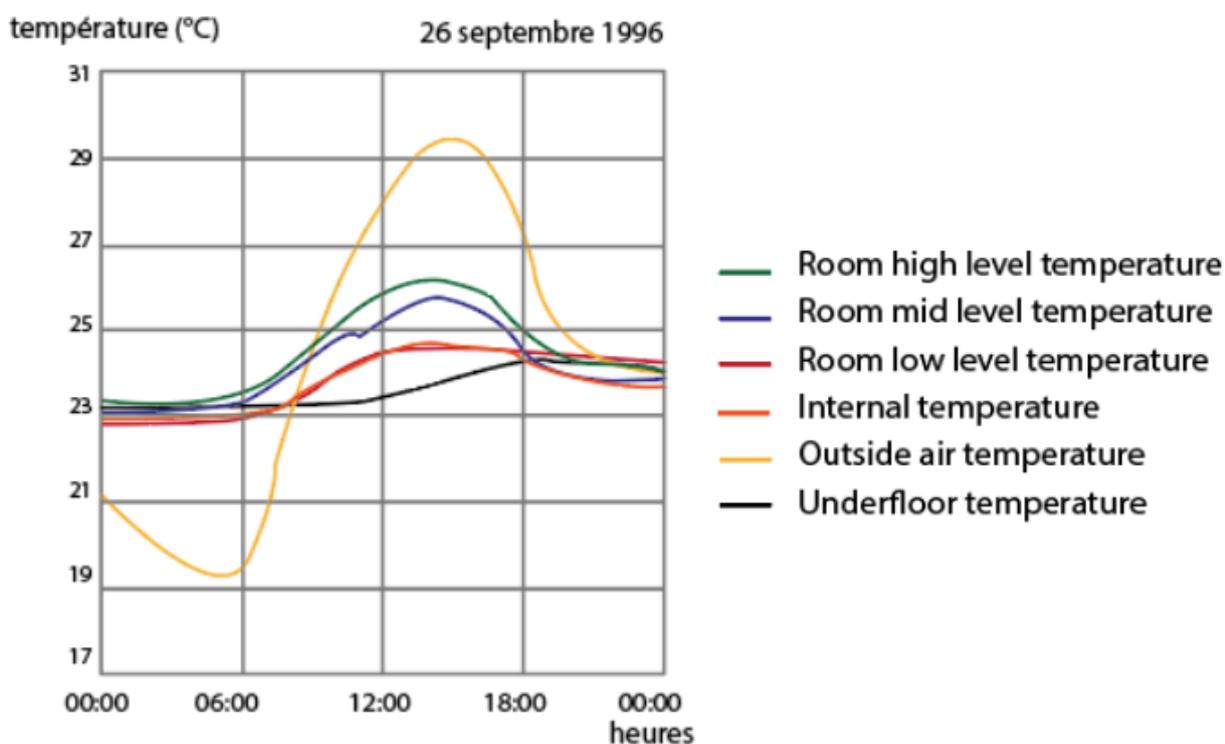


Figure 129 : Enregistrement des variations de température au sein de l'Eastgate © Ove Arup

Le bâtiment consomme 35 % d'énergie totale en moins que la consommation moyenne de six autres bâtiments conventionnels à Harare équipés d'un système CVC complet. L'économie réalisée sur le coût d'investissement par rapport à la climatisation intégrale est estimée de 10 % du coût total du bâtiment.

Labels, certifications, référentiels et démarches

Plusieurs certificats ont été attribués à ce projet :

- Le certificat de mérite du Conseil international des centres commerciaux 1997. C'est la première fois qu'un bâtiment en Afrique (y compris l'Afrique du Sud) est récompensé par un tel certificat.
- Le prix Fulton 1997 - Pour l'excellence dans l'utilisation du béton
- Le prix de la construction en acier 1997 - Certificat de mérite

Solutions mises en œuvre

Les solutions mises en œuvre sont :

- Une ventilation naturelle passive aidée ponctuellement par des brasseurs d'air (en été quelques semaines par an).
- Une bonne inertie thermique.
- Un rideau végétal permettant de rafraîchir le bâtiment ainsi que de se protéger des rayons du soleil en été (végétation à feuille caduque).

Références : [144–146]

CIRC, LYON



Le futur bâtiment du CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer) s'implantera dans le quartier de Lyon-Gerland. Le CIRC souhaite se rapprocher de l'écosystème de la santé. Il a pour but d'être en proximité d'autres acteurs clés de la santé mondiale, comme la future académie de l'OMS. Le nouveau siège incarnera l'innovation et l'ouverture sur le monde du centre de recherche.

Labels, certifications, référentiels et démarches

Le bâtiment doit créer des conditions favorisant l'épanouissement individuel et collectif, suivant les critères de la certification Well[®].

Solutions mises en œuvre

L'édifice construit en bois, creusé en son centre par un jardin circulaire à ciel ouvert, minimisera le bruit et la chaleur grâce à une **façade à double peau**, en verre et en bois, bardée de lames en métal à mémoire de forme – la façade Pho'liage - protégeant du soleil, à l'image de pétales de fleur. De plus, les **vitrages seront à propriétés variables** et s'assombriront lors d'une luminosité trop importante.

Le centre abritera un jardin planté de 1 000 m² à ciel ouvert. De plus, la structure simple avec des poteaux bien tramés permettra de faire évoluer la capacité du bâtiment.

La façade Pho'liage s'inspire du mécanisme d'ouverture et fermeture des stomates (organes à la surface des feuilles des plantes responsables des échanges gazeux). L'adaptation de ce mécanisme passif en façade permet la régulation de l'apport thermique et lumineux pour optimiser la consommation d'énergie du bâtiment. Dans la même optique, ce système permet une optimisation de l'apport lumineux.

Références : [147–149]



FICHE TECHNIQUE

Maître d'ouvrage
Métropole de Lyon

Programme
Bureaux, laboratoires et centre de vie en collaboration avec *Art & Build Architect*

Mission
Conception - Réalisation avec Demathieu Bard

Surface
10 000 m²

Montant des travaux
38M€ HT

Date de livraison
2022

Localisation
Lyon, Rhône, France

BIBLIOTHEQUE ALCAZAR, MARSEILLE



© Fred Romero CC BY 2.0

FICHE TECHNIQUE

Maitrise d'ouvrage

Ville de Marseille

Maîtrise d'œuvre

ATELIERS AFA Paris (75013)

Collaborateurs

Didier Rogeon Architecte

Co-traitants de la Maîtrise d'œuvre

Beterem BET Marseille

Surface

18 000 m² SHON

Coût de construction (hors VRD)

30,2 M€

Année de livraison

2004

Localisation

Marseille, Bouches du Rhône, France

L'Alcazar est une ancienne salle de spectacle fondée en 1857, devenue depuis 2004 une bibliothèque municipale répondant à une volonté de la ville de redynamiser le centre-ville de Marseille. Elle s'étend sur 18 000 m² répartis en deux bâtiments. Les locaux accessibles au public s'étendent sur quatre niveaux autour d'une grande "rue intérieure". L'ensemble du bâtiment est conçu selon une volonté de transparence et de fluidité, notamment par l'utilisation de façades translucides, d'ascenseurs panoramiques ainsi que d'espaces intérieurs ouverts et éclairés par la lumière naturelle.

Démarche exemplaire

La proposition des architectes de réaliser une façade en marbre Arabescato permet de limiter l'apport de lumière direct à l'intérieur du bâtiment. Le rayonnement solaire direct doit en effet être évité pour ne pas dégrader les ouvrages stockés dans la bibliothèque. La maîtrise de l'éclairage est également importante pour la lecture et les salles de travail. Aussi, le bâtiment bénéficie de patios qui permettent l'apport de lumière naturelle indirecte jusqu'au centre du bâtiment. L'atrium central, quant à lui, est couvert par des brise-soleil qui limitent le rayonnement direct dans la rue intérieure tout en diffusant une lumière homogène.

La façade en marbre est l'élément visible majeur de la bibliothèque. Cette façade permet de filtrer et diffuser la lumière naturelle.



Solutions mises en œuvre

La bibliothèque de l'Alcazar à Marseille fait appel à des **brise-soleil** fixes horizontaux. Placés sur la verrière, ils limitent les apports solaires dans l'atrium intérieur.

Le revêtement de la façade orientée plein sud permet quant à lui un **éclairage naturel indirect**. Il est constitué d'un sandwich translucide de verre/marbre mince/verre. Ce composite bloque grâce au marbre le rayonnement direct. Les parois de verre protègent le panneau de marbre de 6 mm d'épaisseur contre les intempéries. Pour conserver l'aspect du marbre, un verre dit « extra-blanc », produit par Saint-Gobain a été utilisé.

Des **étagères à lumière (ou light-shelf)** sont mises en œuvre sur certaines façades de sorte à bloquer le rayonnement solaire direct et à le renvoyer vers le plafond de la pièce. Ce dispositif permet de diffuser la lumière par réfraction évitant ainsi les éblouissements.

