

# **Problématique énergétique dans l'habitat : impact environnemental, besoins et moyens de production.**

La principale conclusion du 5ème rapport du "IPCC" (Inter-governmental Panel on Climate Change) est qu'une augmentation de la température moyenne excédant 2 °C aurait des conséquences dramatiques et irréversibles sur l'environnement. Les secteurs résidentiel et tertiaire sont les plus importants consommateurs d'énergie en Europe et en France avec 45% de l'énergie finale consommée [1]. Ces secteurs, qui sont également responsables de 21% des émissions de gaz à effet de serre [2], font donc partie des leviers prioritaires dans la lutte contre le réchauffement climatique. C'est dans cet objectif que la Commission européenne a mis en place en 2014 le paquet Energie-Climat 2030, faisant suite au paquet Energie-Climat 2020. Cet accord vise à réduire, à l'horizon 2030, les émissions de gaz à effet de serre de 40 % par rapport au niveau de 1990, à faire progresser la part des énergies renouvelables dans le mix (ou bouquet) énergétique à 27% et à augmenter l'efficacité énergétique de 27 % [3]. En plus d'améliorer l'isolation des logements existants afin de réduire leur consommation énergétique, une solution partielle consisterait à remplacer les combustibles fossiles encore communément utilisés dans le secteur résidentiel au profit de sources d'énergie renouvelable pour répondre aux besoins domestiques divers tels que le chauffage, le rafraîchissement et la production d'électricité. L'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes actuels pourrait également passer par le recours à des systèmes de micro-cogénération et trigénération ; la coproduction de chaleur et d'électricité permet en effet de réduire significativement les pertes comparativement à une production d'électricité seule. Autre avantage, une production locale des besoins de l'habitat permet de réduire les pertes liées au transport de l'énergie.

Au travers de ce chapitre, l'impact environnemental et les différents besoins du secteur résidentiel seront plus amplement détaillés. Nous verrons également que l'énergie solaire présente de nombreux intérêts et doit être mieux valorisée au sein du secteur résidentiel pour diminuer sa dépendance aux énergies fossiles. Enfin, une présentation des différentes technologies de cogénération et trigénération présentes dans le secteur résidentiel sera effectuée. Celle-ci permettra de comparer par la suite leurs performances à celles du procédé thermo-hydraulique étudié dans le cadre de ce travail.

## **1. Impact environnemental lié au secteur résidentiel**

L'impact environnemental de la production/consommation de l'énergie est communément évalué par l'intermédiaire du Pouvoir de Réchauffement Global (PRG ou GWP en anglais). Le PRG vise à pondérer l'impact de toutes les substances qui contribuent à l'accroissement de l'effet de serre ; celui-ci étant très variable en fonction des gaz, on trouvera entre autres le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub>, le N<sub>2</sub>O, les HFC, les PFC, le SF<sub>6</sub> et le NF<sub>3</sub>. Le PRG est exprimé en équivalent CO<sub>2</sub>. Par définition, l'effet de serre attribué au CO<sub>2</sub> est fixé par référence à 1. Avec un PRG de 25, l'émission d'1 kg de CH<sub>4</sub> équivaut à l'émission de 25 kg de CO<sub>2</sub>. À titre informatif, les PRG de différents composés sont donnés dans le Tableau I.1 :

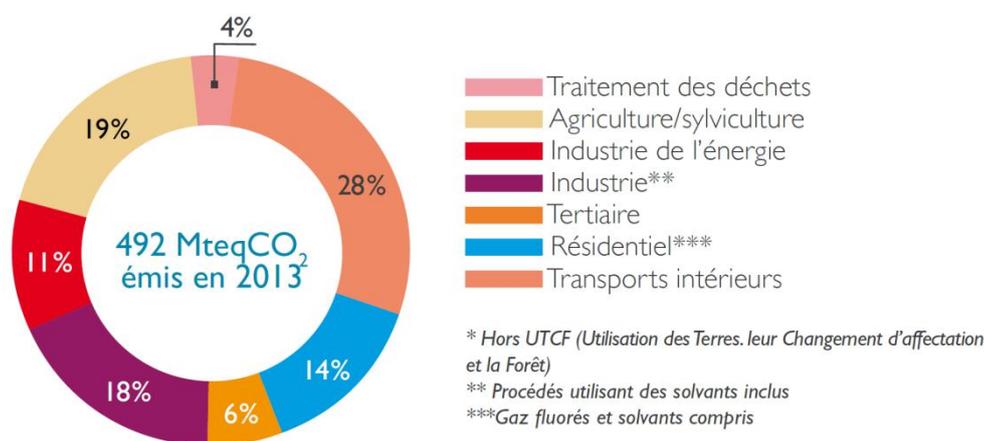
**Tableau I.1 : PRG des différents gaz tels que définis par le GIEC**

Gaz à effet de serre	PRG
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	25
N <sub>2</sub> O	298
SF <sub>6</sub>	22800
NF <sub>3</sub>	17200
HFC	PRG variable selon les HFC considérés (leur valeur moyenne est de 2093)

Cet indicateur est calculé sur la base d'un horizon de temps fixé à 100 ans afin de tenir compte de la durée de vie des différentes substances dans l'atmosphère.

En France en 2013, le PRG total, lié au total des émissions de gaz à effet de serre pendant une année, est estimé à 492 Mt (million de tonnes) d'équivalent CO<sub>2</sub> [1], pour un puits de carbone, majoritairement représenté par le parc forestier français, qui ne capte que 49 Mt d'équivalent CO<sub>2</sub> par an. La contribution nette de la France en 2013 aux émissions de GES, est donc de 443 Mt d'équivalent CO<sub>2</sub>. Il faut rappeler ici que la France avec le reste de l'Europe s'est engagée à réduire ses émissions de CO<sub>2</sub> via le paquet énergie climat de 2020 et 2030. En comparaison le PRG de la France en 1990 était de 505 Mt d'équivalent CO<sub>2</sub> en tenant compte des puits de carbone. Soit une réduction de 15% en 2013. Cet effort doit donc être poursuivi et intensifié pour atteindre une réduction de 40% en 2030 comparativement aux valeurs de 1990.

Les secteurs résidentiel et tertiaire jouent un rôle essentiel dans cette transition. D'une part, car ils représentent à eux deux 20% des émissions de GES, soit le 3ème émetteur de GES après le transport et l'industrie (Figure I-1).

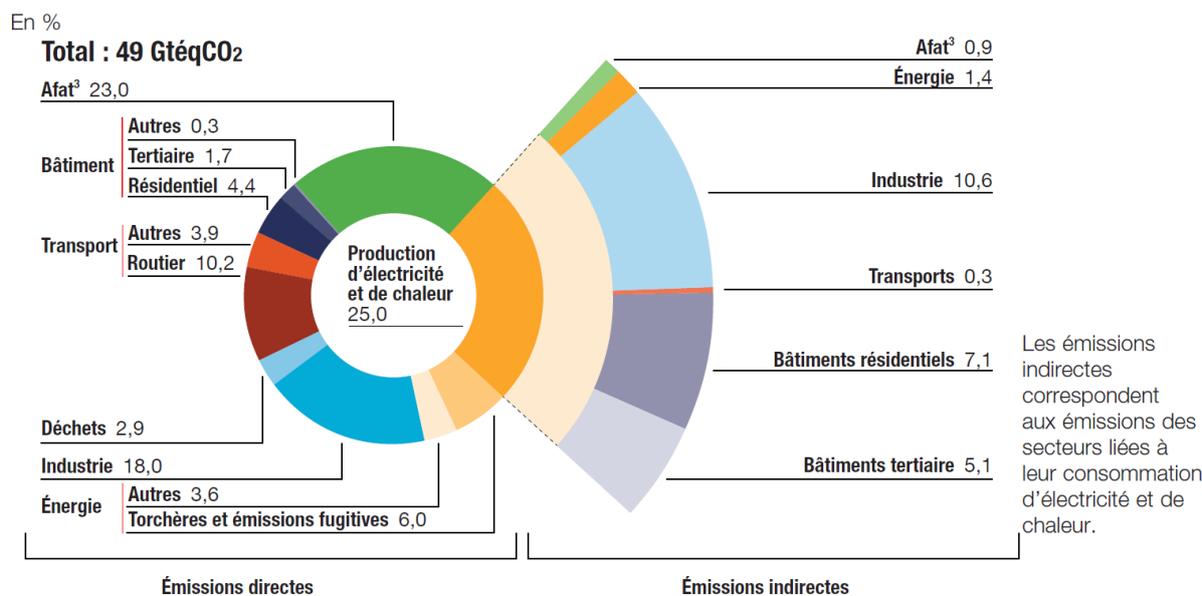


**Figure I-1 : Répartition des émissions françaises de GES par secteur en 2013. Extrait : Climat, Air, Énergie 2015 [1]; Source : CITEPA - Rapport Secten - Plan Climat Kyoto 2015 [2]**

D'autre part les PRG entre 1990 et 2013 des secteurs de la transformation d'énergie, de l'industrie manufacturière et de l'agriculture ont diminué de 31%, 35% et 6% respectivement. Les secteurs du résidentiel/tertiaire et du transport ont augmenté de 10% et 11% [2].

Dans le reste du monde si la répartition des émissions de GES par secteurs est bien différente, le secteur résidentiel/tertiaire joue également un rôle important. Comme on peut le voir dans la

Figure I-2, le secteur résidentiel/tertiaire représente une part notable des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> liées à la consommation d'électricité et de chaleur. Celles-ci s'élèvent à 6,1% pour ce qui concerne la construction et 12,2% d'émissions indirectes liés à la consommation d'énergie. Avec un total de 18,3%, le secteur résidentiel/tertiaire est le troisième plus gros émetteur d'équivalent CO<sub>2</sub> après l'industrie, l'agriculture et le secteur des transports.



Afat : agriculture, foresterie et autres affectations des terres.

Source : Giec, 3<sup>e</sup> groupe de travail, 2014

**Figure I-2 : Répartition des émissions mondiales de GES par secteur en 2014.**

En France, afin de limiter l'impact environnemental de ce secteur, plusieurs stratégies peuvent être envisagées :

- Une réduction des besoins, via l'amélioration de l'isolation pour les habitations existantes, que ce soit des murs, des toitures, des fenêtres, ou via des orientations et design optimisés pour les habitations neuves.
- Une amélioration de l'efficacité énergétique, grâce à une amélioration des performances des différents appareils consommateurs d'énergie tels que le chauffage, les réfrigérateurs, les luminaires, etc.
- Un remplacement des sources d'énergie fossile par des sources d'énergie renouvelable.
- Une localisation des moyens de production d'énergie au plus près des consommateurs pour limiter les pertes par transport.

Ces différentes solutions sont déjà mises en pratique, notamment du fait des réglementations thermiques de plus en plus contraignantes, RT2005, RT2012 et prochainement la RT2020 qui visent à généraliser des bâtiments à énergie positive (producteur d'énergie et non consommateur). Toutefois le secteur résidentiel avec un taux de renouvellement d'à peine 1% par an, peine à se moderniser. Aujourd'hui encore, 54% du parc immobilier français a été construit avant 1975 quand aucune réglementation thermique n'était encore en vigueur. Les pouvoirs publics en sont conscients et essayent régulièrement de renforcer le marché de la rénovation via l'information et

différents avantages fiscaux. Le défi du secteur résidentiel et tertiaire est important, mais les possibilités sont grandes. Celles-ci seront étudiées dans la suite de ce chapitre.

## **2. Ressources et besoins énergétiques du secteur résidentiel**

En 2012 en France les secteurs résidentiel et tertiaire sont responsables de 45% de la consommation d'énergie finale, dont 26% pour le seul secteur résidentiel [1], soit une consommation moyenne par foyer de **16565 kWh/an**. La disparité des consommations est à prendre en compte ; elles reposent sur plusieurs facteurs tels que la superficie de l'habitation, la zone climatique, la qualité de l'isolation, le nombre d'habitants ou même leurs habitudes de consommations. Dans le secteur résidentiel, cette consommation est principalement issue de besoins thermiques (environ 80%) et de besoins d'usage spécifique de l'électricité (20%).

Ces logements peuvent également disposer de différentes sources d'énergie locales pour subvenir à ces besoins, tels que le soleil, le vent ou la géothermie.

