

La RT 2012 et les certifications vers des solutions passives à basse consommation

La nouvelle réglementation thermique RT2012, entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2013 pour le logement et le 28 octobre 2011 pour le reste des bâtiments, définit deux coefficients de conception que doivent respecter les bâtiments neufs : le $B_{bio,max}$ (Besoin bioclimatique) et la $T_{ic,ref}$ (Température intérieure conventionnelle) appliquée aux bâtiments non rafraîchis.

Le coefficient B_{bio} , exprimé en points, caractérise l'efficacité énergétique du bâti au travers de 3 caractéristiques indépendantes des systèmes énergétiques utilisés, les besoins annuels en chauffage (B_{ch}), en refroidissement (B_{fr}) et en éclairage (B_{ecl}). Ces besoins calculés en $Wh.m^{-2}SHON_{RT}.an^{-1}$, sont le cumul de l'énergie requise pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage suivant les scénarios dynamiques prenant en compte les saisons et les relances. Le B_{bio} est défini par la relation suivante :

$$B_{bio} = 2 (B_{ch} + B_{fr}) + 5 B_{ecl} \quad (1-1)$$

Le calcul du B_{bio} considère les caractéristiques des parois opaques, des baies, des ponts thermiques, de la ventilation, de la météo, des scénarios d'occupation et des apports internes. Il favorise l'utilisation des protections solaires. Ces éléments peuvent être fixes (casquette, débord de toit, auvent, claustra, brise-soleil) ou encore mobiles (store, volet, persienne, rideau). Les éléments fixes sont généralement intégrés dans l'aspect architectural du bâtiment mais présentent tout de même des inconvénients comme la mauvaise gestion des apports solaires pendant les périodes d'intersaison. A titre d'illustration, la figure 1. 2 montre l'utilisation de la structure supportant les panneaux photovoltaïques en casquette dans la maison SUMBIOSI (prototype de maison de l'édition 2012 de la compétition internationale interuniversitaire du Solar Decathlon Europe, utilisé comme une des maisons de cas étude).

Le B_{bio} considère également les éléments de protection végétaux à feuilles caduques régulant la transmittivité des apports solaires en fonction de la saison. Cependant, le temps de pousse des éléments végétaux peut être de plusieurs années et pendant ce temps la protection sera inefficace. Bien que non pris en compte dans

la RT 2012, les végétaux favorisent également le rafraîchissement de l'environnement proche grâce à l'évapotranspiration. La figure 1. 3 montre un schéma de principe d'une ventilation naturelle assistée par l'évapotranspiration d'un mur végétal. Un autre principe d'évaporation pour le maintien du confort est l'utilisation de plan d'eau à l'image des riads marocains qui ont souvent une fontaine ou une piscine dans la cour intérieure (cf. figure 1. 4).

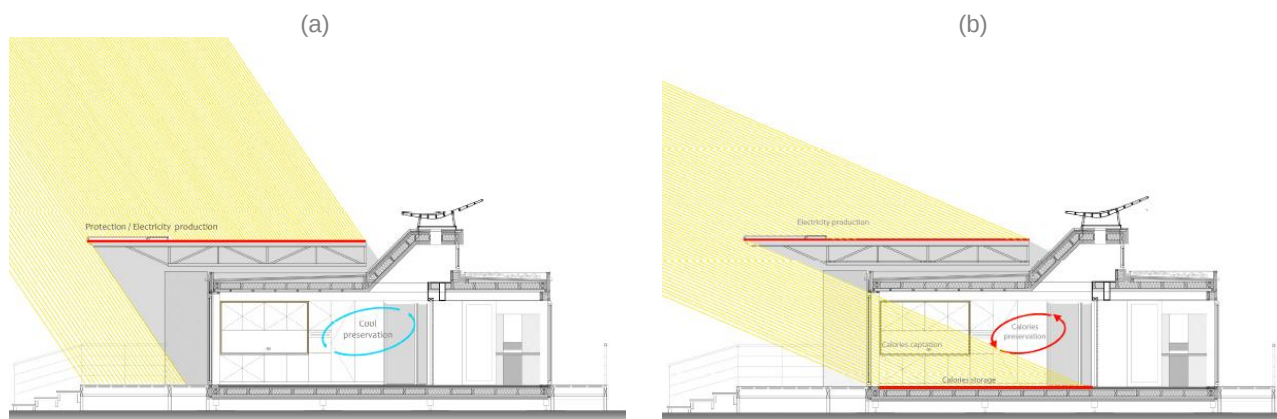


Figure 1. 2 : Casquette solaire mise en place dans la maison SUMBIOSI permettant de se protéger du soleil en été (a) et de profiter des apports solaires en hiver (b)

Le deuxième coefficient que doit respecter le bâtiment dans la RT2012 est la température intérieure conventionnelle de référence (Ticréf). La valeur de la Tic, température opérative en période d'occupation, ne doit pas dépasser cette valeur de référence Ticref. La Tic est déterminée dynamiquement à partir de la méthode suivante :

- le bâtiment est simulé pendant 4 semaines consécutives à partir du 4 juin avec une température initiale de masse de 26°C.
- La Tic est la température intérieure opérative maximale lors du dernier jour d'occupation de la simulation (7^e jour de la 4^e semaine pour le logement, 5^e jour de la 4^e semaine pour le tertiaire).
- Les données climatiques sont fournies par la méthode de calculs en fonction de la zone climatique corrigée par rapport à l'altitude et la distance au littoral

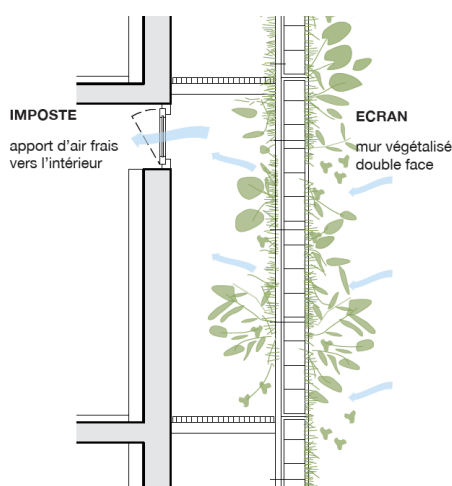


Figure 1. 3 : Schéma de principe d'une ventilation naturelle assistée par un mur végétalisé (selon (Noé21, 2012))



Figure 1. 4 : Photographie d'un riad marocain

La Tic n'est pas obligatoire pour les bâtiments classés CE2 (bâtiment avec refroidissement considéré) donc la classification est développée dans le sous-chapitre suivant 1.3. Si le bâtiment est classé CE1 et climatisé, la Tic est déterminée en mode besoin (Th-EB), c'est-à-dire que les systèmes énergétiques ne sont pas considérés. A noter que l'apport d'un puits climatique (puits provençal ou puits canadien) n'intervient pas dans

le calcul du confort d'été en mode besoin. Si le bâtiment est classé CE1 et non climatisé, la Tic est calculée en se basant sur le mode consommation (Th-EC), c'est-à-dire que certains systèmes peuvent être considérés comme le puits climatique. La valeur de la Ticref est déterminée à partir de la simulation dynamique d'un bâtiment dit de référence (Benoit, 2014) dont les systèmes et les paramètres sont fixés dans la méthode Th-BCE.

Dans ce contexte réglementaire du bâtiment français, il est possible de faire reconnaître les performances améliorées d'un bâtiment du point de vue énergétique au travers de labels (comme Effinergie+) ou encore du point de vue environnemental au travers de certifications environnementales. Le label Effinergie+ de l'association BBC-Effinergie, a été créé en 2007 et a inspiré la nouvelle réglementation RT 2012. La certification environnementale « Habitat et Environnement » (H&E) s'applique au logement neuf et à la réhabilitation lourde. Pour les performances énergétiques et le confort d'été, la H&E s'appuie sur la réglementation RT2012 pour la note de base avec bonification si le Bbio est inférieur à 10% et 20%. La note maximale est donnée si le bâtiment respecte le label Effinergie+. Concernant le bâtiment tertiaire, La certification Haute Qualité Environnementale (HQE) fait office de référence (Certivéa, 2012). La certification s'appuie également sur la réglementation RT 2012 pour définir le niveau de base de sa notation.