REFERENCES : [150,151]

BAÏ UNA & BAÏ ONA, BAYONNE



© Patrick Arotcharen Architecture
Vincent Monthiers et Mathieu Choiselat

Démarche exemplaire

Cette résidence de 15 logements sociaux en R+1 a été construite sur la ZAC d'Arrousets à Bayonne. Les bâtiments se caractérisent par une orientation Nord/Sud (approche bioclimatique optimisée), l'utilisation d'un procédé constructif en filière sèche (ossature bois) avec une attention particulière portée à l'isolation des murs extérieurs, une étanchéité à l'air de l'enveloppe importante ainsi que l'intégration de matériaux à changement de phase (MCP). Le projet s'inscrit plus largement dans le cadre de l'Appel à Projets « ALIENOR » soutenu par la région Aquitaine et la délégation régionale Aquitaine de l'ADEME pour la réalisation de bâtiments à haute efficacité énergétique et environnementale, adaptés au climat aquitain. Ainsi, en réponse à cet appel d'offres, une campagne de suivi des performances a été réalisée. Des tests d'étanchéité à l'air à différentes phases de la construction ont permis de valider l'obtention du label BBC Effinergie.

Labels, certifications, référentiels et démarches

Le label obtenu par les logements est BBC Effinergie.



© Patrick Arotcharen Architecture
Vincent Monthiers et Mathieu Choiselat

FICHE TECHNIQUE

Type de bâtiment

Maisons groupées privées

Maître d'ouvrage

LE COL

Architecte

Agence Patrick Arotcharen

Bureau d'études thermiques

Climelec

AMO et bureau études environnement

NOBATEK/INEF4

Réalisation du lot bois

Egoïn

Partenaires

Région Nouvelle-Aquitaine

Direction Régionale de l'ADEME Nouvelle-Aquitaine

Surface

985 m² SHON

Coût de construction (hors VRD)

1,2M€ HT

Année de construction

2010

Ce label est adapté aux constructions neuves et a pour objectif d'obtenir :

- Une consommation maximale en énergie primaire fixée à 50 kWh/(m².an) pour les constructions résidentielles neuves
- Un coefficient d'étanchéité à l'air (Q4) inférieur à 0,6 m³/h.m². Cette valeur quantifie le débit de fuite traversant l'enveloppe, exprimée en m³/h.m², sous un écart de pression de 4 Pa conformément à la RT 2005.

La consommation énergétique totale (Cep) étant de 39,56 kWh/(m².an) et les moyennes obtenues des coefficients d'étanchéité à l'air étant de 0.43 m³/h.m² pour l'îlot 5 et 0.52 m³/h.m² pour l'îlot 13, les logements ont pu être certifiés.

La réglementation appliquée était la RT 2005.

Solutions mises en œuvre

Enveloppe

Afin de limiter les pertes thermiques par la toiture, les plafonds sont isolés avec 30 cm de la laine minérale et 5cm laine de roche. Pour pallier à la faible inertie de l'ossature bois, des matériaux à changement de phase (MCP) ont été mis en œuvre. Les MCP permettent donc de stocker la chaleur à partir d'une certaine température en fonction de leur température de fusion. Lorsque la température de l'air en contact avec la plaque de MCP dépasse la température de fusion du MCP, il fusionne (se liquéfie) et emmagasine cette chaleur permettant ainsi d'obtenir des températures inférieures à la température de fusion du MCP..

La toiture et le balcon servent de **casquette** au bâtiment. Ils sont dimensionnés pour protéger des rayons du soleil en été et profiter des apports solaires en hiver.

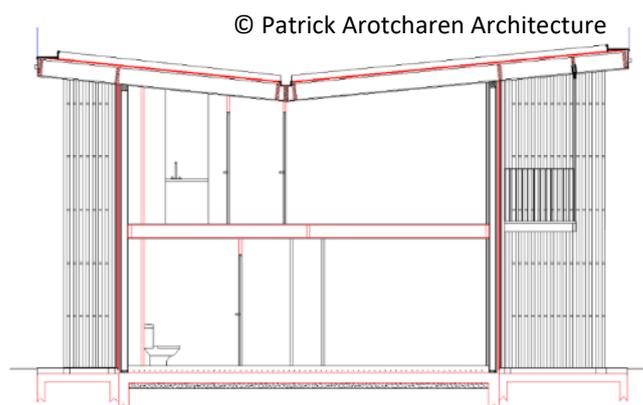


Figure 130 : Vue en coupe du bâtiment

Systemes énergétiques

Le renouvellement de l'air est assuré par une **ventilation simple flux hygroréglable**.

Les logements sont munis d'équipements techniques tels qu'une chaudière gaz à condensation de 14 kW, un plancher chauffant en RDC et des radiateurs en R+1 munis de robinets thermostatiques.

Un système de **surventilation nocturne** a aussi été mis en place. Il se compose d'une extraction spécifique (caisson dédié) et d'une entrée additionnelle dans chaque chambre. Un thermostat de commande permet de piloter l'installation lorsque la température ambiante dépasse 23 °C :

- Le système est à l'arrêt entre le 15 octobre et le 15 juin
- Le fonctionnement est automatique entre le 15 juin et le 15 octobre
- Une position arrêt forcée peut aussi être implémentée par l'utilisateur

Cette surventilation couplée avec les MCP permet de stocker la chaleur accumulée au sein des MCP afin qu'ils puissent recristalliser (se solidifier).

Stratégies d'implication de l'usager

Afin de maîtriser les dépenses énergétiques après la livraison, un guide de sensibilisation a été remis aux futurs usagers des bâtiments et 5 logements sur 15 ont été instrumentés. Le rôle des usagers est primordial dans un bâtiment bioclimatique. Le guide ayant été fourni aux locataires renseigne sur :

- La bonne utilisation des volets et des fenêtres.
- Les indications à respecter concernant les consignes de chauffage.
- Le réglage de la VMC.
- Les habitudes quotidiennes permettant d'économiser de l'énergie.

Retours d'expérience

Le bailleur social a eu recours à une assistance à maîtrise d'ouvrage environnementale sur l'ensemble de l'opération qui a mené un suivi de chantier approfondi.

La maîtrise d'ouvrage a voulu favoriser une utilisation vertueuse des logements par leurs occupants et s'est ainsi soucieuse du retour d'expérience des usagers.

Retour d'expérience sur le ressenti des usagers

Un questionnaire a été soumis aux usagers afin de déterminer leur utilisation et leur perception du logement. Il en est ressorti un bilan assez positif montrant une différence de ressenti par chacun des occupants. Les notes du questionnaire variaient du simple au double. Une différence de température de l'ordre de 2°C a été constatée entre le RDC et le R+1. Le RDC est qualifié « d'agréable » en hiver alors que le R+1 est assez frais. Il a été noté que de l'air passe sous la porte d'entrée et au niveau de boîtiers de sur-ventilation nocturne. Les joints des menuiseries sont usés ce qui crée des courants d'air. En été, il a été difficile de rafraîchir l'intérieur de la maison conservant bien la chaleur. Pourtant les relevés ont montré des températures plutôt confortables : en été, la température intérieure ne dépasse quasiment jamais les 26°C.

En hiver, une différence de température entre le séjour et la chambre oscillant entre 2°C et 4°C a été indiquée. Il est probable que cette différence provienne du surdimensionnement des entrées d'air. Le débit réglementaire pour une chambre est de 18 à 22m³/h or les entrées d'air acoustiques à elles seules ont un débit de 45 m³/h .

La plupart des occupants estime ne pas avoir été gênée par le soleil direct et avoir utilisé les volets battants pour réguler les apports de lumière lorsque le besoin était ressenti. Par contre, uniquement la moitié des occupants affirme avoir utilisé les volets battants pour minimiser les pertes de chaleur le soir en hiver.

Les occupants déclarent avoir utilisé le système de chauffage entre novembre et avril sans besoin d'ajouter un chauffage d'appoint (sauf dans la salle de bain pour les jeunes enfants).

Le système de surventilation nocturne n'a pas ou a très peu été utilisé, car il a été qualifié de « très bruyant » par les occupants.

Retour d'expérience sur le chantier

Afin d'obtenir un retour d'expérience du chantier, des fiches de suivi ont été réalisées régulièrement. Une réunion en début de chantier a été menée pour informer les intervenants des particularités du procédé constructif. Les différents corps d'état affirment que la coordination s'est bien passée avec tous les intervenants. Chaque semaine des réunions étaient organisées afin de trouver des solutions aux difficultés rencontrées lors de la phase chantier.

Concernant le lot VRD, l'avant-projet n'a pas été ressenti comme assez finalisé. Les maisons étaient à un niveau trop bas par rapport aux réseaux existants et rendaient très difficiles :

- Le respect des pentes réglementaires.
- Les contraintes handicapées.
- La collecte principale des EP.
- La récupération d'eau.
- Le coulage des trottoirs.

Concernant le lot courant faible / courant fort des problèmes au niveau des réservations dans la poutre centrale ont été rencontrés. L'idéal aurait été d'avoir un faux plafond plus important pour passer les réseaux sous la poutre principale, mais celle-ci n'aurait pas été visible.

Un peu de préparation supplémentaire entre les différents corps d'état aurait été préférable selon les intervenants, car un tel type de chantier demande de l'attention. Néanmoins, il n'a été vu aucun inconvénient à renouveler l'opération.

Références : [152,153]

MAISON EN PIN MARITIME, TAILLAN-MEDOC



Démarche exemplaire

L'objectif de ce projet était de concevoir des logements sociaux à partir de Pin maritime, à basse consommation d'énergie et adaptés au climat chaud et humide du Sud-Ouest de la France tout en démontrant la faisabilité d'une telle opération.

Le Pin maritime, très présent dans le Sud-Ouest de la France, est utilisé au maximum pour l'ossature bois, les panneaux, les matériaux fibreux d'isolation et les menuiseries en privilégiant les industries locales.

La faisabilité d'une telle opération prend en compte le confort thermique (été et hiver), la maîtrise des coûts du logement social : le surcoût ne doit pas excéder 10% à 15% du coût classique et la reproductibilité des techniques et moyens utilisés dans la construction des logements.