Les paragraphes suivants visent à analyser ces besoins et les quantifier. Il est important d'identifier dès à présent ces besoins afin que les réponses proposées aujourd'hui, qui nécessitent parfois d'importants investissements, restent adaptées aux besoins de demain. La ressource solaire à disposition sera également quantifiée et discutée selon les différents moyens (actifs ou passifs) permettant de la valoriser.

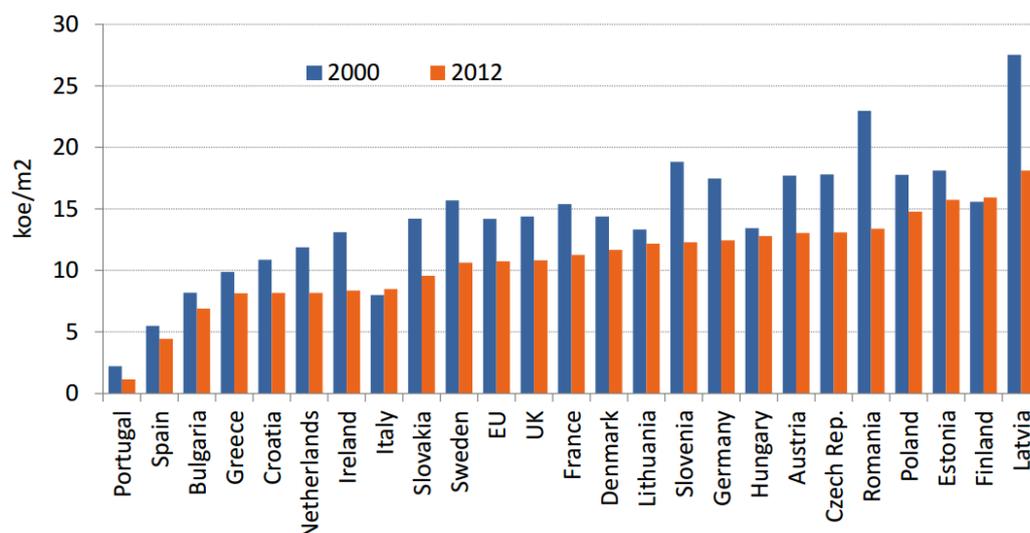
### **2.1. Besoins thermiques du secteur résidentiel**

En France, les besoins thermiques représentent la majeure partie des besoins énergétiques du secteur résidentiel, approximativement 80%. Néanmoins cette part doit diminuer au fur et à mesure du remplacement des habitations, conséquence directe des réglementations thermiques mises en place. Ces besoins thermiques dépendent aujourd'hui principalement du chauffage, et accessoirement de l'eau chaude sanitaire et de la cuisson des aliments, mais à l'avenir la part chauffage devrait grandement baisser.

#### **2.1.1. Besoins thermiques pour le chauffage**

Les besoins de chauffage dépendent très fortement du climat, comme on peut le constater sur la Figure I-3. Les besoins en chauffage dans la zone Euro sont très différents entre les pays du nord et ceux du sud. Par exemple, la consommation moyenne annuelle s'élève à 50 kWh/m<sup>2</sup> en Espagne, alors qu'elle dépasse les 175 kWh/m<sup>2</sup> en Finlande.

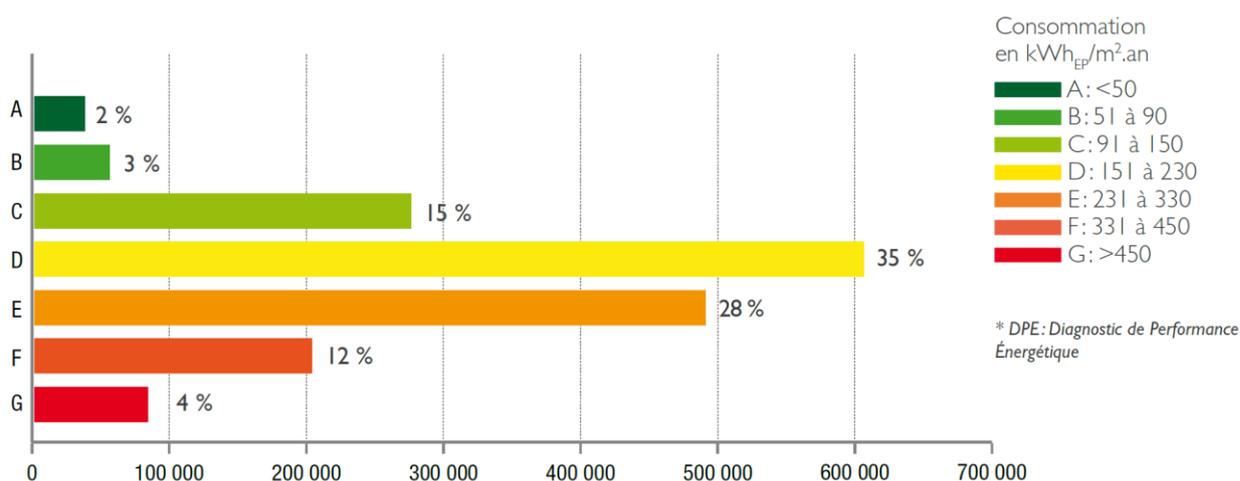
En France la consommation moyenne annuelle pour le chauffage est de 11 kWh/m<sup>2</sup> soit approximativement **128 kWh/m<sup>2</sup>**. Mais cette valeur moyenne cache également de nombreuses disparités entre les vieilles bâtisses mal isolées dont la consommation d'énergie primaire est supérieure à 450 kWh/(m<sup>2</sup>.an) et les logements récents dont la réglementation thermique RT2012 limite la consommation d'énergie primaire à un maximum de 50 kWh/(m<sup>2</sup>.an) en moyenne (des corrections pouvant être apportées en fonction des zones climatiques).



**Figure I-3 : Evolution de la consommation de chaleur en kilogramme équivalent pétrole par m<sup>2</sup> d'habitation pour tous les pays de la zone Euro. Source : ODYSSEE MURE [4]**

Rappelons que l'énergie primaire est l'énergie potentiellement contenue dans les ressources naturelles (bois, gaz, pétrole, etc.) avant toute transformation (en pratique de combustion), alors que pour l'électricité, il faut tenir compte du rendement de conversion thermique/électrique ; ainsi on considère qu'actuellement 1 kWh d'énergie finale sous forme électrique équivaut à 2,58 kWh d'énergie primaire thermique.

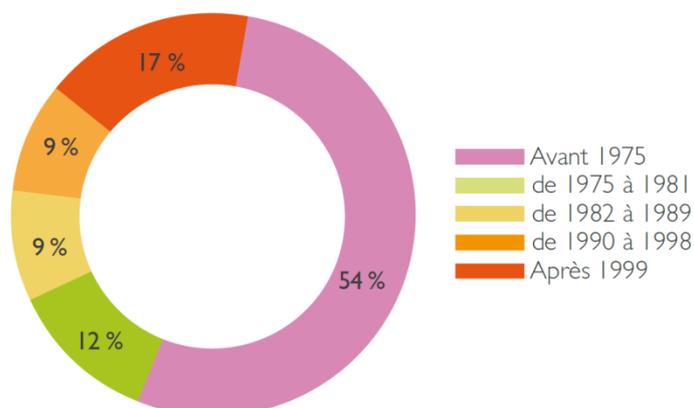
La disparité énergétique des logements peut être constatée à l'aide des diagnostics de performance énergétiques (DPE) effectué sur le territoire français (Figure I-4). Il faut toutefois noter que les statistiques représentées dans la Figure I-4 ne concernent que les DPE collectés avant 2013 et ne sauraient donc être représentatives de l'ensemble du parc de logement.



**Figure I-4 : Performance énergétique du parc de logements au regard des DPE collectés avant 2013. Source : Observatoire DPE - décembre 2015**

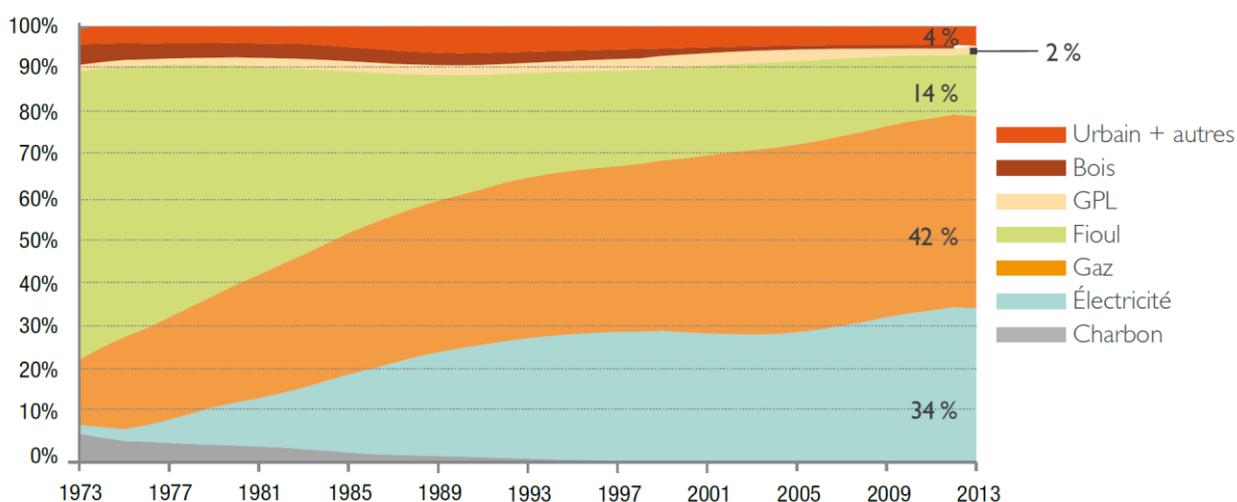
Ainsi en France, 54% des logements sont de construction antérieure à 1975 (Figure I-5) ; la forte présence de bâtiments anciens explique la part élevée du chauffage dans la consommation d'énergie du secteur résidentiel. Si aujourd'hui le chauffage représente 61% des besoins d'énergie, contre seulement 12,1% pour les besoins d'eau chaude sanitaire, la part de chauffage

devrait se réduire dans l'avenir avec l'amélioration de l'isolation engendrée par les différentes réglementations thermiques mises en application depuis les années 2000.



**Figure I-5 : Structure du parc de résidence principale français par période de construction. Source : CEREN - « Données statistiques - Parc et consommations d'énergie du résidentiel » - août 2015 (données 2013)**

Cependant, la mauvaise isolation des bâtiments du parc français ne suffit pas à expliquer son impact environnemental. La Figure I-6 représente la répartition du parc de résidences françaises selon l'énergie de chauffage. Le chauffage, en plus d'être le premier consommateur d'énergie du secteur résidentiel, repose encore principalement sur les énergies fossiles (56%), le gaz se substituant au fioul au fil des années, celui-ci étant moins coûteux. L'électricité prend également de plus en plus de place dans ce mix, notamment en raison de son faible prix à l'installation des émetteurs. Si en France la production d'électricité est largement décarbonée grâce à ses centrales nucléaires, la part grandissante d'électricité pour les besoins de chauffage pose des problèmes de pics de consommation difficiles à réguler pendant les périodes hivernales de grand froid.



Source : CEREN - « Données statistiques - Parc et consommations d'énergie du résidentiel » - août 2015  
Champ : France métropolitaine

**Figure I-6 : Évolution de la répartition du parc de résidences principales selon l'énergie de chauffage principal en France. Source : CEREN**

Il faut toutefois préciser que si le chauffage électrique assure toujours une part importante du chauffage dans les résidences neuves, les radiateurs purement résistifs sont délaissés au profit de pompes à chaleur bien plus performantes d'un point de vue consommation en énergie primaire.

En termes de technologies de chauffage, il convient de distinguer deux grandes familles :

- les systèmes centralisés, constitués d'un générateur de chaleur, d'un système de distribution, et d'émetteurs qui restituent cette chaleur ;
- les systèmes décentralisés pour lesquels la chaleur est directement générée et émise pièce par pièce.

À travers ces deux familles, on retrouve un large choix de technologies. Les principales sont présentées dans la Figure I-7.