Le confort d'été dans les labels énergétiques Européens

En Suisse, le label de performance énergétique MINERGIE® est destiné aux bâtiments neufs et rénovés. Ce label fixe 5 exigences à respecter concernant un système de ventilation mécanique obligatoire, des consommations annuelles d'énergie (CVC et eau chaude sanitaire) et un surcoût d'investissement inférieur à 10%. La consommation maximale des postes CVC et ECS pour les bâtiments neufs varie de 40 kWh.m⁻² à 45 kWh.m⁻² selon l'utilisation du bâtiment (commerce, administration, écoles, habitat, restauration). La consommation pour les bâtiments rénovés varie de 70 kWh.m⁻² à 85 kWh.m⁻². Le label MINERGIE-ECO® certifie les bâtiments utilisant des matériaux de construction écologiques et sains.

Il existe deux niveaux supérieurs dans le label MINERGIE® : le standard « -P » pour les bâtiments à très haute performance énergétique et le standard « -A » pour les bâtiments « quasi zéro énergie ». Le standard MINERGIE®-P ne restreint pas l'utilisation de système de climatisation et exige même un système de refroidissement si le bâtiment ne peut pas justifier les respects des exigences de solutions constructives (surface vitrée, inertie, protection) ou d'un justificatif de non dépassement de températures de confort calculé par le logiciel *Klimatisierung* (www.energycodes.ch).

En Allemagne, le label Passivhaus, créé en 1996, est destiné aux bâtiments résidentiels et tertiaires. Il impose pour obtenir le label :

- Un besoin en chauffage inférieur à 15 kWh.m⁻².an⁻¹
- La puissance de chauffage ne doit pas excéder 10 W.m⁻²
- Un besoin en énergie primaire inférieur à 120 kWh.m⁻².an⁻¹ pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et l'électricité (dont l'électroménager)

Le logiciel PHPP (Passive House Planning Package) version 2007 prévoit un calcul statique de la fréquence de surchauffe par rapport à une température fixée. Ce calcul prend en compte la résistance thermique des parois extérieures et des menuiseries, l'efficacité d'une ventilation mécanique double flux et d'un puits géothermique, les débits de ventilation, les apports internes et les apports solaires. A noter que les données climatiques sont basées sur des moyennes mensuelles.

La certification HQE demande une simulation thermique dynamique sur toute l'année. Pour les espaces non climatisés (selon la cible 8.3 de la HQE), la température ne doit pas dépasser la température Tmax (égale à Ticref) plus de 2 à 3% du temps d'occupation (en fonction de la zone climatique) pour atteindre un niveau dit « performant » et 1 à 2% pour un niveau dit « très performant ». Si la sur-ventilation est utilisée pour maintenir le confort, il est alors possible de valider le critère de confort d'été en utilisant le diagramme psychrométrique prenant en compte la température, la vitesse de l'air et l'humidité. La figure 1. 5 définit les différentes zones de confort en fonction de la vitesse d'air dans la zone d'occupation.

Pour les espaces climatisés (selon la cible 8.4 de la HQE) la température de consigne recommandée est de 26°C. Dans le cas d'une consigne inférieure à 26°C, des vitesses maximales d'air soufflé sont à respecter (entre 0,12 et 0,5m.s⁻¹ en fonction de niveau de performance et du type de local).

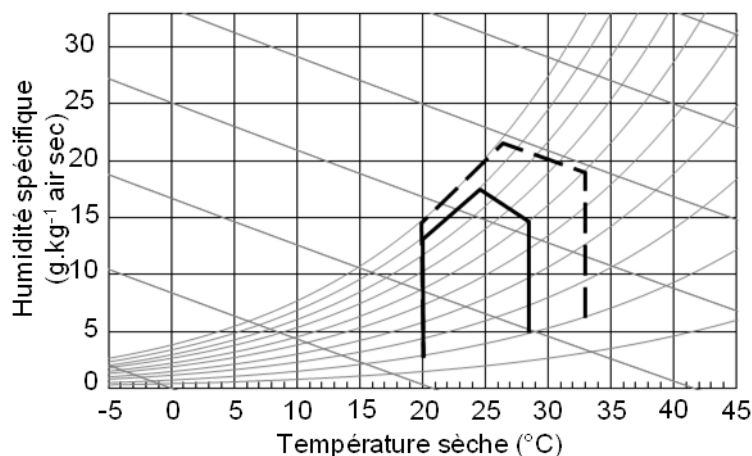


Figure 1. 5 : Plages de confort suivant la vitesse de l'air à 0 m.s⁻¹ (ligne continue) et 1,5 m.s⁻¹ (tirets) sur le diagramme psychrométrique d'après(Certivéa, 2012)

Le diagramme psychrométrique (cf. figure 1. 5) est un outil complet car il tient compte des trois paramètres du confort thermique qui sont l'humidité, la température et la vitesse de l'air. Cependant, cet outil reste complexe à maîtriser compte tenu de l'interaction de ces différents paramètres régissant le confort. La figure 1. 6 donne des éléments pour l'utilisation de ce diagramme en montrant, à travers ses différentes zones d'action, les solutions techniques pour amener l'ambiance intérieure des bâtiments dans la zone de confort sans courant d'air (définie en rouge) tout en évitant des systèmes de refroidissement de type climatisation ou pompe à chaleur. On retrouve alors des solutions de rafraîchissement évaporatif direct (ED) et indirect (EI), de sur-ventilation nocturne associée à l'inertie (M) et de sur-ventilation diurne (V) pour maintenir le confort d'été.

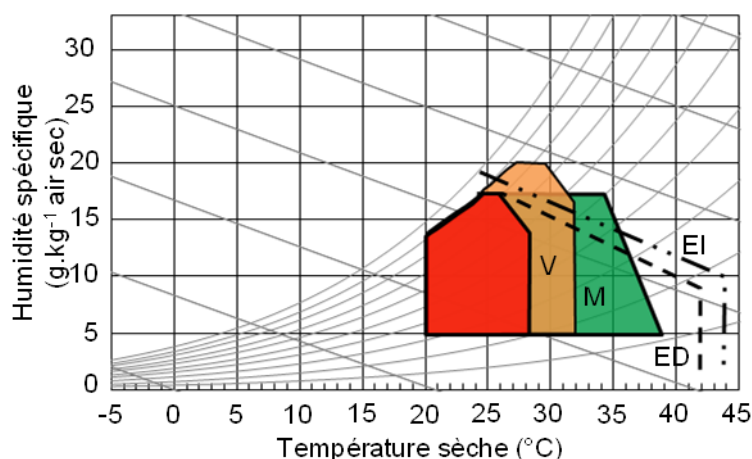


Figure 1. 6 :Diagramme psychrométrique : limite de la zone de confort sans courant d'air (rouge), de la zone d'influence de la ventilation diurne à 2 m.s⁻¹ (V orange) et de ventilation nocturne avec l'inertie thermique (M vert), de la zone d'influence du rafraîchissement évaporatif direct (ED tirets) et indirect (EI tirets – doubles points) d'après (Givoni, 1992)

Pour répondre au contexte réglementaire et environnemental français, il existe différents systèmes passifs et actifs maintenant le confort d'été. Dans la suite de ce travail nous classerons ces systèmes en trois catégories distinctes qui sont les suivantes :

- Rafraîchissement passif : Système de maintien du confort d'été par l'intermédiaire d'un phénomène naturel sans consommer d'énergie excepté pour sa régulation (ventilation naturelle, façade végétale intérieure),
- Rafraîchissement actif : Système de maintien du confort d'été par l'intermédiaire d'un phénomène naturel mais qui nécessite de consommer de l'énergie (ventilateurs, pompe) pour fonctionner (ventilateurs de confort, puits climatiques,...),
- Refroidissement actif : Système de maintien du confort d'été par l'intermédiaire du cycle thermodynamique d'un fluide frigorigène (climatiseur, PAC,...).

Le confort d'été dans les certifications environnementales européennes

La certification BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) développée par le Building Research Establishment (BRE) est la méthode d'évaluation de la performance environnementale des bâtiments tertiaires et résidentiels au Royaume-Uni. Comme pour la HQE, BREEAM fonctionne avec des crédits attribués pour des cibles définies. Concernant la cible du confort thermique (Hea 03) comprise dans la section 5 Health and Wellbeing (Santé et Bien-être), deux crédits peuvent-être obtenus. Le premier crédit est donné si des résultats d'une simulation thermique dynamique à partir d'un logiciel certifié sont fournis et que les taux d'inconfort respectent les exigences des normes en vigueur (enseignement et santé) ou qu'un ingénieur certifie que le taux d'inconfort est acceptable si aucune norme n'existe. Le deuxième crédit est donné si une stratégie de régulation des systèmes énergétiques est mise en place.