Un autre objectif est le faible impact environnemental des matériaux concernant : les composants, leur transport, leur mise en œuvre, leur entretien et leur durée de vie.

Par la suite, les maisons ont été suivies en exploitation sur un an avec une enquête sur le ressenti des habitants.

Labels, certifications, référentiels et démarches

Le projet souhaitait se rapprocher du standard allemand Passivhaus dont les besoins de chauffage ne doivent pas dépasser 15 kWh/m²/an. Par le décret du 15 mai 2007 et les travaux de l'association Effinergie, le label BBC (Bâtiment Basse Consommation) est fixé à une consommation d'énergie totale de 50 kWh/m²/an. Pour le BBC, la consommation a été calculée avec la méthode réglementaire RT 2005. Le projet visait donc présenter une consommation d'énergie proche de 50 kWh/m²/an qui correspond aux objectifs de performance de la RT 2012 actuellement en vigueur.

FICHE TECHNIQUE

Partenaires

FCBA (Coordinateur Jean-Luc Kouyoumji), Gironde Habitat (OPAC), La Résinière (Constructeur), Laboratoire TREFLE, STEICO, Ecole d'Architecture et de paysage de Bordeaux

Financeurs

FUI-Ministère de l'Industrie, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Conseil régional d'Aquitaine

Partenaires contributeurs

Smurfit Kappa Rol Pin, Menuiseries Grégoire, Isover, le Cluster Above, SOMFY, ALDES

Réalisation du lot bois

La Résinière

Surface habitable

87 m² (logement 10) et 86 m² (logement 12)

Année de livraison

2009

Localisation

Taillan-Médoc, Gironde, France



© Christian Maintrot

Solutions mises en œuvre

Le projet concernait 2 logements bois mitoyens qui ont été équipés de différentes solutions afin de pouvoir les comparer à deux autres logements mitoyens témoins. Les bâtiments « tests » ont été construits dans les mêmes conditions d'orientation et d'aménagement que les témoins.

Le premier logement bois est appelé le logement MOB. Il possède :

- Une ossature 100 % bois
- Un **puits canadien aéraulique** qui permet de faire usage de l'inertie du sol relié à une **VMC double flux**

Le second logement bois est appelé le logement MAS. Il possède :

- Une grande inertie grâce à un plancher intermédiaire massif en Pin maritime lamellé cloué et un doublage des plaques de plâtre à l'étage permettant d'apporter une inertie supplémentaire comparativement au logement MOB
- Une optimisation des menuiseries via des volets de ventilation favorisant l'utilisation d'une **surventilation naturelle nocturne**
- Une **ventilation double flux**

Les murs des deux logements possèdent un **excellent niveau d'isolation** dont le coefficient de déperdition thermique est égal à $0,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ contre $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ en moyenne pour un mur en béton classique d'épaisseur 35cm [154]. Ci-dessous une coupe des deux maisons illustre la composition des parois.

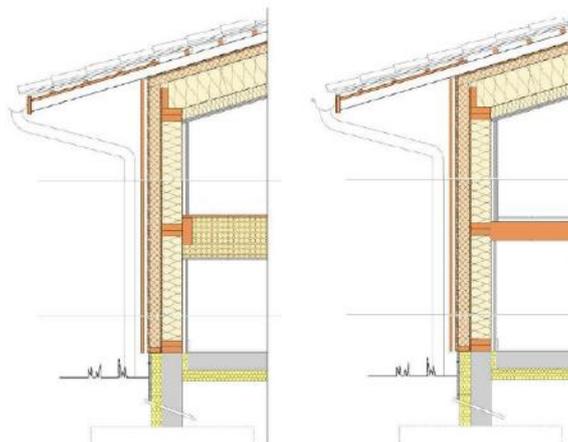


Figure 131 : MOB à gauche et MAS à droite © Christian Maintrot

Dans le logement MOB, la **ventilation double flux équipée d'un échangeur à rendement de 89%** permet de réduire les consommations de chauffage de 35 à 40% en hiver. Équipée d'un **puits canadien**, l'air neuf entrant est ainsi réchauffé en hiver et rafraîchi en été grâce à la forte inertie de la terre. Ce système a deux commandes de pilotage principales. La première impose à l'air extrait de passer par l'échangeur de la ventilation double flux, c'est le mode automatique. La seconde est manuelle et nécessite l'activation du système by-pass par l'occupant. Ainsi l'air n'est plus forcé de passer par l'échangeur et peut passer par un autre conduit dévié. Ce système évite le réchauffement de l'air neuf par l'air vicié en été.



Figure 132 : Puits canadien

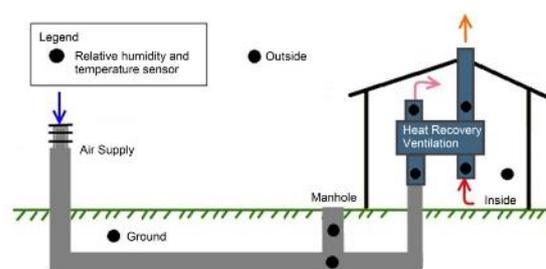


Figure 133 : Schéma du puits canadien et des capteurs de suivi installés

Dans le logement MAS, la **ventilation naturelle nocturne** en été permet d'avoir une température maximale estivale de 28°C. Des volets de ventilation permettent la ventilation sans intrusion extérieure.



Figure 134 : Photos des volets de ventilation naturelle
© Christian Maintrot

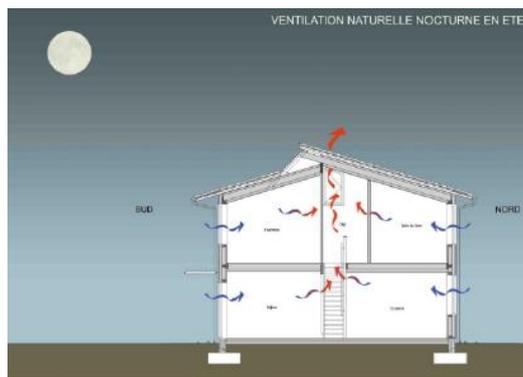


Figure 135 : Schéma de la surventilation nocturne
© Christian Maintrot

Le chauffage est assuré par des panneaux rayonnants électriques. D'après le calcul RT les consommations de chauffage sont de 15,5 et de 18 kWh/(m²SHON.an) en énergie primaire soit un besoin de chauffage de 6 et 7 kWh/(m²SHON.an) respectivement pour le logement MAS et le logement MOB. Ces résultats sont très encourageants, car malgré un système de chauffage peu innovant, les performances énergétiques des logements sont très élevées démontrant d'un bon niveau d'isolation et d'une architecture optimisée.

L'eau chaude sanitaire est obtenue grâce à des **capteurs solaires thermiques** d'une surface de 4 m² et un ballon de stockage de 282 litres ayant un appoint électrique. D'après un calcul RT ce système permet de produire 1410 kWh/an d'eau chaude soit 71% des besoins d'ECS.

Des casquettes permettent de protéger les bâtiments des rayons du soleil en été et ainsi éviter la surchauffe au sein des logements. **Des panneaux photovoltaïques** positionnés sur les casquettes permettent d'assurer les besoins en électricité plutôt faibles des deux bâtiments. Leur consommation en énergie primaire (Cep) est inférieure à la consommation en énergie primaire BBC 2005, mais aussi à celle du label Effinergie : 45 kWhep/ (m² SHON.an).

Des **stratégies d'implication de l'utilisateur** ont notamment été mises en place concernant : l'ouverture des fenêtres pour la surventilation nocturne et une journée de sensibilisation des usagers au logement et à son fonctionnement une fois construit. Pour le logement MAS, l'implication de l'utilisateur a joué un rôle important concernant la ventilation naturelle ce qui a permis de diminuer la température intérieure lors de fortes chaleurs.



Figure 136 : Casquettes solaires photovoltaïques

Retours d'expérience [155]

Les objectifs en termes de consommation de chauffage ont été atteints pour les deux logements bois malgré une consigne réelle supérieure à 19°C pour l'un des deux logements avec une moyenne à 20.2 °C. La consommation de chauffage annuelle mesurée était alors de 2 à 3 fois moins importante que pour les logements témoins.

En été, le confort thermique estival au sein des habitats bois est équivalent voire meilleur que pour des bâtiments témoins en maçonnerie grâce à l'architecture bioclimatique et à aux solutions adéquates :

- La température du logement MOB, équipé du puits canadien, est supérieure à 28°C seulement 1% du temps. Les occupants sont satisfaits du confort estival dans le logement. Ils ont le réflexe de fermer fenêtres et volets durant la journée en période caniculaire et ressentent la fraîcheur du puits canadien de manière très positive. La température intérieure est généralement située dans la zone de confort thermique et le taux d'humidité relative est plutôt correct. La ventilation nocturne fonctionne convenablement et permet d'évacuer le surplus de chaleur.
- La température du logement MAS, équipé de volets de ventilation, est supérieure à 28°C près de 10% du temps : une enquête auprès des usagers indique une ouverture des fenêtres de jour comme de nuit. Les occupants sont alors satisfaits du confort estival sauf durant les périodes caniculaires. Ils laissent souvent les volets et les fenêtres ouverts durant toute journée. L'ouverture des différentes menuiseries extérieures crée un courant d'air ce qui explique un inconfort très marqué durant la journée : la température intérieure suit la température extérieure. En 2011 suite à des recommandations ils ont été plus vigilants, mais un dysfonctionnement de la ventilation double flux les a contraints à continuer l'ouverture des fenêtres même en journée. La fréquence des surchauffes reste faible est donc acceptable. Le taux d'humidité relative et la température intérieure fluctuent selon les conditions extérieures. La ventilation naturelle fonctionne très bien : Le bâtiment s'assèche très rapidement durant la journée et décharge efficacement la chaleur durant la nuit.
- Les logements témoins ont une faible amplitude de température au sein des logements alors qu'elle est plutôt forte dans les logements bois. Ceci est dû à l'inertie plus faible typique en construction bois. Le rafraîchissement nocturne est alors plus efficace dans les logements bois grâce notamment au couplage d'une inertie faible à modérée et à la conception pour favoriser la surventilation nocturne. La ventilation traversante des deux logements bois permet alors d'évacuer facilement les calories et de rafraîchir rapidement les bâtiments en période nocturne ce qui n'est pas le cas des logements témoins.