En matière de chauffage les enjeux sont relativement clairs ; il s'agit de moderniser le parc résidentiel français afin de diminuer la consommation énergétique des ménages, puis décarboner cette consommation, de préférence à l'aide de sources d'énergies renouvelables.

Bien que le chauffage représente actuellement la majeure partie des besoins thermiques de l'habitat, la demande en matière de rafraîchissement augmente et les besoins en eau chaude sanitaire ne sont pas négligeables. Ils sont estimés dans les paragraphes suivants.

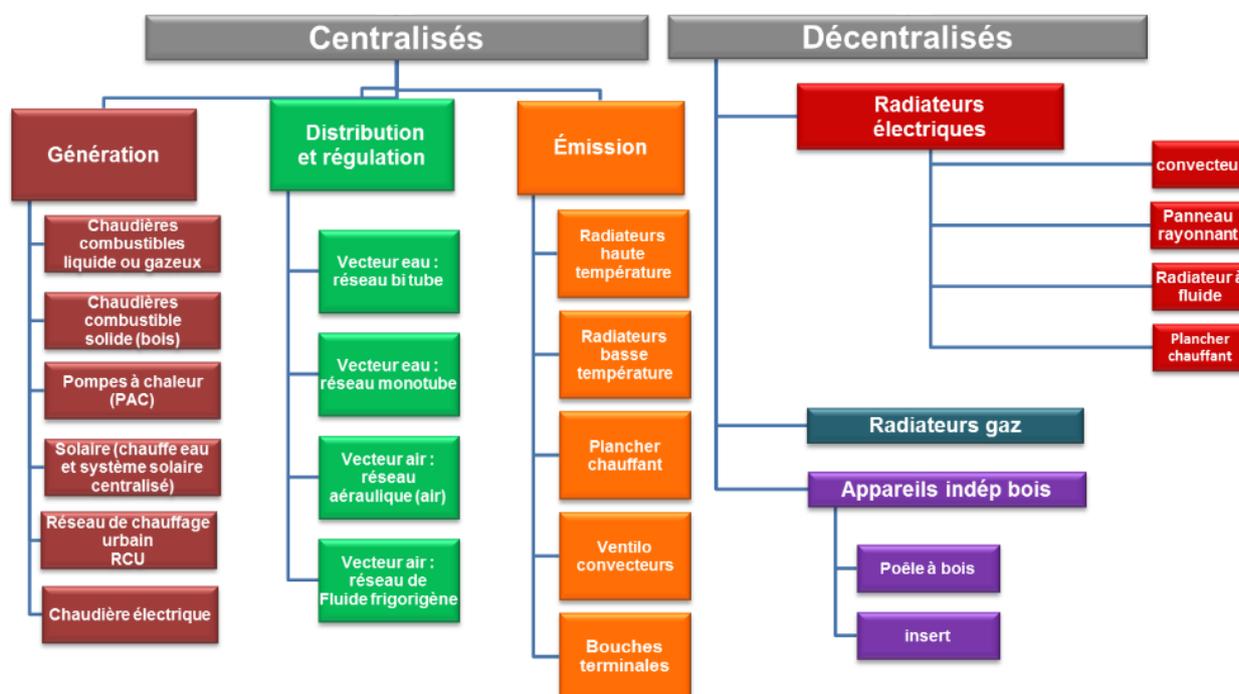


Figure I-7 : Segmentation des différentes technologies de chauffage. Source : ADEME

### **2.1.1. Besoins thermiques pour le rafraîchissement**

Les besoins de rafraîchissement dépendent, comme pour les besoins de chauffage, fortement des pays considérés et de leur situation climatique. En France ces besoins restent marginaux et concernent essentiellement le pourtour méditerranéen. Néanmoins, le faible coût de l'énergie et la baisse du prix des climatiseurs individuels, cumulés à la volonté d'un meilleur confort thermique dans les secteurs résidentiel et tertiaire ont entraîné un développement rapide de ces besoins ces dernières années.

L'explosion de la demande de systèmes de rafraîchissement actif à partir des années 2000 notamment après la canicule de l'été 2003 reste principalement due à des erreurs de conceptions de l'habitat récent qui conduisent souvent à des surchauffes inconfortables en été. Néanmoins les réglementations thermiques mises en place plus récemment, avec notamment la RT2012 incitent les architectes à privilégier les différentes techniques de rafraîchissement passif.

Le parc de bâtiments climatisés est cependant encore réduit, mais il est en constante augmentation dans le secteur tertiaire, dont les réglementations thermiques sont pour l'instant moins contraignantes que dans le secteur résidentiel. En effet, il existe une très forte disparité entre les bâtiments à usage tertiaire et ceux à usage résidentiel. Ces derniers ne sont encore que faiblement climatisés, entre 3,5% et 4,5% selon les estimations, contrairement au secteur tertiaire pour lequel près de 25% des surfaces sont climatisées.

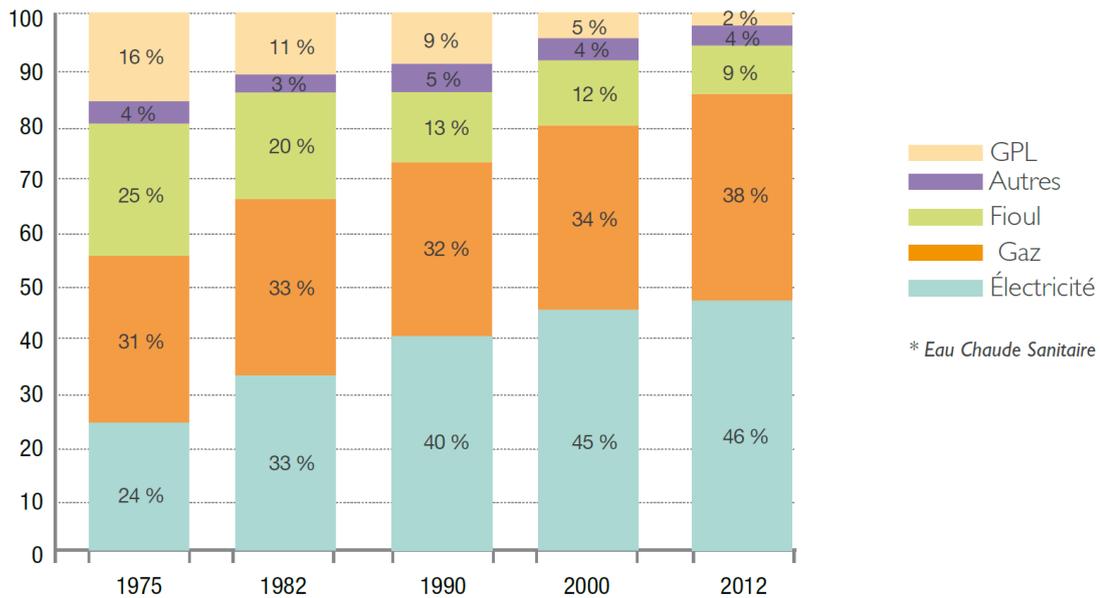
### **2.1.2. Besoins thermiques pour l'eau chaude sanitaire**

Aujourd'hui en France, la consommation d'eau chaude sanitaire (ECS) représente 12,1 % de la consommation d'énergie finale des ménages selon l'ADEME. Cette agence évalue en moyenne à **850 kWh/an** et par personne les besoins d'énergie pour l'ECS en France, avec des valeurs variant de 765 à 900 kWh/pers/an en fonction des zones climatiques.

Comme pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire est majoritairement réalisée à partir de sources d'énergie fossile (Figure I-8), mais celle-ci risque d'être prochainement supplantée par la source électrique.

Même si l'ECS reste nationalement une part relativement réduite de la consommation totale, elle est en passe de devenir l'un des premiers postes de consommation dans les bâtiments résidentiels neufs. C'est pourquoi il est également nécessaire de réduire les consommations d'eau chaude dans ces bâtiments, en agissant à plusieurs niveaux :

- En limitant les besoins d'ECS : isolation des réseaux de distribution, réduction des pertes liées au stockage, réduction des débits, modification des comportements (prendre des douches au lieu de bains, etc.) ;
- En améliorant la performance des systèmes de production d'ECS par l'intégration des énergies renouvelables et l'optimisation de la production.



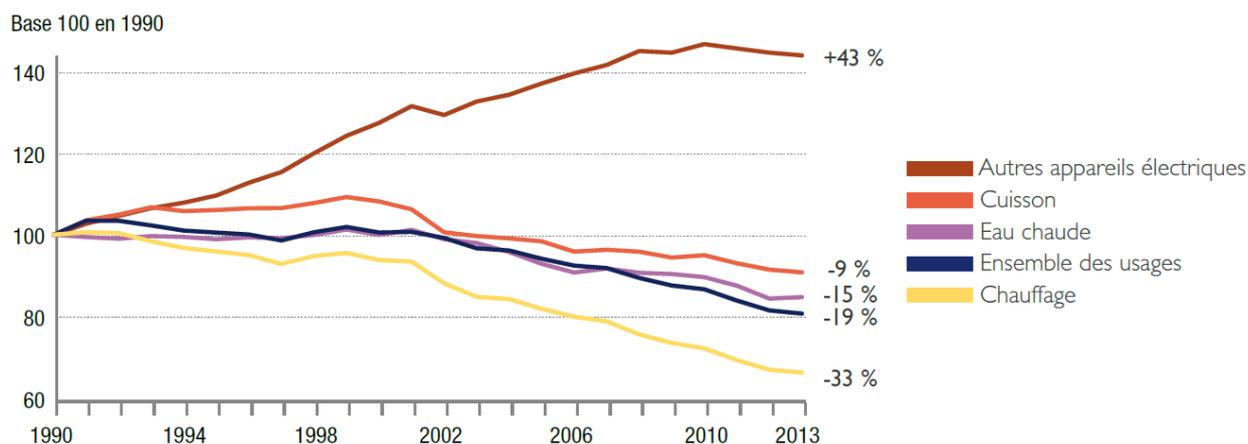
Source : CEREN - « Parc et consommations d'énergie du résidentiel » - décembre 2013  
 Champ : France métropolitaine

**Figure I-8 : Évolution de la répartition du parc de résidences principales selon l'énergie de production de l'ECS en France. Source : CEREN**

Il faut toutefois rappeler que ces actions ne doivent pas aller à l'encontre des aspects de sécurité sanitaire qui imposent de porter et maintenir l'eau à une température minimale 50°C pour limiter les développements bactériens tels que la légionelle, et à 60°C/65°C pour détruire les germes.

## 2.2. Besoin d'usage spécifique en électricité

Les usages spécifiques désignent les usages qui ne peuvent pas se faire à partir d'une autre source d'énergie que l'électricité, comme l'éclairage ou l'audiovisuel. La demande électrique du secteur résidentiel a beaucoup augmenté au cours des deux dernières décennies (+43%, voir Figure I-9). Alors qu'elle était de 13 kWh/m<sup>2</sup> par an en 1973, elle est passée à 30 kWh/(m<sup>2</sup>.an) en 2011. Ce phénomène s'explique notamment par la progression des équipements électroménagers et bureautiques. Malgré une augmentation continue de l'efficacité énergétique des appareils électriques, la diversité d'appareils et surtout la baisse de leur coût ont entraîné une explosion de leur utilisation dans les ménages. Au total en 2016, la consommation électrique spécifique moyenne d'un ménage s'élève à **3208 kWh/an**.