La certification DGNB (Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen – Société Allemande pour la Construction Durable), en application depuis janvier en Allemagne, évalue différents critères (Miranda, 2012) : la température opérative, la vitesse de l'air, l'asymétrie entre les températures de rayonnement et du sol, l'humidité relative et le gradient thermique vertical

Les solutions passives et actives de rafraîchissement sont présentées et analysées dans les paragraphes suivants.

1.2.1 La sur-ventilation nocturne naturelle ou mécanique

La sur-ventilation nocturne permet de décharger la chaleur accumulée pendant toute la journée à cause des apports externes (température extérieure et apports solaires) et internes (puissance dissipée des occupants et des systèmes électriques). La sur-ventilation peut être naturelle ou mécanique. Dans le cas d'une ventilation mécanique, la consommation nocturne des ventilateurs peut atteindre rapidement la consommation d'une climatisation en relance au matin. Il est donc plus intéressant d'utiliser la ventilation naturelle ; toutefois, il est nécessaire de concevoir la ventilation naturelle lors de la conception du bâtiment. Par exemple, la figure 1. 7 montre deux types de ventilation naturelle pour un même bâtiment. La ventilation naturelle unilatérale profite de la variation de densité de l'air en fonction de la température : effet cheminée (faible taux de renouvellement et risque de débit nul à cause du vent) alors que la ventilation transversale profite des variations de pression induite par le vent quelle que soit sa direction.

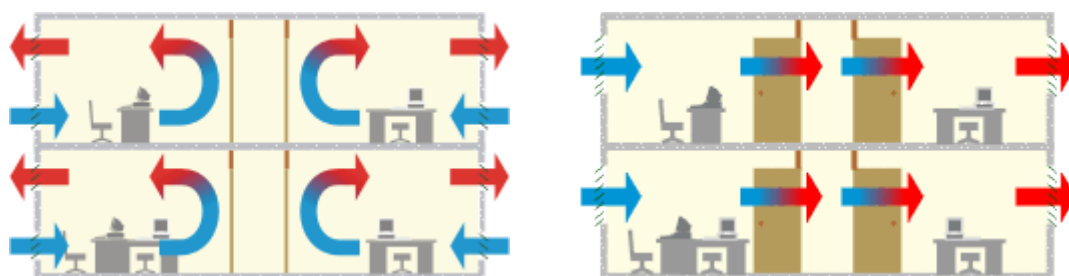


Figure 1. 7 : Deux configurations principales de ventilation naturelle : ventilation unilatérale à gauche et ventilation transversale à droite d'après (Gratia et Herde, 2006).

Il est également possible de favoriser les deux types de ventilation présentés ci-dessus en utilisant l'effet cheminée sur une grande hauteur (cf. figure 1. 8 à gauche) ou l'effet venturi créé par une tour des vents (cf. figure 1. 8 à droite). La tour des vents est une technique ancestrale d'Iran appelée « Bagdir ». Le potentiel de rafraîchissement par sur-ventilation dépend généralement de la configuration des ouvrants, de l'inertie thermique du bâtiment et de la variation de température entre le jour et la nuit. Dans un état de l'art des techniques de ventilation assistée par le vent (Khan et al., 2008), les auteurs soulignent que l'effet cheminée permettrait d'atteindre un renouvellement d'air d'environ 5 volumes par heure dans le cas d'un bâtiment R+4 équipé d'une double-peau. De plus, les tours à vent directionnelles passives actuelles permettent d'obtenir des débits de ventilation de $400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à $900 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour des vents compris entre $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

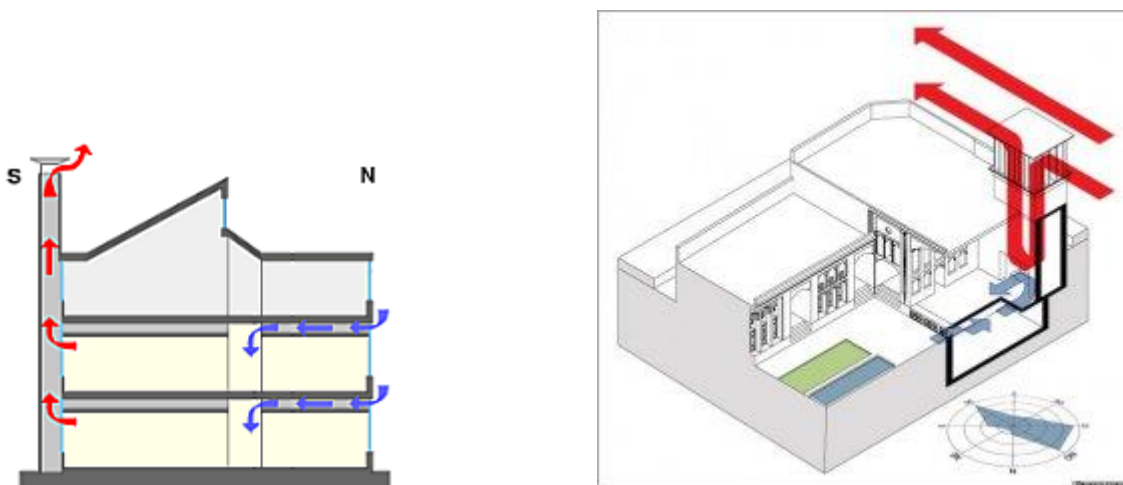


Figure 1. 8 : Schéma de principe de l'effet cheminée à gauche et de la tour à vent appelée Bagdir à droite

Malgré une stratégie de conception bioclimatique, les solutions passives peuvent ne pas être suffisantes. Il est alors nécessaire d'utiliser des systèmes de refroidissement. Selon la définition de la RT 2012, un système de refroidissement actif permet de maintenir la température intérieure stable. Il existe également des systèmes permettant de réguler l'ambiance intérieure sans pour autant pouvoir gérer une température de consigne telle que le rafraîchissement évaporatif et le puits canadien.

1.2.2 Rafraîchissement évaporatif

Il existe deux techniques de rafraîchissement évaporatif pour le bâtiment : l'évaporation directe et l'évaporation indirecte. L'évaporation directe consiste à faire humidifier l'air intérieur du bâtiment de manière adiabatique (air neuf ou air intérieur). Cette humidification peut se faire par diffusion à travers une membrane (cf. figure 1. 9), par brumisation sous pression ou ultrason. Les avantages de cette solution sont le faible coût de fonctionnement (consommation d'un ventilateur et de la pompe de circulation) et une performance proportionnelle à l'augmentation de la température à l'instar des climatiseurs. Cependant, le risque principal de cette solution est une sur-humidification de l'air augmentant l'inconfort. L'évaporation indirecte tend à résoudre cet inconvénient en humidifiant l'air extérieur ou vicié qui ensuite échange avec l'air soufflé par l'intermédiaire d'un échangeur ou un plafond rafraîchissant. La figure 1. 10 présente un schéma de principe d'un système de rafraîchissement par évaporation indirecte équipé d'une tour aéroréfrigérante, d'un plafond rafraîchissant et d'une batterie froide pour rafraîchir l'air soufflé.

1.2.3 Les puits climatiques et le geocooling

Dans cette solution, il est possible d'utiliser le sol qui varie entre 7°C et 12°C pour une profondeur de 3 m (Amitrano, 2006) pour rafraîchir un bâtiment en utilisant soit de l'air (puits climatique) ou de l'eau (puits géothermique). Le fluide rafraîchi est envoyé directement dans le bâtiment sans passer par une pompe à chaleur par soufflage ou par plafond rafraîchissant. Ce type de solution peut-être considéré comme un

rafraîchissement actif car il consomme l'électricité pour le fonctionnement d'un ventilateur (surconsommation à prévoir par rapport à une ventilation conventionnelle) ou d'une pompe pour le puits géothermique.