Le puits canadien du logement MOB a démontré une certaine efficacité hiver comme été. Une étude fine a été menée sur le couplage du puits canadien (PC) et de la ventilation mécanique contrôlée double flux (VMC) du logement MOB. Les résultats indiquent que le puits peut atteindre des coefficients de performances de 11 en hiver et de 8 en été :

- En été, la température arrivant dans la VMC et provenant du PC se situe aux alentours de 23°C avec une température extérieure pouvant atteindre les 37°C.
- En hiver, le puits permet d'avoir un air réchauffé autour de 6°C alors que la température extérieure se situe autour de 0°C. Le couplage avec la VMC double flux permet alors d'accroître ce gain de température d'environ 9°C. Cela démontre que la VMC fonctionne efficacement.

Néanmoins le potentiel du puits est mal exploité. Un dysfonctionnement du by-pass permettant de permuter l'arrivée d'air neuf (AN) dans la VMC entre l'air extérieur ou le PC a été mis en évidence. L'air neuf provient donc toujours du PC qui n'est pourtant pas toujours utile surtout en mi-saison. Le système présente un autre by-pass qui permet de passer la VMC double flux en simple flux afin de ne pas préchauffer l'air. Celui-ci doit être activé manuellement. Néanmoins le mode d'activation n'est pas intuitif et l'utilisateur bien qu'informé ne pensait pas à enclencher ce by-pass. Ces deux éléments mettent en évidence le besoin d'un contrôle automatisé et poussé des puits canadiens et de leur couplage à la ventilation. Sans cela le potentiel des systèmes risque de ne pas être exploité.

DAVIES ALPINE HOUSE : SERRE BOTANIQUE, LONDRES



© Oast House Archive

Démarche exemplaire

La serre *Davies Alpine House* s'inspire du système de ventilation passive par effet cheminée des termitières afin de refroidir l'édifice. Cette serre alpine abrite des plantes de montagnes vivant sous des climats froids et secs. Dans la lignée de l'Eastgate Building à Harare au Zimbabwe, le bâtiment est passivement refroidi et ventilé. Le système de régulation thermique diffère au niveau de la structure. En sous-sol de la serre, un « labyrinthe thermique » permet de refroidir l'air avant qu'il soit injecté dans la serre.

Labels, certifications, référentiels et démarches

Ce bâtiment relève de la démarche bioclimatique et du biomimétisme. Il ne relève d'aucune certification. Il a reçu les prix suivants : Civic Trust Award 2008, RIBA Award 2006, (Commendation/Museums & Galleries Category).

FICHE TECHNIQUE

Maitrise d'ouvrage

Jardin botanique de Kew (Angleterre)

Maitrise d'œuvre

Wilkinson Eyre, Dewhurst MacFarlane, Atelier Ten

Programme

Serre botanique ouverte au public

Système de ventilation bioinspiré

Ventilation des termitières

Surface

70 m²

Coût de construction

800 000 £ soit 920 000 € (13 115 €/m²)

Localisation

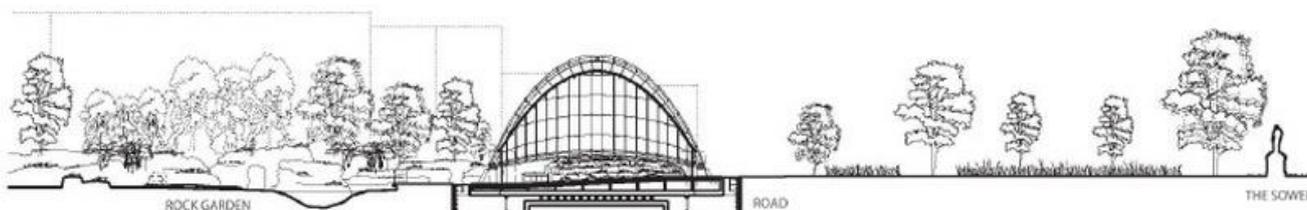
Jardin Kew, Londres, Angleterre



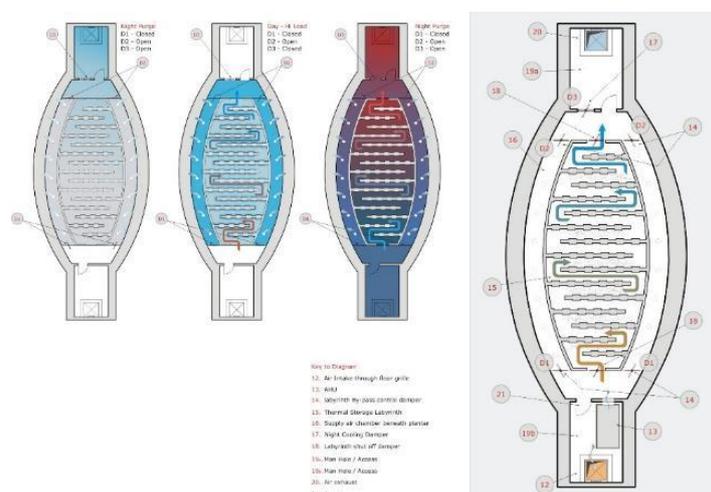
CC-BY-SA-4.0

Solutions mises en œuvre

Le système permet de refroidir passivement l'intérieur grâce à un sous-sol à forte inertie thermique et un taux de renouvellement d'air élevé tout en conservant un système d'enveloppe en verre. Le sous-sol en béton assure également l'ancrage et les fondations de la structure de la serre. La nuit, le renouvellement d'air est plus important afin d'évacuer la chaleur accumulée durant la journée. Cette stratégie permet également de limiter l'inconfort thermique durant la journée par une surventilation. L'effet de cheminée est également renforcé par la hauteur de la serre générée par les doubles arcs. En complément, les concepteurs ont intégré un système d'enveloppe textile déployable afin d'éviter l'échauffement et surexposition des plantes à l'intérieur de la serre.



Section du bâtiment © Wilkinson Eyre Architect

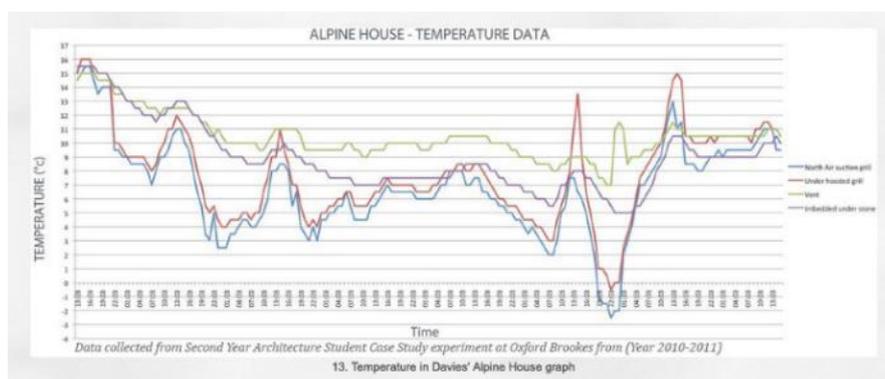


Plan du sous-sol (labyrinthe thermique) et parcours de l'air © Atelier Ten

Retours d'expérience

Le graphique ci-dessous examine dans quelle mesure le système de conception et de ventilation permet de maintenir les plantes alpines à une température avoisinant les 10°C (courbe violette).

Lorsque les écarts de température sont importants entre l'intérieur et l'extérieur (par exemple en été), la température à l'intérieur de la serre peut atteindre jusqu'à 15°C. Le reste de l'année, la température avoisine les 10°C. En hiver la température descend ponctuellement jusqu'à 5°C au plus bas.



Températures enregistrées au sein du bâtiment – année 2010 à 2011. Source [1]

HYGROSKIN (ENVELOPPE BOIS ADAPTATIVE), ORLEANS



© Oliver David Kreig

Démarche exemplaire

Le projet HygroSkin - Meteorosensitive Pavilion – développé par le laboratoire ICD à l'Université de Stuttgart, explore un mode d'architecture sensible et adaptable aux variables climatiques.

L'instabilité dimensionnelle de bois par rapport à la teneur en humidité est utilisée pour construire une enveloppe adaptative qui s'ouvre et se ferme de manière autonome. Ce sont les propriétés hygrométriques du bois qui permettent l'adaptation de l'enveloppe, n'exigeant aucun apport d'énergie ou contrôle mécanique.

Solutions mises en œuvre

Le modèle d'inspiration est ici le cône du Pin (le fruit de l'arbre) dont les écailles renferment les graines devant être protégées de l'eau sous toutes ses formes (humidité, eau liquide). Les écailles du cône, composées d'un matériau multicouche aux propriétés différentes sont sensibles aux variations d'humidité et se gonflent au contact de l'eau. Le gonflement entraîne ainsi la fermeture des écailles.