**Figure I-9 : Évolution des consommations finales des résidences principales en France, par logement et selon l'usage. Extrait : Climat, Air, Energie 2015 [1] ; Sources : Données statistiques CEREN 2015**

La répartition des usages spécifiques de l'électricité se fait de la façon suivante :

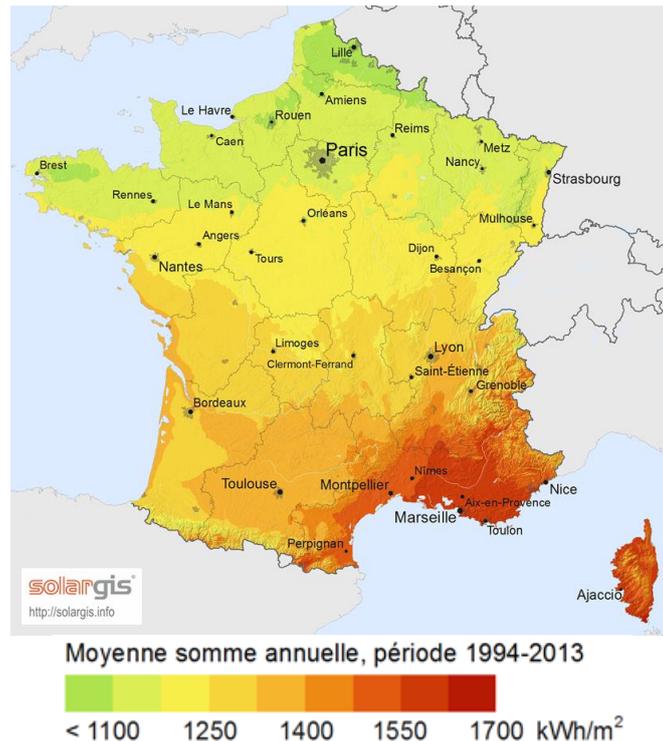
1. Froid : 23%
2. Audiovisuel : 20%
3. Informatique : 15%
4. Lavage : 15%
5. Divers (appareils électroménagers, veille) : 14%
6. Éclairage : 12%

L'éclairage ne représente finalement que 12 % de la consommation électrique liée aux usages spécifiques, le premier poste de consommation d'électricité est le froid domestique (réfrigérateur, congélateur). Si en France la production d'électricité est majoritairement d'origine nucléaire, et donc décarbonée (hors extraction du minerai), dans le reste du monde celle-ci repose encore essentiellement sur les combustibles fossiles et est donc une source importante d'émission de CO<sub>2</sub> supplémentaire.

### 2.3. La ressource solaire en France

Aujourd'hui, les différents besoins identifiés précédemment sont essentiellement assurés par des énergies fossiles et fissiles via un système de distribution qui repose essentiellement sur la centralisation des moyens de production.

Pourtant, une partie de ces besoins pourraient être produits localement via des sources d'énergie renouvelable que sont le soleil, le vent ou la géothermie, réduisant ainsi les pertes dues au transport ainsi que les émissions de gaz à effet de serre. Dans cette section, nous nous intéressons principalement à la ressource solaire qui a l'avantage d'être inépuisable et présente partout. Néanmoins elle reste inégalement répartie et est disponible de manière intermittente du fait des passages nuageux et des cycles jour/nuit. Pour le cas de la France on peut voir sur la Figure I-10 que l'irradiation globale horizontale annuelle moyenne est comprise entre 1100 et 1700 kWh/m<sup>2</sup> sur le territoire français. C'est donc une ressource non négligeable qui pourrait très bien assurer une partie des besoins du secteur résidentiel.



*Figure I-10 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale horizontale entre 1994 et 2013 en France, Source : Solargis.*

L'énergie solaire récupérable peut être encore augmentée en optimisant l'orientation et l'angle des surfaces de captation solaire. Si certains capteurs sont équipés de "trackers" permettant de suivre la course du soleil, les orientations fixes sont en général préférées, car moins complexes et moins coûteuses. À titre d'exemple, si la moyenne annuelle de l'irradiation globale horizontale à Perpignan est de **1531 kWh/m<sup>2</sup>**, un capteur avec une inclinaison optimale de 42° et orienté plein Sud est susceptible de capter annuellement jusqu'à **1730 kWh/m<sup>2</sup>**. Enfin, si l'objectif est de maximiser la récupération d'énergie en hiver, un angle de 67°, toujours orienté plein sud permettra potentiellement de récupérer quotidiennement 3,33 kWh/m<sup>2</sup> en moyenne durant le mois de décembre, contre 2,92 kWh/m<sup>2</sup> avec un angle de 33° et seulement 1,67 kWh/m<sup>2</sup> avec un capteur à l'horizontale. Ceci permet de mieux cerner l'importance de l'angle des capteurs solaires qu'ils soient thermiques ou photovoltaïques.

Néanmoins, cette énergie ne peut être récupérée intégralement, il faut en effet tenir compte du rendement de captation. Pour un capteur photovoltaïque, il varie approximativement entre 5 et 16% et pour un collecteur thermique entre 50 et 70%. Par ailleurs, le caractère intermittent de cette ressource peut nécessiter l'utilisation d'un stockage, qui induira également des pertes. Il faut également rappeler que l'énergie solaire est tout à fait apte à assurer les besoins en froid. Les principales technologies de production de froid solaire sont :

- l'utilisation d'une machine à compression mécanique de vapeur dont l'électricité nécessaire pour alimenter le compresseur est produite via des capteurs photovoltaïques ;
- l'utilisation de procédés à sorption couplés à des capteurs solaires thermiques, l'exemple le plus répandu étant le cycle à absorption (plus amplement décrit dans la suite de ce chapitre).

Ces différentes technologies sont autant de moyens, dits actifs, pour répondre aux différents besoins du secteur résidentiel via l'énergie solaire.

En plus de ces technologies, il existe également des moyens passifs pour valoriser l'énergie solaire, à condition d'intégrer cet aspect dès la conception de l'habitat. L'emploi des techniques d'écoconstruction ou d'architecture bioclimatique permet d'optimiser l'orientation de la maison, l'emplacement des ouvertures, la mise en place de casquettes, afin d'utiliser au mieux le soleil pour assurer l'éclairage naturel, mais également, de réduire les besoins de chauffage en hiver, tout en limitant les surchauffes inconfortables en été.

L'utilisation de ces procédés de valorisation de l'énergie solaire qu'ils soient actifs ou passifs est de plus en plus utilisée et renforcée par les réglementations thermiques toujours plus contraignantes. Ils deviendront même indispensables avec la mise en place de la RT2020 qui imposera à partir de 2020 à tout bâtiment neuf qu'il soit à énergie positive, c'est à dire qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment annuellement.

### **3. Les différents procédés de cogénération et trigénération applicables à l'habitat**

Comme vu précédemment, le secteur résidentiel implique des besoins en chauffage, rafraîchissement ou électricité. Parmi les approches susceptibles de répondre à ces différents besoins tout en limitant l'impact environnemental les systèmes de micro-cogénération et trigénération sont de plus en plus mis en avant. Ces solutions présentent l'avantage de pouvoir subvenir aux besoins localement, avec une grande efficacité et à partir de sources d'énergie renouvelable. En effet la valorisation de chaleur inférieure à 100 °C est un secteur de recherche de plus en plus actif [5, 6, 7, 8 et 9], dans l'objectif de rendements plus intéressants pour ces différentes technologies. Néanmoins ces technologies peinent à s'imposer sur le marché en raison de leur prix d'achat encore trop important.

Cette section a pour but de dresser un état de l'art des technologies de micro-cogénération et trigénération actuellement étudiées et commercialisées dans le secteur résidentiel et tertiaire, et plus précisément celles qui exploitent des sources d'énergie renouvelable. À ce jour, les procédés de trigénération sont encore très peu développés dans le secteur résidentiel. A contrario, les procédés de cogénération et de production de froid solaire commencent à émerger. Ces deux familles de procédés seront étudiées dans un premier temps. Dans un second temps nous étudierons les différents couplages possibles entre ces deux familles qui permettraient d'assurer par un même procédé la trigénération c'est-à-dire les trois besoins du secteur résidentiel que sont le chaud, le froid et l'électricité.

#### **3.1. Les technologies de production de chaleur et d'électricité (mCHP)**

La micro-cogénération aussi appelée mCHP pour "micro Combined Heat and Power" est la production simultanée à faible puissance (<30kW) de deux utilités énergétiques différentes par le même procédé. Le cas le plus fréquent est la production d'électricité et de chaleur, toujours à partir d'une même source d'énergie primaire, celle-ci pouvant être d'origine renouvelable ou fossile (gaz naturel, biomasse, solaire, etc.). La cogénération fait partie des techniques les plus efficaces énergétiquement, permettant d'atteindre un rendement global supérieur à 80%, bien que

le sens de ce rendement doit être considéré avec précaution. Ces rendements élevés deviennent possibles du fait de la valorisation d'une énergie généralement rejetée dans l'environnement, comme la chaleur. La cogénération représente de ce fait une véritable solution pour les économies d'énergie, car elle permet d'économiser de 15 à 30 % l'énergie primaire par rapport à une production séparée de ces mêmes quantités de chaleur et d'électricité.

La micro-cogénération a de nombreux avantages, comme la possibilité de production décentralisée. La chaleur se transportant relativement mal sur de longues distances, la micro-cogénération permet de répondre au plus près aux besoins thermiques de l'habitat et de par sa production électrique de diminuer les pertes dues au transport de l'électricité et donc indirectement les émissions de CO<sub>2</sub> qui lui sont associées [10]. La micro-cogénération permet également de réduire les pics de consommation sur le réseau national de distribution d'électricité notamment pendant l'hiver, ce qui a également pour effet de réduire indirectement les émissions de CO<sub>2</sub>.

Différentes technologies de mCHP sont actuellement sérieusement étudiées pour l'habitat, tel que les moteurs à combustion interne [11], les micros turbines [12], les piles à combustible [13] et [14], les cycles Stirling [15] et [16] ou les cycles organiques de Rankine (ORC) [17, 18 et 19]. Certaines de ces technologies manquent encore de maturité tandis que d'autres sont déjà commercialisées [5]. Nous nous intéresserons dans les sections suivantes plus particulièrement aux technologies qui semblent les plus prometteuses et les plus à même de répondre aux besoins de l'habitat exploitant une ressource solaire à basse température.

### *3.1.1. La pile à combustible*

La pile à combustible est une technologie qui exploite une réaction d'oxydoréduction (ou de combustion) le plus souvent de l'hydrogène, pour produire de l'électricité via un procédé électrochimique. La pile est alimentée en continu en hydrogène et en oxygène. L'hydrogène peut être produit à partir de gaz naturel, de méthanol, ou d'essence grâce à un procédé de reformage, mais il peut également être produit de façon renouvelable, grâce à la méthanisation ou l'électrolyse de l'eau. L'hydrogène est de plus en plus pressenti comme vecteur énergétique permettant le stockage du surplus de production d'électricité d'origine renouvelable.

Cette technologie permet d'envisager des applications tant domestiques qu'industrielles, elle permet notamment d'atteindre des rendements électriques bien supérieurs à ceux des machines thermiques traditionnelles avec des rendements électriques allant jusqu'à 60% [14], voire plus sur des systèmes à haute température couplés à une turbine à vapeur, et ce avec des rejets de polluants moindres que ceux des machines thermodynamiques classiques. Certaines piles à combustible sont également réversibles, et peuvent donc produire leur propre carburant et le stocker lorsqu'elles ne sont pas utilisées en production. Néanmoins, ces machines sont généralement optimisées pour fonctionner dans un mode de production unique, de fait, le rendement des piles à combustible en fonctionnement réversible n'est pas le même en production d'électricité qu'en production d'hydrogène [20].

Il existe différentes technologies de pile à combustible :

- les piles à combustible à oxyde solide (SOFC) qui fonctionnent à haute température (jusqu'à 1000 °C) et prévues pour des applications stationnaires avec des puissances allant de 1 kW à 2MW.
- les piles à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC), ces dernières pouvant être développées pour des applications dans les transports aussi bien que pour des applications portables ; elles travaillent à basse température.
- d'autres familles sont étudiées (AFC, PAFC, MCFC, etc.) [13], offrant chacune des caractéristiques différentes et permettant ainsi de répondre aux différents besoins électriques et thermiques.

Les plages de fonctionnement sont données dans la Figure I-11.