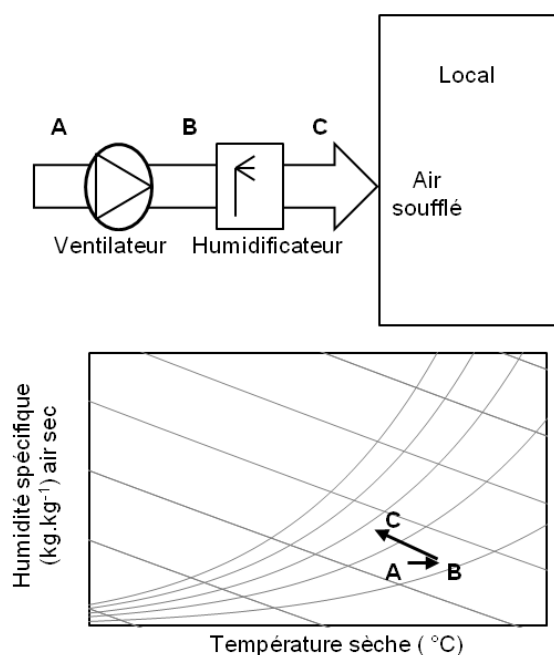


Figure 1. 9 : Schéma de principe d'un rafraîchisseur par évaporation adiabatique directe

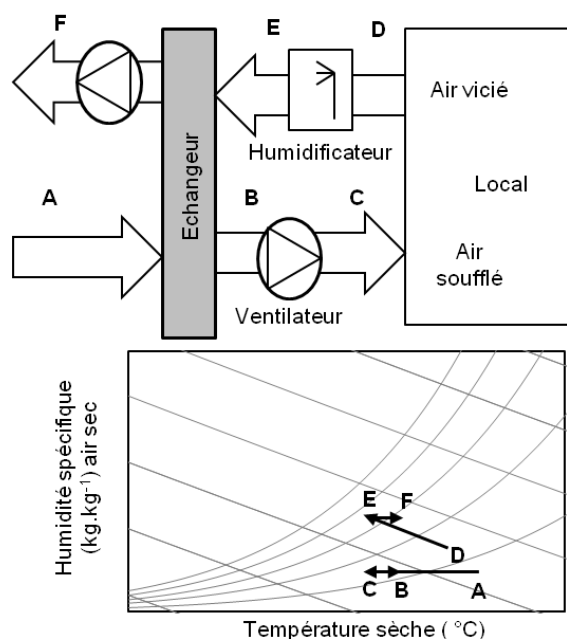


Figure 1. 10 : Schéma de principe d'un rafraîchisseur par évaporation adiabatique indirect avec une tour aéroréfrigérante d'après (Chlela, 2008)

Concernant les puits climatiques associant la ventilation et l'inertie (cf. figure 1. 6), un retour d'expérience a été réalisé sur la région Aquitaine dans le cadre du projet Effipuits (Gasparin et Lalanne, 2011). Les puits suivis équipaient des maisons individuelles et des lycées. Le retour de ce projet a montré que plusieurs puits présentaient des dysfonctionnements (échangeur double-flux bloqué) et des malfaçons (mauvaise évacuation de la condensation). Les performances et le fonctionnement des puits climatiques sont donc très sensibles à la mise en œuvre, il est donc nécessaire de faire appel à un installateur formé et expérimenté dans ce type de système. De plus, comme le montre la figure 1. 11, les opérations de terrassement pour les puits climatiques sont très importantes ce qui représente un surcoût dans le prix du système.

Le geocooling consiste à rafraîchir un liquide en utilisant des puits géothermiques. Le fluide ainsi rafraîchi peut alors échanger avec l'air via une batterie froide ou via un plafond rafraîchissant. Pahud et al. (Pahud et al., 2012) présentent un système composé de puits géothermiques et d'une pompe à chaleur (cf. figure 1. 12). L'avantage de cette configuration est que pendant l'hiver, les puits géothermiques sont du côté froid de la pompe à chaleur et donc ils vont refroidir le sol. Pendant l'été, les puits géothermiques échangent avec un plafond rafraîchissant par l'intermédiaire d'un échangeur eau/eau. L'inconvénient principal de cette solution est l'utilisation d'échangeurs car on utilise généralement deux fluides différents : eau glycolée pour les puits géothermiques et de l'eau pour le plafond ou de l'air.

Bien qu'il existe de nombreuses solutions de rafraîchissement passives ou actives pour maintenir le confort d'été, les systèmes de refroidissement représentent une solution robuste et économiquement intéressante au moment de l'investissement. Néanmoins, la réglementation RT 2012 tend à limiter leur utilisation pour respecter la consommation réglementaire établie.



Figure 1. 11 : Photographie d'un puits climatique installé dans le Lycée Pape Clément à Pessac (33)

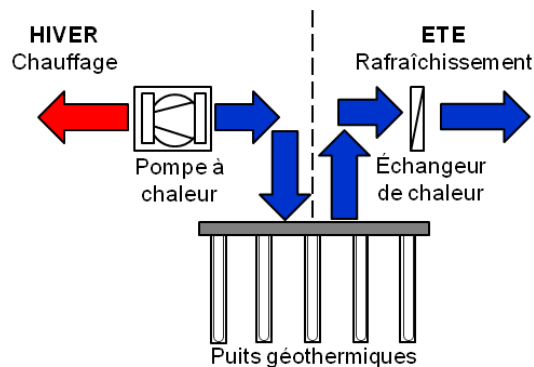


Figure 1. 12 : Principe de fonctionnement de puits géothermique ou geocooling d'après(Pahud et al., 2012)

1.3 Une utilisation de système de refroidissement restreinte

La RT 2012 restreint l'utilisation des systèmes de refroidissement pour le maintien du confort d'été dans les bâtiments pour respecter la consommation conventionnelle d'énergie primaire maximale (Cepmax). En effet, la Cepmax prend en compte 5 usages ou postes de consommation tels que le chauffage, la ventilation, le refroidissement, la production d'ECS et l'éclairage. Le refroidissement et l'éclairage sont considérés dans le Cepmax depuis la réglementation RT 2005. La grande différence de la RT2012, par rapport à l'ancienne réglementation, réside dans le calcul d'une valeur de la Cepmax indépendante du bâtiment alors que la RT 2005 (MEDDTL, 2006) s'appuyait sur un bâtiment de référence (géométrie identique au bâtiment étudié mais avec des caractéristiques fixées pas la RT). La Cepmax est en moyenne égale $50 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ et sa variabilité dépend de plusieurs paramètres dont la zone climatique et la classe de bâtiment CE1 ou CE2.

Les bâtiments sont classés dans deux catégories distinctes CE1 (bâtiments non refroidi²) et CE2 (bâtiment refroidi) suivant quatre critères :

- La zone d'usage : logement/enseignement, bureaux, autres
- L'exposition des baies vitrées aux zones de bruit extérieur : BR1, BR2, BR3
- La zone climatique : H1a, b, c ; H2a, b, c, d ; H3 (cf. figure 1. 13)
- L'altitude : <400m, >400m et >800m

Un bâtiment est classé CE1 (bâtiment non refroidi) quand les baies ouvrables sont exposées à un niveau de bruit suffisamment bas (cf. le tableau 1. 2) , et que la situation du bâtiment (zone climatique et altitude) permet un rafraîchissement passif par sur-ventilation. La catégorie CE1 n'interdit pas l'utilisation de la climatisation mais ne prévoit pas de coefficient compensatoire supplémentaire dans le calcul de la Cepmax. Par conséquent, une réduction de consommation des autres postes (lumière, ECS, chauffage) devra être envisagée si un système actif pour le confort d'été est prévu pour un bâtiment de catégorie CE1.

Pour la catégorie CE2 (bâtiment refroidi), le calcul de la limite de consommation conventionnelle maximale (Cepmax) prévoit un coefficient de sécurité supplémentaire égal à 1,2 (QUALITEL, 2012) prenant en compte l'utilisation nécessaire de climatisation. De plus, les locaux de catégorie CE2 équipés de systèmes de refroidissement actif ne sont pas soumis aux exigences de confort d'été (calcul de la Tic et de facteurs solaires). Le bâtiment sera classé de catégorie CE2 si et seulement si, il est refroidi par une machine thermodynamique destiné au confort des personnes. Par conséquent, si un bâtiment remplissant les

² Dans la réglementation thermique RT 2012, le terme rafraîchi est utilisé pour les classes CE1 et CE2. Nous avons choisi d'utiliser le terme refroidi afin de ne pas amener de confusion entre le rafraîchissement actif et le refroidissement actif définis précédemment

conditions pour être en catégorie CE2 n'est pas équipé de système de refroidissement, il est alors classé CE1 et devra justifier le respect des exigences de confort d'été.