La transposition de la biologie vers l'architecture se matérialise par le développement d'une façade en bois composite qui s'adapte aux variations climatiques. L'instabilité mécanique du matériau activée par l'humidité ambiante permet une ouverture et fermeture passive.

Cette enveloppe n'a pas encore été testée dans le cadre d'une façade de bâtiment, elle reste pour le moment à l'état de prototype. Le projet Ecotone à Arcueil, lauréat des Appels à Projets Imaginer le Grand Paris 2, il intégrera un module en façade à titre exploratoire [3]

Retours d'expérience

Le pavillon fonctionne lorsque les variations d'humidité sont importantes. Lorsqu'exposé à Stuttgart avant d'être transporté jusqu'au FRAC, le pavillon a subi peu de variation ; face à un taux d'humidité relative plutôt stable, les ouvertures en bois composite ne se sont pas largement ouvertes, rendant la démonstration peu visuelle

L'utilisateur ne peut moduler l'ouverture et fermeture des écailles, le fonctionnement de la façade est totalement passif.

FICHE TECHNIQUE

Maitrise d'ouvrage

FRAC Centre Val de Loire

Maitrise d'œuvre

Laboratoire de recherche ICD – Institute for cComputational Ddesign and construction – Université de Stuttgart

Programme

Pavillon / démonstrateur

Surface

24 m²

Montant des travaux

10 000 à 20 000 €

Soit 400 à 800 € / m²

Système bio-inspiré

Reproduction d'un matériau multicouche aux propriétés hygrosopiques (cône du pin)

Localisation

Actuellement exposé à Orléans, Loiret, France (conçu à Stuttgart, Allemagne)



Section du bâtiment © ICD / Université de

VIII

CONCLUSION
&
PERSPECTIVES



Ce guide met en lumière des solutions qui visent à réduire l'usage des équipements techniques tout en permettant d'atteindre les exigences de performance et de confort fixées lors de la conception du bâtiment vis-à-vis du chauffage, du rafraîchissement, de la ventilation et de l'éclairage. Cette limitation de l'usage des équipements va dans le sens d'une simplification de la fabrication, de la mise en œuvre, de l'usage et de l'entretien du bâtiment et donc d'une réduction des coûts et impacts environnementaux associés.

Les solutions présentées s'inscrivent dans une recherche de frugalité qu'il semble pertinent d'associer à une démarche de conception bioclimatique. Cette dernière permet d'obtenir un bâtiment adapté à son contexte avec pour objectif de réduire ses besoins quels qu'ils soient. Ce sont les besoins résiduels qui sont alors satisfaits par les solutions proposées. Le guide s'intéresse également au biomimétisme qui inspire la recherche de frugalité. Les espèces vivantes, telles que végétales ou animales, ont su s'adapter pour tirer parti du milieu dans lequel elles évoluent. Les stratégies qu'elles appliquent pour répondre à leurs besoins vitaux peuvent alimenter les réflexions visant à concevoir des bâtiments performants nécessitant peu de ressources pour leur fonctionnement.

Ce guide propose un large aperçu des possibilités offertes aux concepteurs pour mettre en place une conception efficiente en se concentrant uniquement sur des solutions applicables dès aujourd'hui. Celles-ci font l'objet d'un retour d'expérience suffisant qui est présenté au travers des fiches du guide. Il ne s'agit donc pas d'être exhaustif dans le recensement des solutions applicables et les concepteurs pourront identifier d'autres stratégies en cours de développement qui dans quelques années seront tout à fait opérationnelles. Au cours du recensement des solutions limitant l'usage des équipements techniques, des solutions très innovantes et prometteuses sont apparues, comme les lames composées de deux essences de bois imaginées par les équipes de l'ETH Zürich et l'EMPA. Grâce à leur composition, ces lames se courbent lors d'un changement d'humidité relative de l'air (Figure 137). Ces lames pourraient un jour être employées pour réaliser des systèmes de protection solaire ou de ventilation dont le fonctionnement ne nécessite aucune consommation d'énergie.

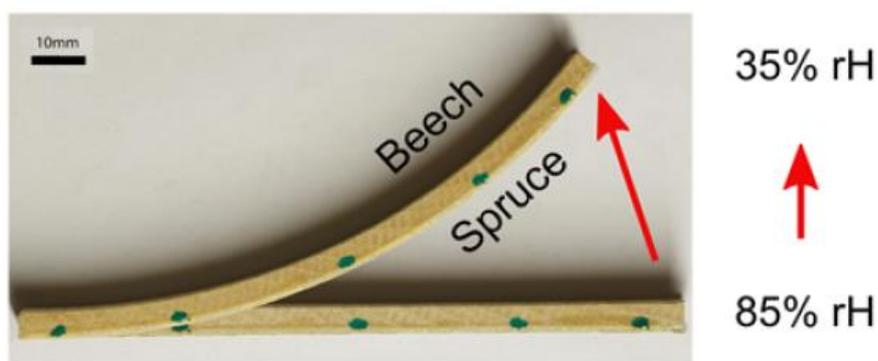


Figure 137 : Déformation d'une lame bimatériau après un changement d'humidité relative de l'air ; [156]

Le bois s'avère particulièrement bien adapté à la démarche de conception frugale défendue dans ce guide. L'usage du système constructif à ossature bois par exemple permet de réaliser des enveloppes performantes intégrant au sein du système porteur une forte épaisseur d'isolant. Les besoins en chauffage et rafraîchissement étant limités il devient d'autant plus facile de limiter l'usage des équipements techniques. Le système constructif poteau-poutre va quant à lui permettre de créer de grandes ouvertures favorables à la diffusion de la lumière naturelle limitant ainsi le besoin en éclairage artificiel. Chaque système constructif bois présente ses spécificités et il convient de les utiliser là où leurs avantages seront les plus pertinents. Sur chaque fiche un focus porte sur l'intégration des solutions aux ouvrages bois. Ces informations peuvent guider le concepteur dans le choix de la solution la plus adaptée au système constructif utilisé. Construire en bois des bâtiments performants et confortables tout en limitant l'usage des équipements est aujourd'hui possible. Ce guide vise à fournir au concepteur et au maître d'ouvrage les clés d'une conception frugale qui amène à réduire de manière significative les coûts financiers et environnementaux liés à l'usage des équipements techniques.