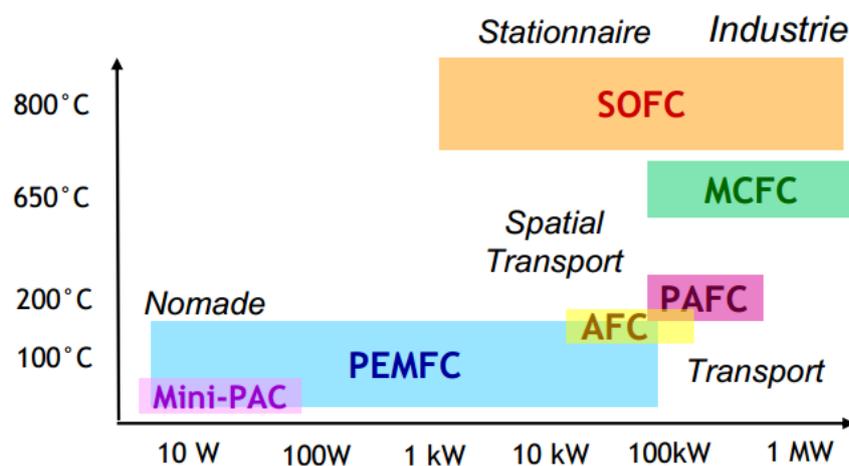


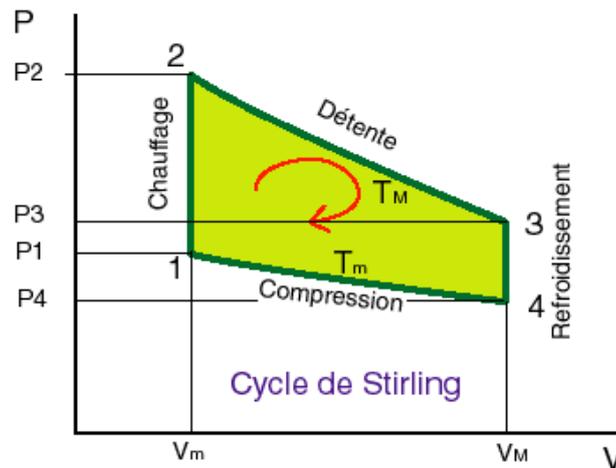
Figure I-11 : Plage de fonctionnement des différentes technologies de pile à combustible.

Toutefois, cette technologie reste encore très coûteuse, bien qu'une forte baisse des prix soit attendue [21] et sa durée de vie discutable (de 2 à 10 ans). Elle commence à percer dans le secteur du résidentiel [14], notamment au Japon du fait d'un fort soutien de l'état. Toutefois un développement à grande échelle n'apparaît pas réaliste dans un avenir proche.

### 3.1.2. Le cycle Stirling

Le cycle de Stirling est un cycle thermodynamique à apport de chaleur externe, ce qui lui donne l'avantage d'exploiter un large choix de sources d'énergies allant du fossile au renouvelable, dont le solaire. Comme toutes les machines thermodynamiques, celui-ci a besoin d'une source chaude et d'une source froide. Le fluide de travail est un gaz (souvent de l'hydrogène ou de l'hélium) qui subit deux transformations isothermes et deux transformations isochores, permettant la mise en mouvement d'un piston moteur et un piston déplaceur. Selon l'emplacement des pistons, les moteurs Stirling sont divisés en types alpha, bêta et gamma [22]. Plusieurs paramètres affectent les performances du moteur Stirling. Parmi eux : la configuration du moteur, les propriétés thermiques et physiques du fluide de travail, la différence de température entre les sources froide et chaude, la pression du moteur et l'efficacité du régénérateur [23].

Son cycle comprenant quatre phases, est présenté dans la Figure I-12 :



*Figure I-12 : Représentation schématique des 4 phases (2 isothermes, 2 isochores) du cycle Stirling.*

Si le cycle Stirling a des performances théoriques intéressantes, en pratique plusieurs inconvénients limitent son intégration sur le marché. La conductivité thermique et les échanges convectifs en phase gazeuse étant relativement faibles, les échanges thermiques entre les sources de chaleur et le fluide de travail sont peu efficaces. Ceci, en plus d'entraîner certaines irréversibilités thermodynamiques, explique la faible réactivité des moteurs Stirling. Se posent aussi des problèmes d'étanchéité, de dynamique des fluides et de volume mort. L'utilisation de fluides très peu visqueux tels que l'hydrogène pour limiter les dissipations par perte de charge dans le régénérateur rend la conception plus délicate. Cette technologie étudiée de longue date, peine à intégrer le marché du secteur résidentiel du fait de son manque de compétitivité sur le plan économique, bien qu'on commence à le trouver au sein de certains cogénérateurs. Toutefois la majorité des variantes commercialisées exploitent le gaz naturel comme source d'énergie primaire. Les variantes solaires ou biomasses [24] restent encore au stade expérimental.

En termes de performances, un bon exemple pour la cogénération dans l'habitat est de s'intéresser aux machines déjà commercialisées telles que la technologie Whispergen [15]. Ce cogénérateur fonctionne au gaz de ville et permet un rendement électrique de 7,9%, et un rendement "global" (électrique+thermique restitué) de 84,4%.

Le rendement exergetique est un bon moyen de comparer entre eux différentes technologies indépendamment de leurs températures de fonctionnement, celui-ci représente un écart à l'idéalité, c'est-à-dire par rapport au rendement maximal de Carnot. Il est défini par la relation suivante :

$$\eta_{ex} = \frac{\eta}{\eta_{Carnot}} \quad (1)$$

Le rendement de Carnot est lui-même caractérisé par les températures des sources chaude et froide :

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{froid}}{T_{chaud}} \quad (2)$$

D'après la littérature, les rendements exergetiques des cycles Stirling varient dans une large gamme, entre 1 et 40% [22] : ils sont fonction des fluides de travail utilisés, des puissances recherchées ou de la maturité des variantes étudiées. Néanmoins, les valeurs les plus élevées sont à prendre avec précaution, celles-ci ne considérant pas toujours le système dans son intégralité ou avec des conditions de fonctionnement très particulières. À ce jour, le moteur Stirling reste un marché de niche, ses coûts encore trop importants le rendant économiquement peu compétitif.

### 3.1.3. Le cycle organique de Rankine

Le Cycle Organique de Rankine (ORC) est une des variantes du cycle de Rankine, par exemple le cycle de Kalina [25] ou le cycle de Hirn [26]. Si le cycle de Rankine utilise l'eau comme fluide de travail, les ORC mettent en œuvre des fluides dits organiques (comme ceux utilisés comme réfrigérants, ou des hydrocarbures) ayant des températures d'ébullition (sous pression atmosphérique normale) inférieures à 100 °C. L'échange de chaleur entre le cycle thermodynamique et les sources/puits de chaleur est réalisé à l'état biphasique, ce qui explique que les coefficients d'échange thermique sont bien meilleurs que dans les cycles Stirling.

Les différents composants dont il est constitué sont communément utilisés dans l'industrie et bénéficient d'une bonne maturité technologique, ce qui les rend également moins onéreux. Les ORC comprennent des échangeurs de chaleur de type évaporateur et condenseur, avec parfois l'ajout d'un récupérateur pour valoriser la chaleur résiduelle en sortie de turbine, ainsi que d'une pompe pour pressuriser le liquide d'une turbine à vapeur pour récupérer l'énergie à la détente des vapeurs, et d'un alternateur pour convertir le travail mécanique en électricité. Dans le cas d'applications de très petites puissances ( $\approx 1\text{kWe}$ ), il devient néanmoins compliqué de trouver des turbines à vapeur, mais l'intérêt grandissant des ORC dans ce domaine en fait un champ de recherche très actif. Son fonctionnement relativement simple est composé de différentes étapes décrites ci-après sur le diagramme (T-S) de la Figure I-13.

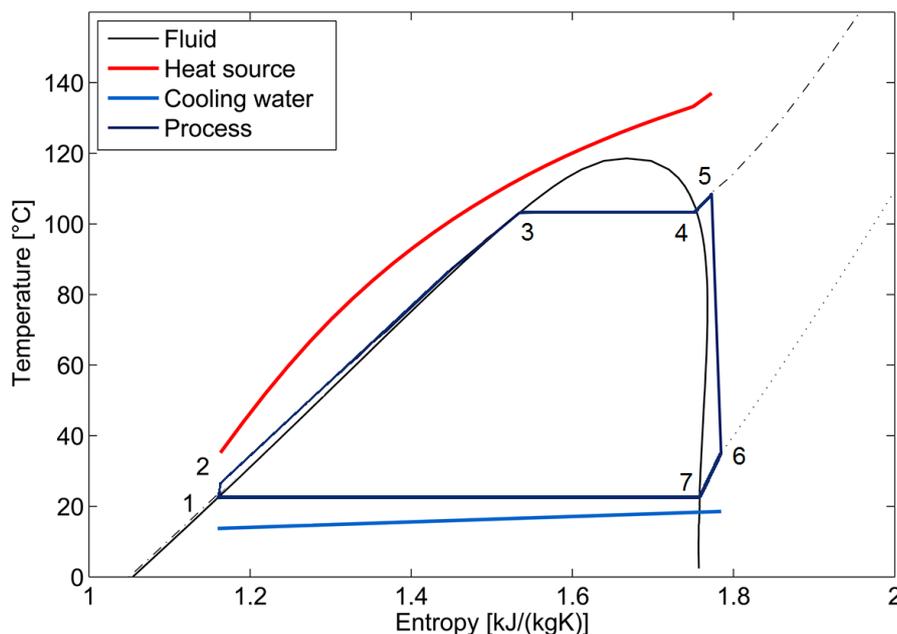


Figure I-13 : Diagramme TS décrivant le déroulement des 7 phases qui constitue le fonctionnement du cycle ORC.

Description du fonctionnement de l'ORC :

1→2 : Pressurisation du fluide de travail à l'état liquide

2→3 : Préchauffage du fluide de travail

3→4 : Évaporation du fluide de travail

4→5 : Légère surchauffe des vapeurs

5→6 : Détente du fluide de travail à l'état gazeux dans la turbine

6→7 : Récupération de la chaleur résiduelle en sortie de turbine (optionnel)

7→1 : Condensation du fluide de travail

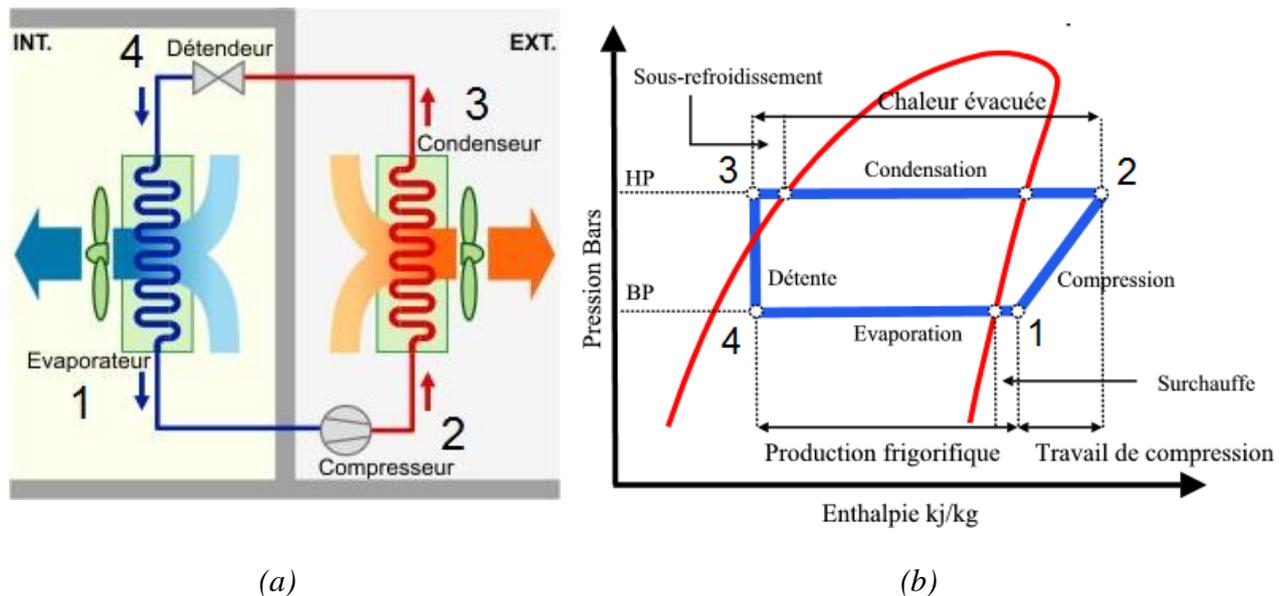
Les performances, comme pour tout cycle thermodynamique dépendent fortement du différentiel de température exploitable, mais également, à températures opératoires identiques, des fluides de travail utilisés (ce point sera plus amplement détaillé à la fin de ce chapitre). Parmi les produits déjà sur le marché, on trouve par exemple le modèle ENEFCOGEN de la société EnefTech. Ces derniers commercialisent différents modules d'une puissance électrique allant de 5 à 30 kWe. Leur rendement électrique est annoncé à 9,1%, pour un rendement de cogénération global de 95%. Les sources d'énergie peuvent être diverses, chaleur industrielle, chaudière, capteur solaire, mais nécessitent une température d'au moins 125°C. Si on s'intéresse plus particulièrement aux applications utilisant la ressource solaire, l'efficacité globale (électricité/irradiation solaire incidente) varie entre 2 et 8% en considérant l'ensemble du système incluant la captation [27], soit des rendements exergetiques de l'ordre de 10 à 20%. Ces rendements relativement faibles s'expliquent du fait de différentiels de température exploitables peu élevés, de l'ordre de 100 °C, mais aussi du fait des rendements des différents composants qui constituent l'ensemble du procédé : capteur solaire (50% à 70%), turbine à vapeur (60 à 70%) génératrice (90 à 95%). La récupération de la chaleur au niveau du condenseur permet d'atteindre des rendements de cogénération allant de 80 à 90%, mais engendre un ratio production électrique/production thermique relativement faible, variant de 1/4 à 1/8, selon la température de la source de chaleur.