Figure 1. 13 : Cartes de la répartition des zones climatiques sur le territoire français selon la RT 2012 (CSTB, 2011)

Le tableau 1. 2 résume le classement des différentes situations dans les catégories CE1 et CE2. Concernant le logement, seules les zones climatiques H2d et H3 (voir figure 1. 13) avec une altitude inférieure à 400m peuvent être classés CE2 et donc prétendre au coefficient compensatoire prévu pour le maintien du confort d'été. Les bureaux sont classés en catégorie CE2 quelle que soit la zone climatique à partir d'une exposition à une zone de bruit de classe BR2.

La RT 2012 définit les systèmes de refroidissement pouvant maintenir une température intérieure suivant une consigne. Actuellement, seules des machines avec un cycle thermodynamique sont capables d'assurer ce pré-requis. Les paragraphes suivants présentent les deux principales technologies de refroidissement actuellement utilisées dans le bâtiment. Les machines à sorption également connues comme « climatisations solaires » ne sont pas présentées ici car leur utilisation reste très minoritaire.

1.3.1 La climatisation

Les systèmes de climatisation ou climatiseur sont des machines frigorifiques. En effet, ils fonctionnent suivant un cycle thermodynamique de compression/détente (cf. figure 1. 14). Ils sont donc généralement composés d'un compresseur (seul élément consommant de l'énergie), un évaporateur, un condenseur et d'un détendeur. La climatisation assure également une fonction de régulation de l'hygrométrie de l'air.

Zones à usage	Exposition aux zones de bruits	Zones Climatiques et Altitudes											
		H1a	H1b	H1c <400m	H1c >400m	H2a	H2b	H2c <400m	H2c >400m	H2d <400m	H2d >400m et <800m	H2d >800m	H3 <400 m
Habitation Enseignement	BR1												
	BR2												
	BR3												
Bureaux	BR1												
	BR2												
	BR3												
Autres concernés par la RT2012	BR1												
	BR2												
	BR3												

Tableau 1. 2 : Classements des bâtiments dans les catégories CE1/CE2 pour refroidissement en fonction de l'usage, de l'exposition au bruit, l'altitude et la zone climatique

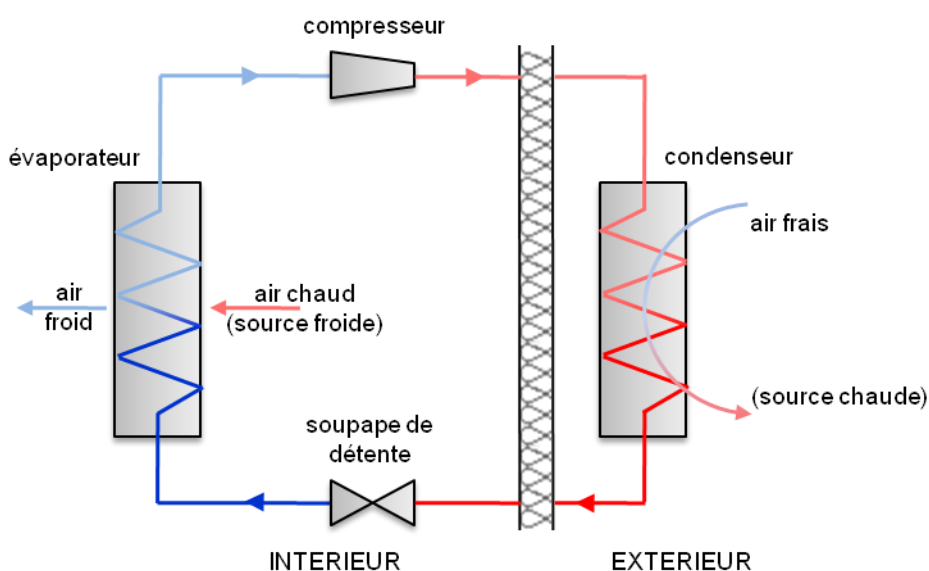


Figure 1. 14 : Schéma de principe de fonctionnement d'un climatiseur

Le climatiseur est le système principal de maintien du confort dans les bâtiments. Selon le rapport de la Commission Européenne concernant l'éco-conception des climatiseurs et des ventilateurs de confort (Commission of the European Communities, 2009), 4,7 millions d'unités ont été vendues en 2005 et 9 millions sont prévues en 2020. Ceci représentait en 2005 une consommation électrique de 30 TWh.an⁻¹ et 14 MteqCO₂ d'émission de gaz à effet de serre, et représenterait, en 2020, 73 TWh.an⁻¹ de consommation et 37 MteqCO₂ d'émission de gaz sans aucune mesure prise par les membres de l'Union Européenne.

Les figures 1.15 et 1.16 établies à partir des données du rapport EECCAC (Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners) (Adnot et al., 2003) montrent que le secteur tertiaire représente 92% des surfaces climatisées dans l'Union Européenne et le secteur résidentiel seulement 8% et que les climatisations centralisées représentent 66% de surfaces climatisées. Concernant la climatisation, le secteur résidentiel représente 23% des climatisations individuelles selon les données d'Adnot et al.

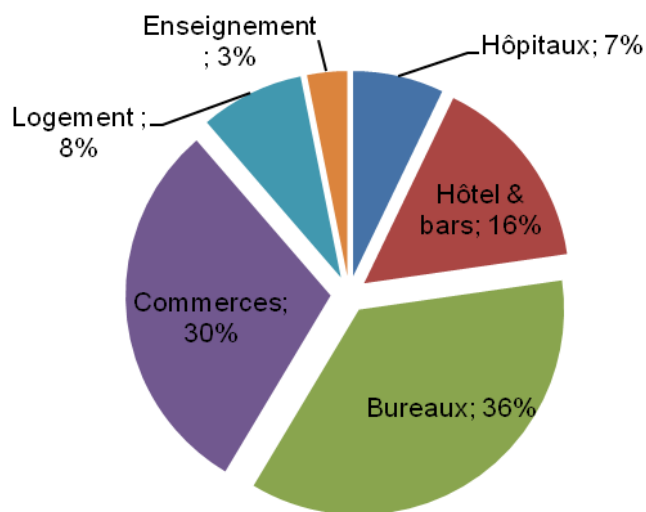


Figure 1. 15 : Répartition des surfaces climatisées par typologies d'usage à travers l'Union Européenne à partir des données de (Adnot et al., 2003)

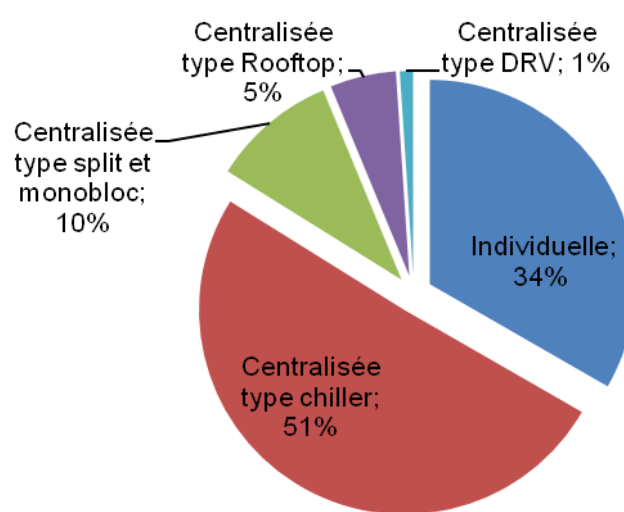


Figure 1. 16 : Répartition des surfaces climatisées par types de technologie à travers l'Union Européenne à partir des données de (Adnot et al., 2003)

Le rapport met en évidence que l'utilisateur final oriente généralement son choix vers un climatiseur de faible coût et donc de faible efficacité sans se préoccuper du coût sur le cycle de vie. En effet, le coût de l'énergie peut représenter jusqu'à 70-90% du coût total sur le cycle de vie de l'appareil comprenant l'achat, l'installation et la maintenance.