IX

SOURCES
&
REFERENCES



- [1] J.-C. Seve, J. Söderlind, Construire en bois, un choix durable, Les Essentiels Du Bois. (2006).
- [2] D. Bruneau, P. Lagièrre, S. Armand, G. Bourgogne, J. Bodennec, Analyse des conditions de confort d'un bâtiment solaire à énergie positive : la maison « Napevomo » au Solar Decathlon Europe 2010, in: 1ère Conférence Fr. Sur Les Énergies Renouvelables, Damas, 2010.
- [3] S. Armand-Decker, D. Bruneau, P. Lagièrre, J. Lopez, New passive solutions for summer comfort and timber housing in French Atlantic climate, in: C. Baumgarten, M. Theumer, L. Adam, K. Gerhardt, V. Sariri (Eds.), 15TH Int. Passiv. House Conf., Innsbruck, 2011: pp. 171–176.
- [4] O. Irulegi, L. Torres, A. Serra, I. Mendizabal, R. Hernández, The Ekihouse: An energy self-sufficient house based on passive design strategies, *Energy Build.* 83 (2014) 57–69. doi:10.1016/j.enbuild.2014.03.077.
- [5] B. Serra Soriano, P.V. Gimeno, a. D. Segura, R.M. de la Maza, Assembling sustainable ideas: The construction process of the proposal SMLsystem at the Solar Decathlon Europe 2012, *Energy Build.* 83 (2014) 186–194. doi:10.1016/j.enbuild.2014.03.075.
- [6] R. Pataky, Áts, Z. Áts-Leskó, O. Birtalan, Constructional considerations for the mobile Plus-Energy House, *Energy Build.* 83 (2014) 195–208. doi:10.1016/j.enbuild.2014.07.015.
- [7] C. Tonelli, M. Grimaudo, Timber buildings and thermal inertia: Open scientific problems for summer behavior in Mediterranean climate, *Energy Build.* 83 (2014) 89–95. doi:10.1016/j.enbuild.2013.12.063.
- [8] S. Armand-Decker, C. Abadie, Le bois au cœur du concours Solar Décathlon, in: Conférence Des Bois - Xylofutur - Bordeaux Sci. Agro, 2015.
- [9] G. Bescher, M. Cochet, Au fil du bois : L'énergie grise en question, 2013. https://www.fiabitat.com/doctypes/CREABOIS_energie_grise_en_question_2013.pdf.
- [10] ICEB, Le bâtiment frugal, 2016.
- [11] A. Bornarel, D. Gauzin-Müller, P. Madec, Manifeste pour une frugalité heureuse et créative, (n.d.). <https://www.frugalite.org/fr/le-manifeste.html>.
- [12] P.-A. Lévêque, C. Chabot, Habitat Low-Tech : Un projet Low-Tech Lab, 2019. <https://lowtechlab.org/assets/files/rapport-experimentation-habitat-low-tech-low-tech-lab.pdf>.
- [13] ISO 18458:2015 - Biomimetics — Terminology, concepts and methodology, 2015.
- [14] Ceebios, Synthèse Habitat Bio-inspiré, 2018.
- [15] COST RESTORE, (n.d.). <https://www.eurestore.eu/> (accessed September 28, 2020).
- [16] Paris Regional Enterprises, Karim Network, Introduction to Nature Inspired Solutions, (2014) 29.
- [17] L. Badarnah, A Biophysical Framework of Heat Regulation Strategies for the Design of Biomimetic Building Envelopes, in: *Procedia Eng.*, 2015: pp. 1225–1235. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.474.
- [18] J.F.V. Vincent, O.A. Bogatyreva, N.R. Bogatyrev, A. Bowyer, A.K. Pahl, Biomimetics: Its practice and theory, *J. R. Soc. Interface.* 3 (2006) 471–482. doi:10.1098/rsif.2006.0127.
- [19] Espaciel, Reflecteur, <https://www.Espaciel.Com/Fr/>. (n.d.).
- [20] Energie+, Renforcer l'éclairage naturel à l'intérieur du bâtiment, *Energieplus-Lesite.Be.* (2007). <https://energieplus-lesite.be/concevoir/fenestres2/position-et-la-dimension-fenetre/choisir-la-fenetre-comme-capteur-de-lumiere-naturelle-d1/>.
- [21] Ž. Kristl, A. Krainer, Light wells in residential building as a complementary daylight source, *Sol. Energy.* 65 (1999) 197–206. doi:10.1016/S0038-092X(98)00127-3.
- [22] G. Courret, B. Paule, Dispositifs d'éclairage naturel, *Tech. l'Ingénieur.* 33 (2019).
- [23] FFB, La lumière sort du puits !, *Bâtimentiers N° 10 - 2008 | Innov.* (2008). https://www.ffbatiment.fr/federation-francaise-du-batiment/laffb/mediatheque/batimetiers.html?ID_ARTICLE=631 (accessed March 20, 2020).
- [24] Energie+, Coefficient de réflexion des parois, *Energieplus-Lesite.Be.* (2007). <https://energieplus-lesite.be/donnees/eclairage4/coefficient-de-reflexion-des-parois/> (accessed June 22, 2020).
- [25] A. Kontadakis, A. Tsangrassoulis, L. Doulos, S. Zerefos, A review of light shelf designs for daylight environments, *Sustain.* 10 (2017). doi:10.3390/su10010071.
- [26] F. Aloui, Rôle des absorbeurs UV inorganiques sur la photostabilisation des systèmes bois-finition transparente, 2006.
- [27] CETE Lyon, Mémento de conception et de mise en œuvre à l'attention des concepteurs, artisans et entreprises du bâtiment, 2020. <https://media.xpair.com/pdf/economies-energie/Carnet-Construction-ossature-bois.pdf>.
- [28] M. Pawlyn, Biomimicry in Architecture, 2019. doi:10.4324/9780429346774.
- [29] F. Bouvier, G. Courret, B. Paule, Éclairage naturel, *Tech. l'Ingénieur.* (2008).
- [30] Y. SUTTER, B. PAULE, F. BOUVIER, G. COURRET, Outils et méthodes pour l'éclairage naturel, *Tech. l'Ingénieur.* (2020).
- [31] Vraiment Beau, Les ventilateurs de plafond, *Vraiment Beau.* (n.d.). <https://www.vraimentbeau.com/guide/guide-pratique/les-ventilateurs-de-plafond-sont-bien-preferables-a-la-climatisation/>.
- [32] Axelair ventilation, Brasseurs d'air Locaux tertiaires & industriels, 2017.
- [33] Xpair, Brasseur d'air, XPair. (n.d.). <https://www.xpair.com/lexique/definition/brasseurs-air.htm>.
- [34] Ventilateur.com, Comment choisir son ventilateur de plafond ?, *Ventilateur.Com.* (n.d.). <http://ventilateurplafond.com/choisir-taille-de-ventilateur-plafond/>.
- [35] Travaux.com, Prix de l'installation d'un ventilateur de plafond, *Travaux.Com.* (n.d.).

- <https://www.travaux.com/climatisation/guide-des-prix/prix-de-linstallation-dun-ventilateur-de-plafond>.
- [36] Fan Boutique, Fan Boutique, Vent. Vent. En Ligne. (n.d.). <https://www.ventilateurs-plafond.com/>.
- [37] Batirama, Batimat 2019 : le calcul de la RE2020 commence à se préciser, Batirama.Com. (2019). <https://www.batirama.com/article/27496-batimat-2019-le-calcul-de-la-re2020-commence-a-se-preciser.html>.
- [38] Agence Qualité Construction, Envirobat, Confort d'été et réduction des surchauffes - 12 enseignement à connaître, 2019.
- [39] Jean-Pierre Oliva ; Samuel Courgey, La conception bioclimatique, Terre Viva, Techniques de pro, ISSN 2119-3940, 2006.
- [40] Guide Bâtiment Durable, Dispositif | Free-cooling - CC-BY-2, Guid. Bâtiment Durable .Brussels. (2017). <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/types-de-free-cooling.html?IDC=7805>.
- [41] Bruxelles Environnement, Dispositif | Free-cooling, Guid. Bâtiment Durable. (2016). <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/free-cooling.html?IDC=7802> (accessed March 20, 2020).
- [42] Mick Pearce, Eastgate Building Harare, (2019). <http://www.mickpearce.com/Eastgate.html>.
- [43] J. Turner, R. Soar, Beyond Biomimicry: What Termites Can Tell Us about Realizing the Living Building., Digital.Library. (n.d.). adelaide.edu.au.
- [44] Insitu Architecture, NIANING SENEGAL CULTURAL FACILITY, (n.d.). <http://www.insitu-architecture.net/en/projets/12404-church.html#>.
- [45] Nicolas Vernoux-Thélot, Le contexte de l'église de Nianing, Construction21. (2019). <https://www.construction21.org/france/articles/fr/24-le-contexte-de-l-eglise-de-nianing.html>.
- [46] ARENE Île-de-France, ICEB, Ventilation naturelle et mécanique, 2012.
- [47] NOBATEK/INEF4, I2M - TREFLE, SunH20, ERSOL, EFFIPUITS : Retours d'expérience sur les puits canadiens, (2011).
- [48] Cetiati, Les puits canadiens / provençaux, (2008).
- [49] J. Lopez, S. Decker, S. Ginestet, Performance énergétique de puits canadiens : impact du retour d'expérience sur les données d'entrée de la simulation, (2012) 1–10.
- [50] J.-L. Kouyoumji, L. Daquin, P. Lagièrre, C. Maintrot, J.-L. Lajous, J. Knepfler, Maison passive en pin maritime du futur : « Conception et réalisation d'une maison à ossature bois à très faible consommation d'énergie essentiellement réalisée en pin maritime », (2010).
- [51] Bruxelles Environnement, Dispositif - Puits canadien, (2016). <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/choisir.html?IDC=8935>.
- [52] L'ADEME, Puits climatiques, 2012.
- [53] WilkinsonEyre, Royal Botanic Gardens, Kew: Davies Alpine House, (2006). <https://www.wilkinsoneyre.com/projects/royal-botanic-gardens-kew-masterplan>.
- [54] M. Downe, M. Lee, B. Wakefield, C.A. Phung, Davies' Alpine House, (n.d.). <https://daviesalpinehouse.weebly.com/environment.html>.
- [55] Règle de l'Art Grenelle Environnement 2012, Programme PACTE, Rapport de veille sur les technologies émergentes de chauffage, ventilation, climatisation, production d'eau chaude sanitaire, 2012.
- [56] Energie+, Puits canadien, Energieplus-Lesite.Be. (2007). <https://energieplus-lesite.be/techniques/ventilation8/ventilation-hygiene/composants-de-la-ventilation/puits-canadien/>.
- [57] Direction régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement du Limousin, La ventilation dans les bâtiments, 2012. www.objectif.blogspot.com.
- [58] A. Qualitel, Comment reconnaître le type de ventilation que vous avez dans votre logement ?, Assoc. Qual. Pour La Qual. Du Logement. (n.d.). <https://www.qualitel.org/particuliers/conseils/comment-reconnaitre-le-type-de-ventilation-que-vous-avez-dans-votre-logement/>.
- [59] La ventilation naturelle, Eco Habitat. (2015). <https://www.ecohabitation.com/guides/2577/la-ventilation-passive-naturelle/>.
- [60] Bruxelles environnement, Dossier - Assurer le confort respiratoire, (2019). <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/6-concevoir-le-systeme-de-ventilation-naturelle.html?IDC=7980>.
- [61] Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012, Ventilation hybride : Conception et dimensionnement, installation et mise en service, entretien et maintenance, 2015. www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr.
- [62] ECODIS, Aération naturelle, Cat. Kingspan. (n.d.). https://www.ecodis.fr/sites/default/files/documentation/commercial/windcatcher_0.pdf.
- [63] batiweb, Exclusif sur le marché français : WINDCATCHER®, (2017). <https://www.batiweb.com/actualites/publi-redactionnels/exclusif-sur-le-marche-francais-windcatcher-2017-09-11-29926>.
- [64] ATEC, Tourelles de toitures, n.d. <https://www.atecfrance.fr/catalogue-atec-france/ventilateurs/tourelles-toiture-axial.pdf>.
- [65] Lidia Badarnah, Towards the living envelopes: biomimetics for building envelopes, 2012. http://docs.wixstatic.com/ugd/ef2c31_d5e8c9aae836469e99adaa954b607090.pdf.
- [66] EnergiePlus le site, Ventilation hybride, Energ. Plus Le Site. (2015). <https://energieplus-lesite.be/techniques/ventilation8/ventilation-hygiene/systemes-de-ventilation/ventilation-hybride/>.