### **3.2. Les technologies de production de froid**

La production de froid à partir d'énergie renouvelable est également un secteur de recherche en pleine expansion, notamment via la valorisation de l'énergie solaire [28, 29, 30]. La production de froid par voie solaire a l'avantage d'une adéquation favorable entre les besoins en froid et la ressource solaire. Parmi ces technologies on retrouve les systèmes à sorption de type absorption liquide/gaz et adsorption solide/gaz [31], à roue desséchante [32], les procédés thermochimiques [33], les cycles ORC couplés à une machine à compression mécanique de vapeurs ou pompe à chaleur (PAC), utilisant soit un seul et même fluide de travail [34, 35, 36] soit deux fluides de travail différents [37], ou enfin les machines à compression mécanique de vapeur alimentées par des panneaux photovoltaïques (PAC+PV) [38]. La plupart de ces procédés sont encore au stade expérimental. Seuls les procédés à sorption notamment ceux à absorption et les procédés PAC+PV, ont atteint un niveau de maturité suffisant pour permettre leur intégration sur le marché ; ces deux procédés sont donc un peu plus détaillés dans les sections suivantes.

### 3.2.1. Les machines à compression mécanique de vapeur

La machine à compression mécanique de vapeur est la technologie la plus répandue en production de froid, elle est également appelée pompe à chaleur (PAC) quand elle est réversible (l'utilité est la production de chaud ou la production de froid). Elle consiste à produire du froid via l'évaporation d'un fluide réfrigérant. Le cycle est composé de 4 phases (évaporation, compression, condensation et détente), qui peuvent être visualisées sur le schéma de principe et le diagramme de Mollier (P vs h) dans la Figure I-14.



**Figure I-14 : Description d'une machine à compression mécanique de vapeur (a) Schéma de principe de la machine frigorifique (b) Diagramme de Mollier du cycle frigorifique.**

Un des avantages de la PAC réside dans l'inversion aisée du mode fonctionnement été/hiver. En effet, il suffit d'inverser via une vanne 4 voies le sens de circulation du fluide de travail pour passer du mode production de froid au mode production de chaleur, et ce pour un coût sensiblement équivalent. Autre avantage, les deux-tiers environ de l'énergie fournie en mode chauffage sont captés dans l'air extérieur, ce qui en fait des machines électriques bien plus efficaces, du point de vue exergétique, que les chauffages classiques à effet Joule.

Les PAC sont sur le marché depuis de nombreuses années, et de ce fait, ont profité de différentes améliorations [39] tel que le "power inverter" ou "l'injection flash" qui consistent respectivement à améliorer la puissance frigorifique de la machine et rendre possible son fonctionnement jusqu'à  $-25\text{ °C}$ . Ces innovations ainsi que d'autres peuvent être cumulées pour donner des produits très aboutis répondant à des besoins très spécifiques. C'est le cas par exemple de la technologie "Zubadan" développée par la marque japonaise Mitsubishi qui permet entre autres un fonctionnement par grand froid (jusqu'à  $-25\text{ °C}$ ) et un maintien de la puissance nominale calorifique jusqu'à  $-15\text{ °C}$ .

Les performances de ces systèmes sont évaluées par leur coefficient de performance électrique,  $COP_e$ , qui représente la quantité de froid produite par rapport à l'électricité consommée par la machine. Le  $COP_e$  des PAC air/air est généralement compris entre 3,2 et 4,5, alors que celui des PAC air/eau et eau/eau est supérieur et compris entre 4,2 et 5,2 dans les conditions de test standard EN 14511 [40].

Néanmoins, toutes ces technologies nécessitent une alimentation électrique pour faire fonctionner le compresseur. Elles ne peuvent donc être considérées comme des énergies renouvelables qu'à la condition que l'électricité consommée soit produite via un dispositif exploitant une source d'énergie renouvelable dont il faudra prendre en compte l'efficacité dans le calcul des performances globales.

### 3.2.2. Les cycles à sorption

Le principe de fonctionnement des machines à absorption est de plus en plus étudié avec l'avènement des énergies renouvelables [41], il repose sur le phénomène de sorption d'une vapeur par une solution. Les couples de fluide absorbant/réfrigérant les plus utilisés sont en général le LiBr/eau et eau/ammoniac. Le fonctionnement du procédé est décrit dans la Figure I-15 :

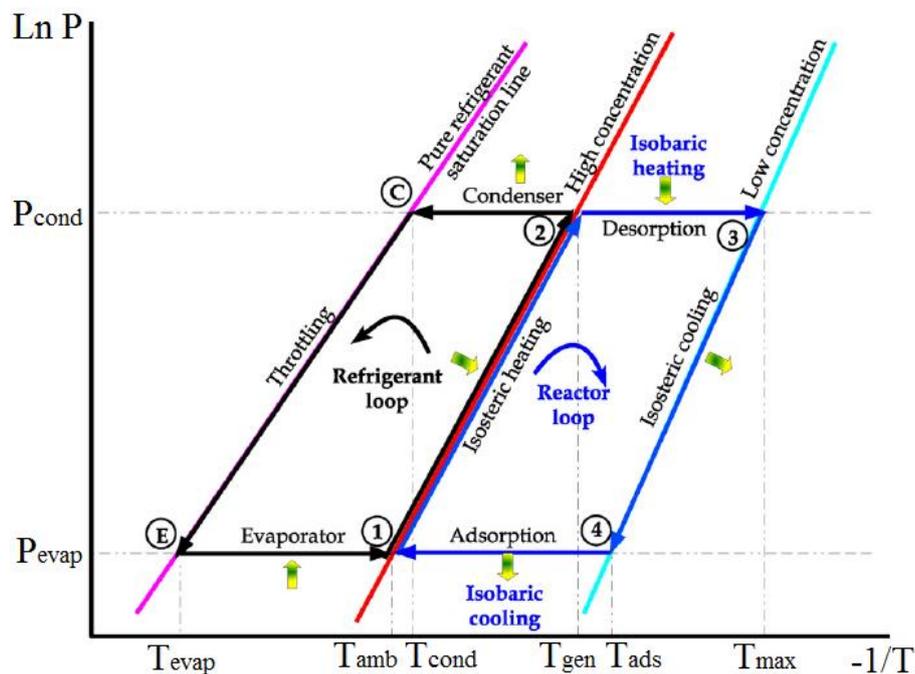


Figure I-15 : Schéma de Clapeyron d'une machine à absorption basique, [41]

Le fonctionnement des machines à adsorption est légèrement différent. L'adsorbant étant solide, il est impossible de le faire circuler via une pompe vers la source de chaleur pour être régénéré. La machine fonctionne donc de manière cyclique. Deux réservoirs contenant l'adsorbant, fonctionnant en opposition de phase, servent tour à tour d'adsorbeur et de désorbeur. Dans un premier temps, le premier adsorbant est utilisé pour la production de froid, tandis que le second est chauffé pour être régénéré. Lorsque le premier adsorbant est saturé, il est remplacé par le second pour la production de froid, et est alors lui-même régénéré.

Pour ces deux technologies à sorption de gaz, différentes solutions permettent d'améliorer leur efficacité, en mettant en œuvre des récupérations internes d'énergies ou en valorisant certains rejets de chaleur. La mise en œuvre de ces récupérations internes aboutit à des systèmes multi-effets plus performants, mais plus complexes et qui nécessitent néanmoins des températures de fonctionnement plus élevées. La variante dite simple effet (variante de base) nécessite ainsi une source chaude avec une température supérieure à 80 °C pour fonctionner, elle reste donc accessible en climatisation solaire via des capteurs solaires plan ou sous vide. La variante à double effet nécessite elle des températures supérieures à 140 °C en général. Ce qui rend son utilisation plus complexe dans le cadre d'un procédé solaire.

Autre technologie de production de froid similaire, la production de froid thermochimique, alors que les cycles à adsorption reposent sur la fixation des molécules d'un fluide en surface d'un solide, les procédés thermochimiques stockent et déstockent la chaleur au travers d'une réaction chimique qui permet en théorie d'atteindre des densités énergétiques plus importantes [42, 43]. Toutefois cette dernière technologie est moins mature que les cycles à ab/adsorption, certaines applications commerciales existent, mais elles sont pour l'instant réservées à des marchés de niches.

En termes de performances, celles-ci sont mesurées via le  $COP_{th}$  (thermique), qui correspond au froid produit comparativement à la chaleur consommée. Les cycles à absorption simple effet permettent d'atteindre des  $COP_{th}$  allant de 0,5 à 0,8 [44 et 28]. Les cycles à absorption double effet peuvent eux atteindre des  $COP_{th}$  allant de 0,8 à 1,2. On trouve également des procédés à absorption triple effet atteignant des  $COP_{th}$  allant jusqu'à 1,7 mais ceux-ci nécessitent des températures de fonctionnement supérieures à 200 °C. En ce qui concerne les cycles à adsorption les performances sont légèrement plus basses avec des performances allant de 0,3 à 0,7 pour les cycles à simple effet et jusqu'à 1,2 pour les doubles effets [28 et 45].

### **3.3. Les procédés de micro-trigénération (mCCHP)**

Les procédés de trigénération ou "CCHP" pour Combined Cooling, Heating and Power, regroupent tous les procédés qui permettent la production simultanée ou non de 3 types d'énergies, en général de la chaleur, de l'électricité et du froid et donc, qui couvrent tous les besoins énergétiques du secteur résidentiel.

Actuellement, très peu de technologies de trigénération sont commercialisées dans le secteur résidentiel, si certaines technologies sont relativement matures, l'investissement nécessaire est encore trop élevé pour permettre leur implantation sur le marché. Toutefois, c'est un secteur de recherche de plus en plus actif [46, 47, 48]. Les procédés de trigénération sont en majorité des procédés de cogénération décrits précédemment, couplés à un des procédés de production de froid. Ce couplage peut être réalisé de différente façon, ainsi deux familles principales de procédé de trigénération se distinguent [5].

D'une part, dans les procédés CCHP couplés en cascade thermique, c'est la chaleur évacuée par le procédé de cogénération qui est utilisée pour faire fonctionner un procédé de production de froid, le plus étudié étant le couplage à un procédé de sorption [46, 49].

D'autre part, les procédés CCHP mettant en œuvre un transfert de travail : c'est la production de travail ou d'électricité par un cycle moteur qui sert à alimenter un procédé de type pompe à chaleur pour assurer les besoins de chaud en hiver et de froid en été. On parlera dans ce cas de couplage travail ou de récupération de travail. La technologie la plus mature actuellement, et ne nécessitant qu'une source d'énergie renouvelable, est l'alimentation d'une pompe à chaleur par des panneaux solaires photovoltaïques [36 et 45]. Mais d'autres solutions existent, tel que le couplage entre une pompe à chaleur et un ORC [46 et 47]. Ces deux familles de procédés sont plus détaillées dans les sections suivantes.