Le tableau 1. 3 montre les EER (Energy Efficiency Rate) conseillées pour les climatiseurs de puissance inférieure à 12 kW. L'EER est le ratio entre puissance de froid fourni et la puissance électrique appelée sous des conditions fixes (35°C à l'extérieur et 27°C à l'intérieur). L'EER est utilisée par les professionnels du génie climatique pour différencier les caractéristiques en production de froid et celles en production de chaud (représentée par le COP) dans les machines réversibles. On retrouve différentes typologies de climatisation :

- Le monobloc : Le système est composé d'un évaporateur et d'un condenseur. Tous les éléments sont compris dans un seul bloc installé dans un percement d'une paroi extérieure : un mur ou une fenêtre,
- Le mono-split : l'évaporateur est déporté pour des raisons d'intégration. Ceci permet de mettre le bloc compresseur/condenseur sur le toit (protégé de l'ensoleillement),
- Le multi-split : le bloc compresseur/condenseur alimente plusieurs évaporateurs répartis dans différentes pièces.

Généralement, le côté chaud (condenseur) utilise l'air comme vecteur d'évacuation et le côté froid (évaporateur) peut utiliser l'air (CTA, ventilo-convecteurs) ou l'eau (plafonds et poutres froids). L'évacuation de la chaleur via l'air extérieur participe la création d'îlots de chaleur urbains, c'est-à-dire, des zones localisées dans la ville où la température de l'air est plus élevée qu'aux alentours. Selon de Munck et al. (de Munck et al., 2010), les rejets de chaleur des systèmes de climatisation augmentent la température d'environ 0,25 à 1°C dans la ville de Paris. Ce phénomène est amplifié dans les zones peu ventilées comme les cours intérieures ou les impasses où les condenseurs sont installés en façade (cf. figure 1. 17).

Type de climatiseur	EER conseillé
Système monobloc/ froid seul	2,60 – classe C
Système split/ froid seul	2,60 – classe D
Système multi-split/ froid seul	2,80 – classe C
Système monobloc/ réversible	2,40 – classe D
Système split/ réversible	2,60 – classe D
Système multi-split/ réversible	3,00 – classe B

Tableau 1. 3 : Energy Efficiency Rate (EER) conseillées pour les systèmes de climatisation jusqu'à 12kW (Energie+, 2004)



Figure 1. 17 : Impasse de Nice où chaque appartement est équipé d'un climatiseur mono-split (janvier 2013)

1.3.2 La pompe à chaleur

La pompe à chaleur (PAC) fonctionne sur le même cycle thermodynamique qu'une climatisation. Elle est utilisée et optimisée pour chauffer les bâtiments (sources chaude et froide inversées par rapport à une climatisation ; cf. figure 1. 18). Cependant, on trouve de plus en plus de PAC réversibles. Une pompe à chaleur réversible air/air est d'ailleurs équivalente à une climatisation réversible mais optimisée pour le chauffage. Les différences entre climatisation réversible et PAC aérothermique réversible tendent à diminuer dans les derniers développements selon (Maïzia, 2007).

A l'instar de la climatisation qui utilise comme source chaude l'air extérieur (aérothermie -baisse de l'efficacité au delà de 35°C), la pompe à chaleur peut utiliser comme vecteur l'eau pour la faire circuler soit dans le sol (géothermie) ou une rivière (aquathermie). L'aquathermie et la géothermie ont généralement une efficacité supérieure (COP=4-5) à l'aérothermie (COP=2-3) et restent constantes tout au long de l'année. Cependant, elles représentent un investissement plus important. Le tableau 1. 4 est un comparatif des différentes solutions de pompe à chaleur fournie par l'ADEME. Bien que l'aérothermie soit la solution la moins efficace, elle reste le type de PAC le plus installé en France avec 61 % (cumul air/eau et air/air) d'après la figure 1. 19 car moins onéreux à l'investissement (cf. tableau 1. 4).

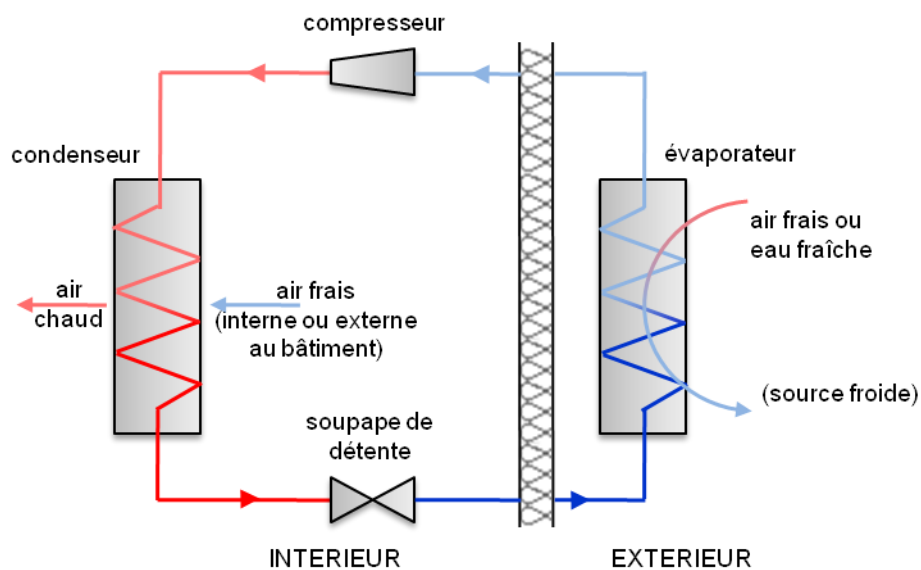


Figure 1. 18 : Schéma de principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur

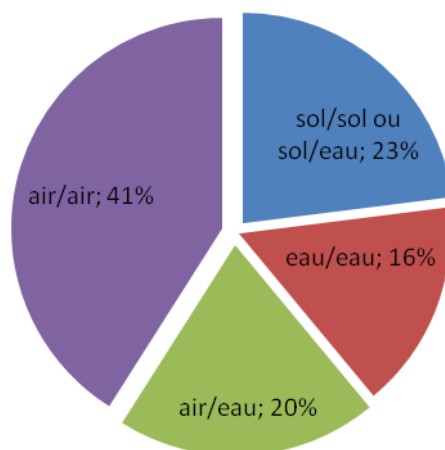


Figure 1. 19 : Parts de marché par type de pompe à chaleur en 2003 pour la France

Le tableau 1. 4 montre que parmi les différentes technologies, les PAC eau/eau, air/eau et air/air sont adaptées au confort d'été. De plus, les PAC à air côté extérieur représentent un coût d'investissement moindre par rapport à la PAC eau/eau nécessitant un forage pour les puits géothermiques. Cependant, leur coût d'utilisation est plus important car elles nécessitent un appoint de chauffage en période de froid rigoureux.

	PAC sol/sol ou sol/eau	PAC eau glycolée ou eau/eau	PAC air extérieur/eau	PAC air extérieur/air ou air extérieur/air neuf
Coût (€.m ⁻² chauffé et rafraîchi quand c'est possible)	- Investissement : 70 à 100, hors ECS et froid - Fonctionnement : de 2,3 à 3,5€.m⁻².an⁻¹	- Investissement : - capteurs horizontaux : de 85 à 135 - capteurs verticaux : de 145 à 185 - capteurs à nappe : de 80 à 130 - Fonctionnement : de 2,3 à 3,5€.m⁻².an⁻¹	- Investissement : de 65 à 90 (chauffé et rafraîchi) - Fonctionnement : de 2,5 à 3,7 €.m⁻².an⁻¹	- Investissement : de 60 à 90 (chauffé et rafraîchi) - Fonctionnement : de 2,5 à 3,7 €.m⁻².an⁻¹
Appoint	Pas nécessaire	Pas nécessaire	Toujours intégré au système peu ou pas utilisé dans les systèmes très performants	Nécessaire
Eau chaude sanitaire	Production possible	Production possible	Préchauffage ou préchauffage possible	Non conçu pour produire
Refroidissement	Pas possible sur plancher chauffant, possible avec des unités à détente directe	Possible (sauf si les émetteurs sont des radiateurs) et bien maîtrisé	Possible (sauf si les émetteurs sont des radiateurs) et bien maîtrisé	Possible et bien maîtrisé
Avantages	- Système simple, coût limité pour du géothermique - Adapté au climat rigoureux - Existence obligatoire d'un avis technique du CSTB	- Adapté au climat rigoureux - Peu de fluide frigorigène - Adaptation possible à un réseau de chauffage central existant	- Système simple, coût limité - Utilisable en appartement à chauffage individuel - Peu de fluide frigorigène ; confiné dans le pac - Adaptation possible à un réseau de chauffage central existant	- Utilisable en appartement à chauffage individuel - Couplage avec la VMC pour les PAC air extrait/air neuf
Contraintes	- Capteurs horizontaux seulement - Quantité importante de liquide frigorigène - Exiger une solide expérience de la part de l'installateur - Pour la PAC sol/sol, technologie de plancher spécifique	- Systèmes plus coûteux Pour capteur verticaux et à nappe : - Exige une solide expérience de l'installateur et du foreur - Démarche et autorisation à envisager - Coût élevé du forage	- Exiger des modèles particulièrement performants dans les climats rigoureux - Vérifier le niveau de bruit développé par la PAC	- N'assure pas la production d'eau chaude sanitaire - Nécessite le passage d'un réseau de gaine de soufflage de l'air - N'assure pas la totalité du chauffage pour les PAC air extrait/air neuf