- [67] Energie+, Ventilation intensive mécanique d'été, Energieplus-Lesite.Be. (2014). <https://energieplus-lesite.be/techniques/ventilation8/ventilation-intensive/ventilation-intensive-mecanique-d-ete/>.
- [68] Roger Cadiergues, Les règlements sanitaires départementaux, n.d.
- [69] Energie+, Ventilation intensive naturelle d'été, Energieplus-Lesite.Be. (2007). <https://energieplus-lesite.be/techniques/ventilation8/ventilation-intensive/ventilation-intensive-naturelle-d-ete/>.
- [70] Fiabitat Scoop, La VMC double flux à la loupe, (n.d.). <https://www.fiabitat.com/series/la-vmc-double-flux-a-la-loupe/>.
- [71] Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012, VMC double flux en habitat individuel, 2015. https://www.programmepacte.fr/sites/default/files/pdf/recommandation-pro-rage-vmc-double-flux-habitat-individuel-neuf-2015-05_0.pdf.
- [72] QuelleEnergie.fr, Quel prix pour l'installation d'une VMC Double Flux ?, QuelleEnergie.Fr. (n.d.). <https://www.quelleenergie.fr/magazine/economies-energie/vmc-double-flux-prix-installation-28099/>.
- [73] EnergiePlus, Ventilation double flux, Energieplus-Lesite.Be. (2007). <https://energieplus-lesite.be/techniques/ventilation8/ventilation-hygiene/systemes-de-ventilation/ventilation-mecanique/ventilation-double-flux/>.
- [74] Règles de l'Art Grenelle environnement 2012, Façade multiple : double peau ventilée naturellement sur l'extérieur, 2014. www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr.
- [75] AFNOR, NF DTU 33.1 P1-1, 2008. <https://norminfo.afnor.org/norme/nf-dtu-331-p1-1/travaux-de-batiment-facades-rideaux-partie-1-1-cahier-des-clauses-techniques-types/81287>.
- [76] Les cahiers techniques du bâtiment, Façade double peau : une conception au cas par cas, Cah. Tech. Du Bâtiment. (2004). <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/facades-double-peau-une-conception-au-cas-par-cas.30757>.
- [77] AFNOR, NF EN 13830, 2015. <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-13830/facades-rideaux-norme-de-produit/article/814311/fa164367>.
- [78] Aurélie Godin Bareille, Guide Pratique – Façades rideaux : Performances, mise en œuvre, entretien et maintenance en application de la norme NF DTU 33.1, CSTB, 2012.
- [79] Fédération Française du Bâtiment, La façade double peau, une solution performante à géométrie variable, Fédération Française Du Bâtiment. (n.d.). https://www.ffbatiment.fr/federation-francaise-du-batiment/laffb/mediatheque/batimetiers.html?ID_ARTICLE=1117.
- [80] EnergiePlus le site, Choisir le facteur solaire (FS), EnergiePlus Le Site. (2007). <https://energieplus-lesite.be/concevoir/fenestres2/choisir-la-protection-solaire/choisir-le-facteur-solaire-fs/>.
- [81] eRT2012, Les coefficients caractérisant une fenêtre, Phys. Du Bâtiment, RT 2012, Therm. Du Bâtiment, Trav. Constr. (2014).
- [82] Julie Nicolas, Des vitrages actifs pour des façades réactives, Le Monit. (2016). <https://www.lemoniteur.fr/article/des-vitrages-actifs-pour-des-facades-reactives.1246084>.
- [83] Serge Berthier, Comment fait le gecko pour marcher au plafond ? A la découverte des nanostructures naturelles, Belin, 2016.
- [84] Breathing skins, Breathing skins, (2016). <https://www.breathingskins.com/>.
- [85] FoxoF, Pourquoi un vitrage dynamique ou à teinte variable, (n.d.). <https://www.foxof.com/pourquoi-un-vitrage-dynamique-intelligent/>.
- [86] Le brise soleil orientable, Habitat. (n.d.). https://www.m-habitat.fr/fermetures-et-brise-soleils/types-de-volets/le-bso-brise-soleil-orientable-4376_A.
- [87] Renson, Protection solaire horizontale, Icarus[®] Sunc.[®]. (n.d.). doi:<https://www.aluservice.be/Assets/Lijsten/AHProductGroups/54/26/586-brochure-sunclips-horizontal.pdf>.
- [88] Brise soleil orientable, Guid. Menuis. (n.d.). <https://www.guidemenuiserie.fr/bso/>.
- [89] One Ocean, Pavilion for EXPO 2012 - DETAIL, Mag. Archit. + Constr. Details. (2012).
- [90] Soma Architecture, Theme Pavilion, (n.d.). [http://www.soma-architecture.com/index.%0Aphp?page=theme_pavilion&parent=2#. %0A](http://www.soma-architecture.com/index.%0Aphp?page=theme_pavilion&parent=2#.%0A).
- [91] EMMANUELLE N'HAUX, A Lyon, le biomimétisme inspire le futur bâtiment du Circ, (2018). <https://www.lemoniteur.fr/article/a-lyon-le-biomimetisme-inspire-le-futur-batiment-du-circ.1953634>.
- [92] Solutionera, Les ombrières pour allier efficacité thermique et confort, Solutionera. (2019). <http://solutionera.com/habitation-ecologique/maison-bioclimatique-chauffage/ombrieres-pour-allier-efficacite-et-confort/>.
- [93] ICEB, Guide ICEB - Le bâtiment frugal, 2016.
- [94] Persienne : excellente solution dans les régions ensoleillées, Guideduvolet.Com. (n.d.). http://www.guide-du-volet.com/types_ouverture/persienne.
- [95] M.M. Ion Visa, Anca Duta, Outdoor performance of a trapeze solar thermal collector for facades integration, Renewable Energy, 2019.
- [96] Etanchéité.info, Etanchéité « Cool roof » pour un bâtiment passif tout en bois, Etanchéité.Info. (2016).

- [97] Facilities Net, Picking A Cool Roof: SRI Index Is Key, (n.d.). <https://www.facilitiesnet.com/roofing/topic/Picking-A-Cool-Roof-SRI-Index-Is-Key--19903>.
- [98] M. Kolokotroni, E. Shittu, T. Santos, L. Ramowski, A. Mollard, K. Rowe, et al., Cool roofs: High tech low cost solution for energy efficiency and thermal comfort in low rise low income houses in high solar radiation countries, *Energy Build.* 176 (2018) 58–70. doi:10.1016/j.enbuild.2018.07.005.
- [99] L. Konopacki, S; Gartland, L; Akbari, H ; Rainer, Demonstration of energy savings of cool roofs, United States, 1998. doi:AC03-76SF00098.
- [100] Soprema, Soprema - fiche technique soprastar flam, (n.d.). <https://www.soprema.fr/fr/product/etancheite/etancheite-cool-roof/soprastar-flam-cool-roof-1>.
- [101] Aximum, Aximum - fiche technique axiroof, (n.d.). <http://solutions.aximum.fr/fr/savoir-faire-de-specialite/produits-du-batiment/produits-bitumineux>.
- [102] Cool roof council, Cool roof council, (n.d.). <https://coolroofcouncil.eu/case-studies-and-references/#section0>.
- [103] Environmental Protection Agency of United State, Using Cool Roofs to Reduce Heat Islands, (n.d.). <https://www.epa.gov/heat-islands/using-cool-roofs-reduce-heat-islands>.
- [104] Serge Berthier, Comment fait le gecko pour marcher au plafond ? A la découverte des nanostructures naturelles, 2016.
- [105] J. Yang, D. Ilamathy Mohan Kumar, A. Pyrgou, A. Chong, M. Santamouris, D. Kolokotsa, et al., Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate, *Sol. Energy.* 173 (2018) 597–609. doi:10.1016/j.solener.2018.08.006.
- [106] Cool roof France, Cool roof France, (n.d.). <https://www.coolroof-france.com/>.
- [107] Nature4Cities, Nature4Cities built a multi-scalar and multi-thematic Nature Based Solutions typology (<https://nbs-explorer.nature4cities-platform.eu/?hl=fr>), (2018). <https://www.nature4cities.eu/post/nature4cities-multi-scalar-and-multi-thematic-nature-based-solutions-typology>.
- [108] Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France), I. Feix, S. Marquet, E. Thibier, Groupe Lecaux impr.), Aménager avec la nature en ville : des idées préconçues à la caractérisation des effets environnementaux sanitaires et économiques, (2017).
- [109] VAD, AQC, Retours d'expériences sur 21 bâtiments performants de la région Rhône-Alpes, V. Aménagement Durable. (2013).
- [110] adivet, Membres de l'association Adivet, (2020). <http://www.adivet.net/association-adivet/adherents.html>.
- [111] Mon Toit Vert, Systèmes de végétalisation Mon Toit Vert by Vertige, (2020). https://www.montoitvert.fr/?gclid=EAlaIqobChMivMzplrlL86QIVxu5RCh0oYwQsEAAYASAAEgLP2vD_BwE.
- [112] D.I.D.E. Déchets, LE PROJET DE « BIOFAÇADES » SYMBIO 2 EST LAURÉAT DU 15 e APPEL À PROJETS DU FONDS UNIQUE INTERMINISTÉRIEL (FUI 15), (2013) 9–10.
- [113] ALE (Agence Locale de l'Energie du Pays de Saint-Brieux), CEP (Conseil en Energie Partagé), Rencontre technique : Implications des utilisateurs, Une étape essentielle dans la performance énergétique des bâtiments, 2015.
- [114] ZEMedS (Rénovation performante d'écoles en climat méditerranéen), Gefosat, A.L. de l'Energie Montpellier, Associer les usagers et la performance énergétique sommaire, 2015.
- [115] Cercle Promodul/INEF4, Améliorer la qualité de vie et le confort des occupants : 5 enseignements à retenir, (2020). <https://cercle-promodul.inef4.org/ameliorer-qualite-vie-confort-occupants-enseignements/>.
- [116] M. Daniel, G. Rivière, N. Couture, Systèmes Interactifs Persuasifs sur les Espaces Publics et Collectifs : Quel rôle pour les Interfaces Tangibles?, IHM 2016 - Actes La 28ieme Conf. Francoph. Sur l'Interaction Homme-Machine. (2016) 221–229. doi:10.1145/3004107.3004131.
- [117] V. Tiefenbeck, L. Goette, K. Degen, V. Tasic, T. Staake, On the effectiveness of real-time feedback: The influence of demographics, attitudes, and personality traits, Final Rep. to Swiss Fed. Off. Energy. (2014).
- [118] Beehave 2030, Des (Green) nudges pour des comportements plus ecoresponsables, (2018). <http://www.beehave2030.fr/des-green-nudges-pour-des-comportements-plus-ecoresponsables>.
- [119] H. Allcott, Social norms and energy conservation, *J. Public Econ.* 95 (2011) 1082–1095. doi:10.1016/j.jpubeco.2011.03.003.
- [120] A. Gustafsson, M. Gyllenswärd, The power-aware cord, in: CHI '05 Ext. Abstr. Hum. Factors Comput. Syst. - CHI '05, ACM Press, New York, New York, USA, 2005: p. 1423. doi:10.1145/1056808.1056932.
- [121] R. Roth, Edito : La lumière naturelle en mouvement, La Lett. d'information Du GIF - Lumiere. (2013).
- [122] AFNOR, Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique - NF EN 15251, 2007.
- [123] J. Wienold, Dynamic daylight glare evaluation, in: Elev. Int. IBPSA Conf. Build. Simul., 2009: pp. 944–951. doi:citeulike-article-id:11069372.
- [124] Z. Rogers, D. Goldman, Daylighting metric development using daylight autonomy calculations in the sensor placement optimization tool, *Archit. Energy Corp.* (2006). <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Daylighting+Metric+Development+Using+Daylight+Autonomy+Calculations+In+the+Sensor+Placement+Optimization+Tool#0>.