### 3.3.1. Procédés de trigénération à couplage thermique

Les procédés de trigénération à couplage thermique définissent des assemblages de différentes technologies pour permettre la production simultanée ou non, de chaleur, de froid et d'électricité [5 et 44]. À titre d'exemple, un procédé de cogénération (ORC, Stirling, pile à combustible, etc.) permet de produire d'une part de l'électricité et d'autre part de la chaleur, dont une fraction peut être récupérée pour alimenter un procédé thermique de production de froid (à absorption, adsorption ou roue desséchante). Le fonctionnement simultané de ces deux procédés permet alors de fournir de la chaleur, du froid et de l'électricité à partir d'une seule source d'énergie thermique qui peut être d'origine renouvelable. La Figure I-16, représente le schéma de principe d'un procédé de trigénération solaire par couplage thermique constitué d'un ORC dont la chaleur récupérée à haute température au niveau du condenseur permet d'alimenter un cycle à absorption et produire ainsi du froid, en plus de la production de chaleur et d'électricité.

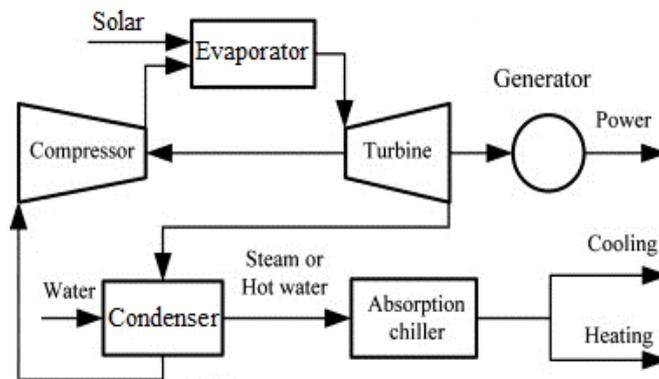
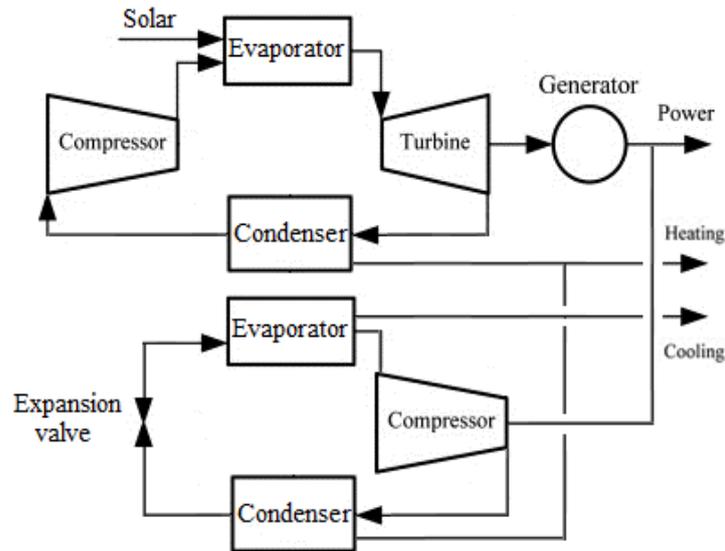


Figure I-16 : Schéma de principe d'un procédé de trigénération solaire par couplage thermique

En termes de performances, celles-ci dépendent des systèmes mis en jeu (se référer aux descriptions précédentes). Néanmoins le transport d'énergie d'un procédé à l'autre entraîne des pertes. De plus, la volonté de production simultanée ou non, entraîne souvent des contraintes supplémentaires qui engendrent des performances inférieures à celle d'un procédé de cogénération seul. Par exemple, l'alimentation d'un cycle à absorption simple effet nécessite une température d'au moins 80 °C ; de ce fait le procédé de cogénération devra imposer à son condenseur une température de condensation supérieure à 80 degrés, ce qui limitera le différentiel de température exploitable et donc le rendement électrique du procédé. Les performances dépendent ainsi des technologies étudiées et de leur architecture, de la volonté de favoriser la production d'un type d'énergie au détriment d'une autre. Al Moussawi et al. ont décrit les performances d'un large panel de procédés de trigénération en fonction des différentes technologies utilisées [46].

### 3.3.2. Procédés de trigénération à récupération de travail

Le travail produit peut être transféré entre les différents composants sous différentes formes, électrique, mécanique, voire hydraulique et permet dans la majorité des cas d'alimenter une machine à compression mécanique de vapeur afin de produire du chaud ou du froid. La Figure I-17 représente le schéma de principe d'un procédé de trigénération solaire par récupération de travail constitué d'un ORC dont la production d'électricité permet d'alimenter une PAC pour produire du chaud ou du froid.



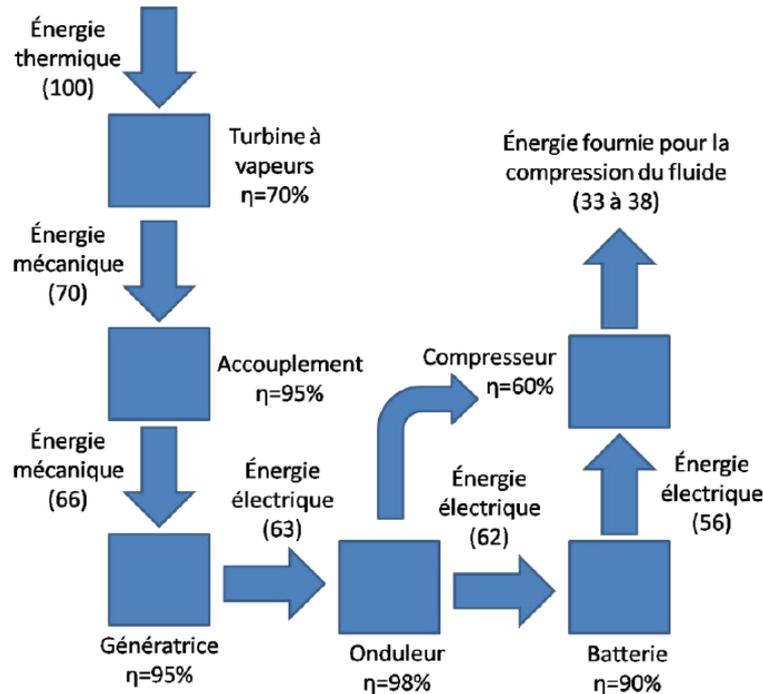
*Figure I-17 : Schéma de principe d'un procédé de trigénération par récupération de travail*

De nombreuses variantes sont possibles : le travail peut être produit à partir de procédé type ORC, Stirling, Pile à combustible, mais aussi de panneaux photovoltaïques, d'éolien, etc, pour alimenter tout type de systèmes produisant du froid à partir d'électricité.

La comparaison des performances de procédés de trigénération est complexe en raison d'une multitude de technologies envisageables ; il faut considérer leurs contraintes, leurs modes opératoires, la température des sources et puits de chaleur, etc. De plus, pour orienter correctement son choix, il serait également nécessaire de considérer leurs coûts et leurs volumes, en particulier dans le cadre d'applications résidentielles.

Immovili et al. [50] comparent différents systèmes de trigénération solaires, pour un COP allant de 0,05 à 0,6 pour la production de froid et un rendement électrique allant de 5 à 20%. Les procédés thermodynamiques solaires fonctionnant à basse température (<200 °C) atteignent des rendements électriques de l'ordre de 2 à 8% [27]. Ces performances relativement faibles s'expliquent par le faible différentiel de température exploitable ainsi que par la complexité technologique supplémentaire qu'entraîne une source d'énergie intermittente. Les technologies qui utilisent le photovoltaïque pour leur production d'électricité permettent de meilleurs rendements électriques, au détriment des performances en production de chaud et froid.

Le transfert d'énergie d'un cycle à un autre qu'il soit réalisé sous forme électrique ou mécanique entraîne différentes pertes qui impactent le rendement global de l'installation. La Figure I-18 met en évidence les pertes énergétiques relatives au transfert d'énergie nécessaire à la production de froid à partir d'un ensemble ORC solaire / pompe à chaleur.



*Figure I-18 : Performances de la chaîne de conversion énergétique d'un procédé ORC/PAC tel que présenté dans la Figure I-17.*

Ce couplage particulièrement énergivore peut-être amélioré de différentes façons. Diverses études se sont intéressées au couplage mécanique entre la turbine de l'ORC et le compresseur de la machine à compression mécanique de vapeur [52]. D'autres études envisagent un couplage massique grâce à un éjecteur et aboutissent ainsi à un procédé dit à éjecto-compression. Ce procédé qui utilise un même fluide de travail au sein des cycles moteur et récepteur permet de mettre en œuvre un seul et même condenseur commun aux deux cycles [32, 33 et 34].

C'est également dans le but d'améliorer l'efficacité de cette chaîne de conversion que les procédés thermo-hydrauliques ont été étudiés. Le principe de ce procédé, qui fait l'objet de cette thèse, est succinctement rappelé dans la section suivante ; il sera amplement décrit dans les chapitres suivants.

#### **4. Procédé thermo-hydraulique pour la trigénération**

Le terme "thermo-hydraulique" fait référence à un procédé basé sur la conversion d'énergie thermique en travail impliquant un liquide pour transférer le travail entre différents composants ou sous-systèmes. Le but recherché étant l'amélioration des performances de la chaîne de conversion énergétique qui impacte sensiblement les performances des procédés thermodynamiques classiques. Le laboratoire PROMES s'est penché sur cette problématique depuis 2007 avec la production de deux thèses de M.Martins [53] et H.Semhari [54] s'intéressant respectivement à la production de froid destinée au secteur résidentiel (procédé CHV3T) et à la production électrique destinée à l'exploitation de l'énergie thermique des mers (procédé CAPILI), tous deux à partir de procédés thermo-hydrauliques. Ces travaux ont également donné lieu à différents articles scientifiques [50, 51 et 52] destinés à décrire le fonctionnement de ces procédés, ainsi que deux brevets [53 et 54]. D'autres laboratoires et entreprises s'intéressent également à cette technologie ; des brevets ont notamment été déposés

par les firmes *International Innovations Limited* (IIL) [60], ou la société *Cogen Microsystems* [61]. Les procédés développés par ces derniers, se distinguent des procédés étudiés par le laboratoire Promes par le fait qu'ils ne récupèrent pas l'énergie produite lors de la détente du fluide, rendant leurs procédés moins performants a priori. D'autres laboratoires s'intéressent également à l'utilisation d'un liquide pour transférer du travail pour d'autres applications telles que la compression de gaz [62].

Le système étudié dans le cadre de cette thèse s'inscrit dans la continuité des procédés étudiés par le laboratoire Promes, notamment du procédé CHV3T étudié par Martins. Il s'agit d'un procédé de trigénération à récupération de travail, pour lequel le travail est transféré du cycle moteur au cycle récepteur par l'intermédiaire d'un liquide de transfert, dans le but d'en améliorer la chaîne de conversion. Le fonctionnement de ce procédé sera plus spécifiquement détaillé au chapitre suivant, mais avant cela, il convient de s'intéresser aux fluides de travail qui conditionnent les performances des procédés ORC, PAC et également CHV3T étudiés ici.

