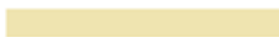


1  ***Production de l'énergie***

2  ***Consommation de l'énergie***

3  ***L'eau***

4  ***Les chiffres***

5  ***L'urgence du changement***

6  ***La finance et les acteurs***

7  ***La synthèse***

Les besoins actuels du citoyen français en énergie

Ceci en dehors du transport aérien et ferroviaire, de l'industrie et de l'agriculture

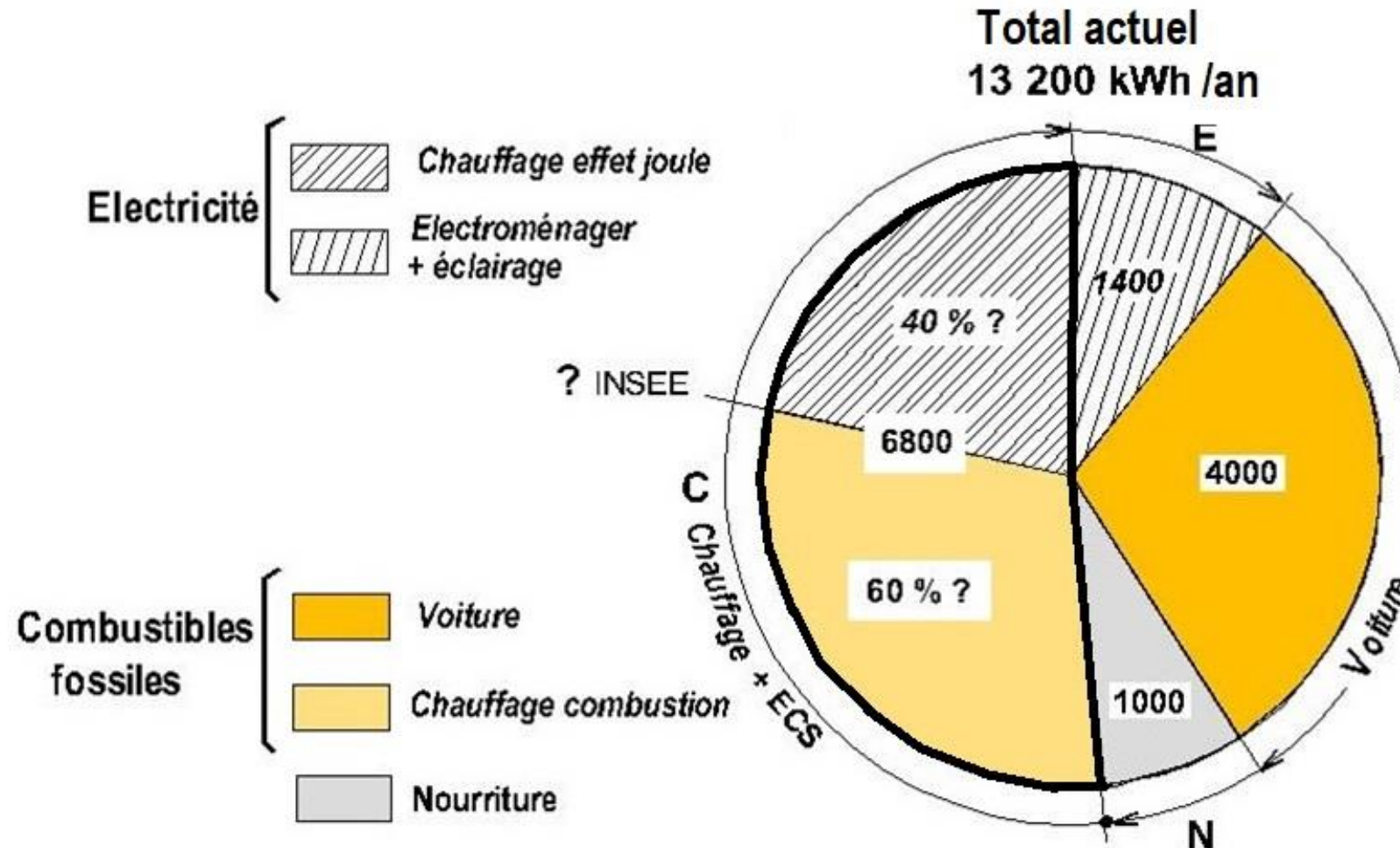


Figure 1

Etude faite pour un citoyen vivant en appartement (valeur moyenne). Voir page 123 pour la maison

fig 1

Lorsque l'on observe cette galette concernant la consommation du citadin français en énergie on s'aperçoit qu'il donne plus à manger à son logement et à sa voiture que pour se nourrir. C'est en effet environ la moitié qui est consommée pour assurer la climatisation de son habitat, l'autre moitié étant principalement constituée par l'essence ou le gazole qui alimente sa voiture individuelle.