Tableau 1. 4 : Tableau comparatif des différents types de pompe à chaleur, (ADEME, 2012; Béranger, 2013) prix affichés TTC

1.4 Opportunités de développement technologique vers des solutions alternatives

Comme il a été décrit précédemment, chaque solution du maintien de confort a ses avantages et ses inconvénients. Les solutions actives permettent généralement d'adapter facilement la production à la demande. Cependant, la demande en ressource énergétique (électricité, gaz ou énergie solaire) est très fortement corrélée à la demande de froid, ce qui peut impliquer des problèmes de charge sur les réseaux. D'autre part, les solutions passives sont généralement bon marché mais dépendent de leur environnement (configuration du bâtiment, vent, soleil) et sont généralement difficilement contrôlables.

En 2020, la future réglementation thermique RT 2020 sera appliquée en France. Elle imposera vraisemblablement que les bâtiments neufs soient à énergie positive. Il est donc nécessaire de proposer des solutions techniques basse consommation pour maintenir le confort d'été. De plus, les bâtiments construits avant 1990 représentant toujours 81% du patrimoine bâti français (ADEME, 2009), ces solutions doivent pouvoir participer à la réhabilitation énergétique de ces bâtiments.

Cherchant à répondre au contexte actuel et futur du bâtiment en France et en Europe, le présent travail de thèse propose un *système intégré de rafraîchissement d'air pour le bâtiment à base de Matériaux à Changement de Phase (MCP)*. Cette technologie de rafraîchissement a été choisie car elle utilise l'inertie importante dans le changement de phase de MCP avec une bonne compacité (ratio entre la surface d'échange et le volume occupé) grâce à la configuration en échangeur-stockeur. De plus, le système développé ici se veut intégrable dans le bâtiment comme un système de refroidissement actif (pas de terrassement) et peut s'intégrer dans un réseau de ventilation existant.

Le développement technologique présenté dans cette étude s'appuie sur deux prototypes (cf. figures 1.20 et 1.21) de maisons énergétiquement très performantes élaborées dans le cadre des éditions 2010 et 2012 de la compétition internationale interuniversitaire du Solar Decathlon Europe (www.sdeurope.org). Parmi les différentes règles, la compétition impose aux maisons concurrentes de maintenir une température intérieure inférieure à 25°C tout au long de la journée tout en favorisant une sobriété énergétique.



Figure 1. 20 : Photographie de la maison Napevomo



Figure 1. 21 : Photographie de la maison SUMBIOSI

NAPEVOMO (cf. figure 1. 20) est une maison individuelle d'une surface habitable de 47m² conçue pour accueillir deux personnes. Cette maison construite pour le Solar Decathlon Europe 2010 a été conçue et construite par les étudiants de l'école d'ingénieur « Arts et Métiers ParisTech » avec le support technique d'un consortium d'entreprises (dont Nobatek, centre de ressources technologiques) et le support scientifique de l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M). Après la compétition qui a eu lieu à Madrid en juin 2010, la maison a été reconstruite sur le site du centre Arts et Métiers Paristech de Bordeaux où elle a été équipée de capteurs et suivie pendant 2 ans et demi.

SUMBIOSI, projet successeur de NAPEVOMO (cf. figure 1. 21) est une maison individuelle modulaire d'une surface habitable de 70 m² conçue pour accueillir 3 personnes de façon permanente et jusqu'à 5 personnes provisoirement. La maison a été conçue et construite par les étudiants d'un consortium d'établissement « Aquitaine Bordeaux Campus » comprenant notamment l'école nationale supérieure d'architecture et de paysage de Bordeaux, Arts et Métiers ParisTech et l'Université de Bordeaux. Elle est actuellement installée sur le site de l'IUT de l'Université de Bordeaux.

NAPEVOMO et SUMBIOSI sont des maisons à structure légère (ossature bois) afin de respecter la contrainte de transportabilité et à très faible empreinte au sol (contrainte par le concours). Par conséquent, l'inertie de ces maisons est très faible. Le rafraîchisseur d'air à base de Matériaux à Changement de Phase (MCP) apporte cette inertie manquante avec une grande compacité (rapport entre surface d'échange et volume occupé) via un conditionnement des matériaux dans des échangeur-stockeurs.

Le principe de fonctionnement (cf. figure 1. 22) est identique pour les deux systèmes conçus pour NAPEVOMO et SUMBIOSI. Pendant la journée, l'air chaud est extrait de la maison et traverse les échangeur-stockeurs cédant sa chaleur au MCP. Ainsi rafraîchi l'air est ensuite soufflé dans la maison. Le MCP fondant sur une plage de température restreinte, il possible alors de réguler la température intérieure de la maison. Pendant la nuit, la phase solide du MCP est régénérée en soufflant de l'air dans les échangeur-stockeurs frais venant de l'extérieur. L'air réchauffé par le MCP est ensuite rejeté vers l'extérieur.

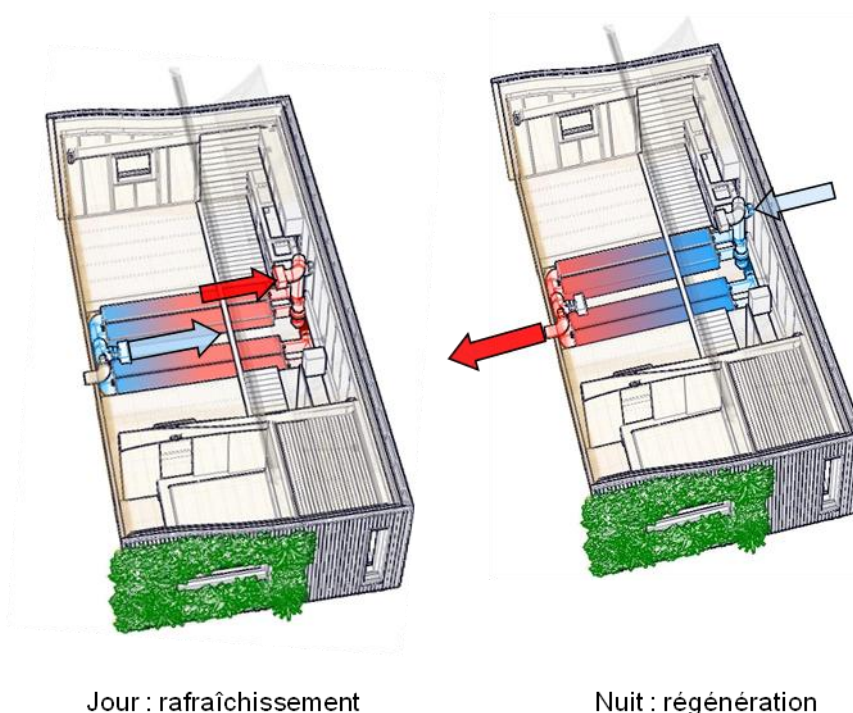


Figure 1. 22 : Principe de fonctionnement du système de rafraîchissement d'air utilisant des MCP

L'objectif de ce développement technologique est de proposer un système de rafraîchissement semi-passif. Afin de proposer un produit adapté au marché des systèmes pour le maintien du confort d'été, les enjeux industriels identifiés sont les suivants :

- définir une gamme de produits adaptés et prêts à l'emploi pour des bâtiments dans des zones géographiques ciblées,
- diffuser les outils de préconisation aux bureaux d'étude spécialisés en thermique du bâtiment et génie climatique,
- obtenir le titre V demandé par la Réglementation thermique RT 2012 pour une mise sur le marché,

- proposer un système en adéquation avec la démarche des certifications environnementales nationales,
- produire un système économiquement rentable sur son cycle de vie.