## **5. Les fluides réfrigérants**

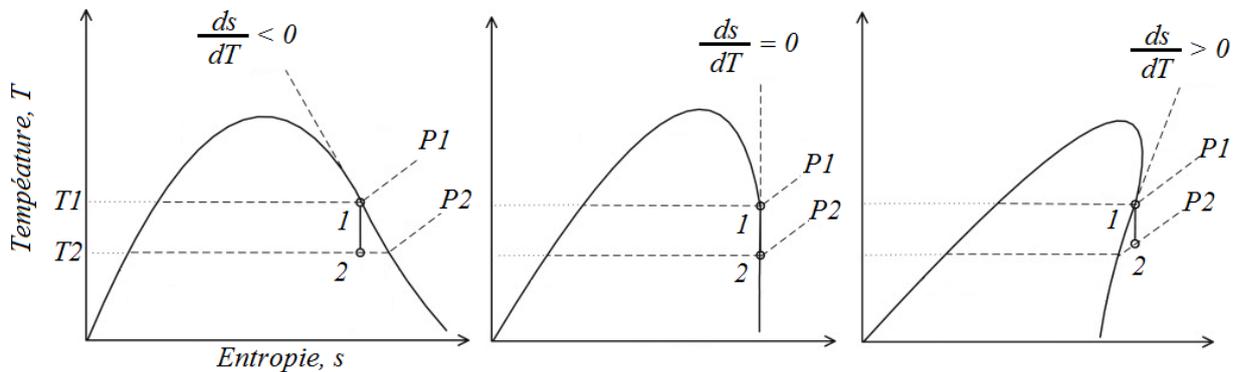
Les fluides de travail sont des fluides purs ou mélanges de fluides dont les propriétés physiques (température d'ébullition, pression d'utilisation, etc.) les rendent particulièrement bien adaptés au fonctionnement de procédés thermodynamiques, notamment à basse température. Au même titre que l'optimisation du dimensionnement des différents composants, le choix du fluide de travail joue un rôle important sur les performances globales des procédés thermodynamiques de type pompe à chaleur et cycle organique de Rankine et donc par extension du procédé étudié. En plus de l'impact du fluide sur les performances du procédé, les différentes familles de fluide utilisé (CFC, HCFC, HFC, HC) peuvent avoir des incidences environnementales importantes. Ceux-ci ont longtemps été décriés puis progressivement interdits, initialement pour leurs impacts sur la couche d'ozone, puis par la suite pour leur contribution à l'effet de serre. Ceci a eu pour conséquence de rechercher de nouvelles familles de fluide, telles les hydrofluoro-oléfine (HFO) qui avec un impact environnemental moindre sont destinés à remplacer les HFC. Cette section est destinée à informer le lecteur sur les différents effets et impacts du fluide de travail afin de mieux comprendre les choix faits par la suite.

### **5.1. Rôle des fluides de travail sur les performances des procédés thermodynamiques**

Le choix du fluide frigorigène impacte les performances du procédé étudié de différentes manières, notamment du fait que les propriétés physicochimiques de chaque fluide sont différentes. Mais l'évaluation des performances doit également prendre en compte d'autres paramètres tels que les pressions opératoires, qui peuvent jouer un rôle important sur les performances de la turbine.

D'autre part, le choix du fluide peut imposer certaines contraintes au système qui peuvent limiter ses performances. La température critique du fluide par exemple, limitera la température exploitable par la machine thermodynamique, dépasser cette limite est possible, mais on parlera alors de cycles supercritiques [59, 60].

La forme de la courbe de saturation du fluide de travail renseigne sur le comportement du fluide notamment lors de la détente des vapeurs saturées ; ce comportement est caractérisé par la pente de l'entropie de la vapeur saturée dans le diagramme T-S décrit en Figure I-19.



**Figure I-19 :** Diagramme TS de fluides dits humide (gauche), isentropique (centre) et sec (droite).

Les fluides dits humides (diagramme (T-S) de gauche) sont considérés comme désavantageux, car pendant la détente du fluide (1→2) une fraction du fluide va retourner à l'état liquide, ce qui peut entraîner une dégradation des aubages de la turbine si cette fraction de liquide s'avère trop importante (>15%) [65]. La solution pour pallier ce problème est de surchauffer les vapeurs en sortie de l'évaporateur, mais le coefficient d'échange avec la vapeur étant moins important, cela induit des surfaces d'échanges plus grandes et donc des échangeurs de chaleur plus coûteux. Les fluides dits secs et isentropiques sont donc préférés dans le cadre d'applications ORC, car ils n'entraînent pas ou peu de formation de liquide lors de la détente.

## 5.2. Impacts environnementaux des fluides frigorigènes

Les impacts environnementaux de certains réfrigérants une fois libérés dans l'atmosphère sont importants, ce qui explique que leur usage est aujourd'hui réglementé. C'est dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle que les CFC se sont développés, notamment comme réfrigérants, pour remplacer l'ammoniac ou les hydrocarbures du fait de la toxicité ou de l'inflammabilité, et ce n'est qu'à la fin du siècle que l'on se rend finalement compte que les fluides chlorés sont responsables de la destruction de la couche d'ozone. En effet, un atome de chlore issu de la décomposition de ces molécules, peut détruire en moyenne 100 000 molécules d'ozone. L'impact de ces réfrigérants sur l'ozone est mesuré à travers l'indice ODP (Ozone Depletion Potential ou potentiel de destruction d'ozone), dont la référence (ODP=1) correspond au réfrigérant CFC R11. Cet indice caractérise la perte globale d'ozone liée à un fluide donné par rapport à celle occasionnée par le fluide de référence.

Cette raison a amené les gouvernements mondiaux à interdire progressivement les réfrigérants à l'ODP non nul ce qui a entraîné leur remplacement par les HCFC puis les HFC. Néanmoins ces derniers, bien que n'impactant pas la couche d'ozone, présentent des durées de vie atmosphérique très longues et sont pour la plupart des gaz à effet de serre extrêmement puissants. Cet aspect est caractérisé par l'indice GWP (Global Warming Potential, ou Potentiel de réchauffement global), qui compare l'effet de serre produit par un 1kg de fluide donné sur horizon de temps (100 ans) par rapport à celui produit par CO<sub>2</sub> en même quantité.

À titre d'exemple le fluide R134a largement répandu comme réfrigérant aujourd'hui présente un GWP de 1320, c'est-à-dire qu'1 kg de R134a dans l'atmosphère présentera les mêmes conséquences que 1,3 tonne de CO<sub>2</sub>. Le 15 octobre 2016, 197 pays se sont engagés via un amendement au protocole de Montréal à mettre fin à l'utilisation des HFC à l'horizon 2050. Ces nouvelles contraintes ont une nouvelle fois amené les industriels de la chimie à mettre au point une nouvelle famille de réfrigérant, les HFO, qui ont l'avantage de ne pas impacter la couche d'ozone et d'avoir un "faible" effet de serre avec des ODP nuls (ou quasi nuls) et des GWP généralement inférieurs à 10. Ce sont actuellement les meilleurs candidats au remplacement des HFC. Les caractéristiques des fluides purs les plus employés pour la réfrigération et la production d'électricité par des cycles ORC à basse température sont fournies dans le Tableau I.2.

**Tableau I.2 : Liste de réfrigérants purs fréquemment utilisés pour la production de froid ou d'électricité par des procédés thermodynamiques.**

Fluide de travail	Famille	Courbe de saturation	Point critique		Chaleur de vaporisation [kJ/kg]	Température d'ébullition à 1 atm	ASHRAE Level Voir aussi Tab II-5	ODP	GWP
			°C	bar					
R-11	CFC	Isentropique	198	44,1	181,36	23,5°C	A1	1	3660
R-113	CFC	Sec	214	34,4	143,9	47,8°C	A1	0,9	5330
R-22	HCFC	Humide	96	49,9	233,75	-41,5°C	A1	0,034	1710
R-123	HCFC	Isentropique	183,7	36,7	171,5	27,7°C	B1	0,012	53
R-32	HFC	Humide	78	57,8	360,2	-52°C	A2	-0	550
R-134a	HFC	Humide	101	40,6	216,97	-26,4°C	A1	-0	1320
R152a	HFC	Humide	113	47,6	329,91	-25°C	A2	-0	140
R245fa	HFC	Isentropique	154	36,4	197,5	14,6°C	B1	-0	1020
R-1233zd	HFO	Sec	165,6	35,7	195,34	18,6°C	A1	-0	7
R-1234yf	HFO	Isentropique	94	33,8	180,25	-29,4°C	A2L	-0	4
R1234ze(E)	HFO	Isentropique	109	36,4	195,62	-19°C	A2L	-0	6
R1234ze(Z)	HFO	Isentropique	150	35,3		9,8°C	A2L	-0	<10
DR-2	HFO	Sec	171,3	29,03		33,4°C	A1	-0	9,4
R290 (propane)	HC	Sec	96,7	42,5	425,6	-42,1°C	A3	-0	20
R600 (n-butane)	HC	Sec	151	38	385,7	-0,5°C	A3	-0	4
R600a (isobutane)	HC	Sec	134	36,5	365,1	-11,7°C	A3	-0	3
R601 (n-pentane)	HC	Sec	196	33,6	358,7	35,5°C	A3	-0	4
R601a (isopentane)	HC	Sec	187	33,7	342,8	27,5°C	A3	-0	4
R-717 (ammoniac)		Humide	132	112,8	1369,5	-33°C	B2	-0	<1
R-718 (Water)		Humide	374	220	2256,5	100°C	A1	-0	
R-744 (CO <sub>2</sub> )		Humide	31	73,8	574	-78°C	A1	0	1

Cependant, il faut noter que les fluides de dernière génération (HFO) semblent se dégrader en acide trifluoroacétique (TFA) dans l'atmosphère, or ce TFA n'est pas biodégradable et est susceptible de s'accumuler dans la nature au cours du temps. Quelques études ont été réalisées pour évaluer l'évolution de la concentration en TFA dans l'environnement [66, 67]. Ces études qui s'étendent de quelques mois à plusieurs dizaines d'années n'ont pour l'instant pas révélé de risques pour l'environnement avec des accumulations de TFA très inférieures au seuil toléré.

## 6. Conclusion

Les secteurs résidentiel et tertiaire contribuent de façon significative au dérèglement climatique en étant responsables de 45% de la consommation d'énergie finale et de 20% des émissions de gaz à effet de serre. Afin d'atteindre les objectifs fixés par l'Union européenne en termes de réduction des GES, trois leviers d'actions doivent être mis en place :

- Réduire les besoins via l'amélioration de l'isolation des habitations existantes
- Améliorer l'efficacité énergétique via l'amélioration des performances des différents appareils consommateurs d'énergies
- Remplacer les énergies fossiles par des sources d'énergies décarbonées de préférence renouvelables et locales.

C'est plus particulièrement dans le cadre de ce dernier point que ce travail de thèse s'inscrit.

Afin de chercher à répondre localement aux différents besoins du secteur résidentiel, qu'ils soient thermiques ou électriques, nous avons d'abord cherché à quantifier les différents besoins du secteur résidentiel et à estimer leurs tendances d'évolutions. Si aujourd'hui les besoins thermiques représentent quasiment 80% des besoins énergétiques d'un ménage français, les nouvelles réglementations thermiques et le développement rapide des multimédias devraient rapprocher les besoins thermiques et électriques à parts égales pour les bâtiments récents.

La production locale des besoins de l'habitat est une piste intéressante qui permettrait de réduire l'impact sur l'environnement, et ce d'autant plus si la source d'énergie est une source renouvelable. Les procédés de micro-cogénération et de trigénération qui visent à satisfaire les besoins du secteur résidentiel à partir d'une seule source d'énergie pourraient permettre de répondre efficacement à ce défi, ce qui explique qu'ils soient en forte progression, tant dans les laboratoires de recherche que chez les industriels. Un état des lieux des technologies de cogénération les plus répandues telles que les piles à combustible, les cycles Stirling ou les cycles organiques de Rankine (ORC) a été réalisé, de même que pour les différentes technologies de production de froid solaire que sont les machines à compression mécanique de vapeur par une source d'électricité renouvelable ou les cycles à sorption.

Les procédés de trigénération sont généralement constitués par un procédé de cogénération couplé à un procédé de production de froid. Ce "couplage" pouvant être thermique entre un cycle ORC et une machine à sorption, ou réalisé en récupérant une fraction du travail produit par le cogénérateur afin d'alimenter une machine à compression mécanique de vapeur. On peut citer par exemple l'assemblage de panneaux photovoltaïques et d'une pompe à chaleur, ou encore d'un ORC dont la turbine serait couplée mécaniquement au compresseur d'une machine à compression mécanique de vapeur.

Néanmoins, la chaîne de conversion énergétique de ces procédés s'avère souvent peu efficace et pénalise leurs performances globales. C'est pourquoi le laboratoire Promes étudie un nouveau procédé de trigénération thermohydraulique visant à améliorer cette chaîne de conversion via le recours à un liquide de transfert qui permet l'échange de travail d'un cycle à l'autre en minimisant les pertes. La description de ce procédé innovant fait l'objet du chapitre suivant.