- [125] A. Nabil, J. Mardaljevic, Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors, *Energy Build.* 38 (2006) 905–913. doi:10.1016/j.enbuild.2006.03.013.
- [126] F. Maamari, La simulation numérique de l'éclairage, limites et potentialités, 2004.
- [127] A.-M. BERNARD, D. LABAUME, S. BUSEYNE, N. PIOT, J.-L. ROSSO, A. LITVAK, Freevent - Surventilation et confort d'été - Guide de conception, 2018.
- [128] Atlanbois, Présentation Batiment B, 2012. <https://agence-api.ouest-france.fr/live/societe/ori/sd-507d28676074bpresentation-batiment-b-externe-2012-8oct.pdf>.
- [129] Cabinet d'architectes Barré-Lambot, Cabinet d'architectes Barré-Lambot, (n.d.). <http://www.barre-lambot.com/>.
- [130] Céline Galoffre, Un bâtiment en bois en forme de goutte d'eau pour des bureaux, *Batiactu.* (2013). <https://www.batiactu.com/edito/un-batiment-en-bois-en-forme-de-goutte-d-eau-pour--35941.php#5dd2af04c2e9c>.
- [131] Atlanbois, (n.d.). <https://www.atlanbois.com/>.
- [132] Bâtiment B, Prix Natl. La Constr. Bois. (n.d.). <https://www.prixnational-boisconstruction.org/rechercher-un-projet/3828>.
- [133] Enertech, LowCal, 2018. <https://www.construction21.org/france/data/sources/users/10998/180515lowcal-enertech.pdf>.
- [134] gérant du B.A. François BOURMAUD, Associé Fondateur et Damien LAMBERT, Logements collectifs sociaux « passifs » tout bois. Retour d'Expérience, XPair. (2017). https://conseils.xpair.com/actualite_experts/logements-collectifs-sociaux-passifs-tout-bois.htm.
- [135] Ekopolis, "Bois debout" R+5 tout bois certifié passif, Ekopolis. (2016). <https://www.ekopolis.fr/operation-batiment/bois-debout-r5-tout-bois-certifie-passif#target-plus-loin>.
- [136] JACQUES-FRANCK DEGIOANNI, Du vin, du bois, de la terre et des pierres, en pays de Lunel, *Le Monit.* (2013). <https://www.lemoniteur.fr/article/du-vin-du-bois-de-la-terre-et-des-pierres-en-pays-de-lunel.870244>.
- [137] Pascal Gontier, Bâtiment Max Weber, bureaux en bois, Atelier Pascal Gontier. (n.d.). <http://www.pascalgontier.com/?portfolio=batiment-max-weber>.
- [138] Université Paris Nanterre, Le bâtiment Max Weber en images, 2017. (n.d.). <https://www.parisnanterre.fr/presentation/memoires-des-lieux-max-weber-800663.kjsp>.
- [139] Pascal GONTIER - Architecte DPLG - Urbaniste, Bâtiment de bureaux 100 % bois et à ventilation naturelle !, 2017. (n.d.). https://conseils.xpair.com/actualite_experts/batiment-max-weber-pionnier-ventile-naturellement.htm.
- [140] Baitykool, Baitykool, (n.d.). <https://baitykool.com/home.html>.
- [141] Christian Hackel, Construction du groupe scolaire « Résistance » à Montreuil (93), in: Ile de France, 2012. https://www.ekopolis.fr/sites/default/files/MON%2301_Presentation_Projet_Performances_energetiques.pdf.
- [142] Ekopolis, Groupe scolaire Stéphane Hessel - Les Zéfirottes, Ekopolis. (2020). <https://www.ekopolis.fr/operation-batiment/groupe-scolaire-stephane-hessel-les-zefirottes>.
- [143] M'cub Architectes, Groupe Scolaire Stéphane Hessel / Les Zéfirottes Une école dans un jardin..., (2014) 19.
- [144] Fred Smith, Eastgate, Harare, Zimbabwe, Arup J. (n.d.) 24.
- [145] and R.S. Turner, JS, Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building, *Digit. Adelaide.Edu.Au.* (2008). https://www.researchgate.net/publication/255650482_Beyond_biomimicry_What_termites_can_tell_us_about_realizing_the_living_building.
- [146] Mickpearce, Eastgate, (n.d.). <https://www.mickpearce.com/Eastgate.html>.
- [147] C.C. Sophie Trelcat, D.R. Romain Troublé, Système de façade bio-inspiré, *ART BUILD Archit.* (n.d.) 50. https://www.artbuild.eu/sites/default/files/press/hs_29_art_build_hd-compressed.pdf.
- [148] Unanime architectes, Centre de recherche international sur le cancer, (n.d.). <https://www.unanime.fr/projets/centre-de-recherche-international-sur-le-cancer>.
- [149] Stéphanie Borg, Lyon : Avec son futur siège, le Centre international de recherche sur le cancer veut s'affirmer, *La Trib. Auvergne Rhône Alpes.* (2020). <https://acteursdeleconomie.latribune.fr/territoire/2020-02-07/lyon-avec-son-futur-siege-le-centre-international-de-recherche-sur-le-cancer-veut-s-affirmer-839110.html>.
- [150] Les cahiers techniques du bâtiment, Éclairage naturel : mode d'emploi, *Les Cah. Tech. Du Bâtiment.* (2005). <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/eclairage-naturel-mode-d-emploi.30346>.
- [151] Jonathan Tourtois, La construction de la bibliothèque de l'Alcazar, *Petites Balades Urbaines.* (2016). <http://www.petites-balades-urbaines.com/les-projets-qui-ont-fait-marseille/les-grands-projets-du-xxieme-siecle/la-construction-de-la-bibliotheque-de-lalcazar/>.
- [152] L'observatoire des bâtiments bepos et basse consommation, Opération Baï Una et Baï Ona - Bâtiment A, *Obs. BBC.* (n.d.). <https://www.observatoirebbc.org/nouvelleaquitaine/projets/2051>.
- [153] I.R. et Y.M. Bruno Perera, 100 maisons durables et solidaires, 2010. [https://www.union-habitat.org/sites/default/files/articles/documents/2018-03/100 maisons durables et solidaires.pdf](https://www.union-habitat.org/sites/default/files/articles/documents/2018-03/100%20maisons%20durables%20et%20solidaires.pdf).
- [154] EnergiePlus le site, Valeurs de coefficients de transmission thermique (U) de parois types, *EnergiePlus Le Site.* (2007). <https://energieplus-lesite.be/donnees/enveloppe44/enveloppe2/valeurs-de-coefficients-de-transmission->

thermique-u-de-parois-types/.

- [155] S. Armand-Decker, P. Lagièrre, De la conception au retour d'expérience de maisons passives en pin maritime, in: J. BATSALE, M. AZAIEZ (Eds.), Congrès Français Therm., Bordeaux, 2012: pp. 348–355. http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/Congres_2012/Tome1_bordeaux_2012.pdf.
- [156] M. Rüggeberg, I. Burgert, Bio-Inspired wooden actuators for large scale applications, PLoS One. 10 (2015). doi:10.1371/journal.pone.0120718.