De plus, les verrous scientifiques ont été identifiés à trois échelles différentes. Tout d'abord à l'échelle du matériau :

- produire les connaissances physiques sur les changements de phase et les coefficients d'échanges associés au couple MCP/surface d'échanges et milieu environnant.

Ensuite à l'échelle de l'échangeur-stockeur :

- définir un circuitage de l'air et les surfaces adaptées selon les conditions extérieures voulues,
- optimiser l'ensemble écoulement d'air, surfaces adaptées et MCP adéquat,
- valider expérimentalement les connaissances théoriques produites ainsi que le modèle de simulation,
- simuler le comportement thermique d'un échangeur-stockeur.

A l'échelle systémique environnement/échangeur :

- définir l'algorithmique et les modèles associés à l'outil d'aide à la décision.

Enfin, les verrous scientifiques s'accompagnent de verrous techniques à débloquent :

- simuler le couplage Système/Bâtiment,
- maîtriser l'évolution de la forme du MCP solide et la cinétique de fusion/solidification.

1.5 Plan de thèse

Afin de répondre aux enjeux industriels et de débloquent les verrous techniques et scientifiques qui ont été identifiés, le travail de thèse présenté dans la suite de ce manuscrit s'articule autour de 4 axes dont le synoptique est présenté en figure 1. 23.

Chapitre 2

Tout d'abord l'analyse de l'existant est réalisée concernant les matériaux, les échangeurs-stockeurs et les systèmes. Les MCP utilisables pour l'application de rafraîchissement dans le bâtiment sont répertoriés et classés. De plus, des articles scientifiques récents concernant les transferts thermiques dans les MCP ainsi que le comportement mécanique du MCP lors du changement de phase sont analysés. Les différents échangeurs-stockeurs développés dans la littérature sont présentés et comparés ainsi que leur intégration dans le bâtiment.

Chapitre 3

Un modèle de simulation thermique de l'échangeur-stockeur est ensuite présenté. Ce modèle simule des cycles complets, c'est-à-dire, rafraîchissement de l'air et régénération de la phase solide. Dans le cadre du développement s'appuyant sur les deux prototypes existants, le modèle est adapté aux échangeurs-stockeurs composés d'encapsulations rectangulaires soumises à un écoulement d'air horizontal. Les phénomènes dominant lors de la fusion du MCP sont la convection naturelle et la fusion par contact : en effet, la phase solide, plus dense que la phase liquide est soumise à la gravité et à la poussée d'Archimède, tombe au fond de l'encapsulation ; ainsi la phase solide du MCP reste à proximité de la surface intérieure de l'encapsulation favorisant les transferts thermiques. Le modèle développé est ensuite couplé à un programme de simulation

Thermique Dynamique (STD) du bâtiment. Ce couplage est appelé co-simulation car il permet de simuler simultanément le système et le bâtiment dans lequel il est installé. La réponse dynamique du système dépendant de la température intérieure pour le rafraîchissement et de la température extérieure pour la régénération, cette stratégie permet d'évaluer les performances du système in situ.

Chapitre 4

La validation expérimentale consiste, dans un premier temps, à comparer les résultats expérimentaux obtenus avec des conditions aux limites maîtrisées, avec les résultats numériques obtenus par le modèle de simulation avec les mêmes conditions aux limites. Cette comparaison, réalisée sur 3 configurations d'échangeur-stockeurs (prototype N°1, prototype N°2 position horizontale, prototype N°1 position horizontale), permet de valider les hypothèses ainsi que leur domaine de validité concernant le comportement du MCP et les corrélations des coefficients d'échanges. La co-simulation est validée également en comparant les résultats du suivi de la maison NAPEVOMO avec le système de rafraîchissement. Après une vérification du modèle de maison sans le système de rafraîchissement étudié, les résultats de la co-simulation sont comparés aux résultats de la maison équipée du système de rafraîchissement et d'un convecteur électrique forçant la surchauffe de la maison.

Chapitre 5

Enfin, un premier outil d'optimisation est proposé comme application du modèle développé. En s'appuyant sur une analyse fonctionnelle du système, les critères sont définis et uniformisés par l'intermédiaire de la méthode de monétisation. Ces critères alors définis sur une même échelle de valeur peuvent être agrégés sous une même fonction-objectif qui pourra alors être optimisée en fonction des variables de conception préalablement définis.

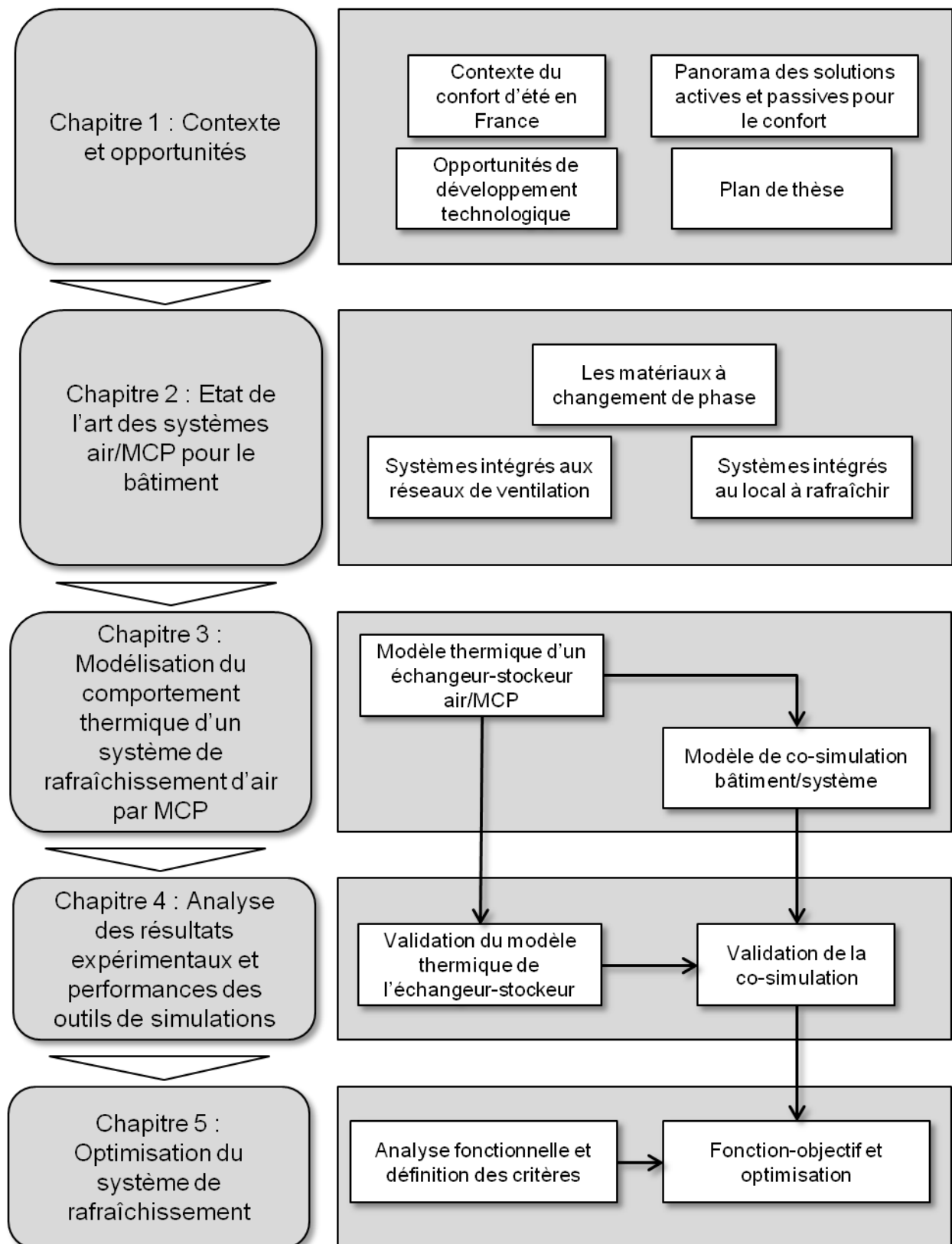


Figure 1. 23 : Synoptique du plan de thèse