Le reliquat comprend deux parts sensiblement égales : l'énergie contenue dans ses aliments et l'énergie dépensée pour l'électroménager

L'homme a principalement besoin d'énergie pour se [chauffer](#) , s'éclairer, assurer l'électroménager, faire avancer sa voiture, manger.

Le type d'énergie diffère selon le besoin, il lui faut de l'énergie thermique pour se chauffer, de l'énergie électrique pour s'éclairer et faire fonctionner l'électroménager ainsi que de l'énergie mécanique pour faire avancer sa voiture. Quant à l'énergie contenue dans l'aliment elle est utilisée par homo sapiens d'une part sous forme d'énergie thermique pour maintenir son corps à 37 degrés vu que la température moyenne sur notre planète de 15 degrés centigrades est plus faible que celle de son corps et qu'il a besoin d'énergie sous sa forme mécanique.

- **C** Pour se chauffer, à savoir satisfaire ses besoins en énergie **thermique**, le français utilise actuellement deux chaînes énergétiques complètement différentes l'une de l'autre, la combustion du fioul ou du gaz d'une part et d'autre part l'effet joule, dans la pratique les radiateurs électriques . Le chiffre de **6800 kWh** est une prospective de ce que pourrait être la consommation moyenne assurant le chauffage de l'appartement d'un Français de l'hexagone habitant en ville. Le besoin en énergie du citadin français est en effet principalement le **chauffage** (Environ 50% du besoin total). Vivant en moyenne dans quelque 28 m² habitable dans un appartement qui dissipe quelque 240 kWh par m² habitable en lieu et place des 50 kWh de la [RT 2012](#), la quantité d'énergie thermique qu'il consomme annuellement pour se chauffer correspond sensiblement à 6800 kWh. Ce chiffre tient compte du fait que le besoin du citadin logé en appartement est plus faible que celui du campagnard logeant dans une maison individuelle par le fait que les surfaces de déperditions thermiques d'une maison sont très supérieures à celles d'un appartement. Cette orientation vers les immeubles et leurs appartements a été choisie pour vous donner une meilleure vision du futur et tenir compte d'un accroissement probable de la population urbaine malgré le télétravail qui va se faire progressivement au détriment de la population rurale . Il n'y a pas encore à ma connaissance de statistique faisant la répartition combustion-chauffage électrique en France mais il a été estimé ici que 60% des français se chauffe avec la combustion et les 40% restant avec des radiateurs électriques. Cela ne devrait pas être trop loin de la réalité. La répartition 50-50 a été aussi retenue à la page 43
- **E** Le chiffre de **1400 kWh** correspond à **l'électroménager et à l'éclairage**
- **V** Pour satisfaire ses besoins en énergie **mécanique**, c'est-à-dire pour alimenter sa voiture, le français utilise actuellement presque exclusivement la combustion de l'essence et de ses dérivés. Ceci avec le moteur à combustion interne utilisant des produits fossiles que ce soit pour sa voiture ou plus généralement pour le transport routier. Quant à l'incidence sur notre environnement et les performances de cette chaîne énergétique, tout est malheureusement clair : mauvaises performances et pollution des villes avec les gaz de combustion (particules fines dangereuses pour nos poumons). Le chiffre de **4000 kWh** correspond à la consommation de sa voiture individuelle : ceci à raison de 10 000 km par an et d'une consommation de 8 litres d'essence au 100 km. Les 800 litres d'essence consommées annuellement par la voiture du couple fiscal homme-femme correspondent compte tenu du pouvoir calorifique de l'essence proche de 10 kWh par litre à une quantité d'énergie thermique de 4000 kWh pour chacun d'eux.

Le chiffre **N** de 1000 kWh correspond à des **aliments** consommés et produit localement par homo sapiens. (Voir complément page 125)

On sait en effet qu'un individu a besoin en moyenne de 2500 calories par jour pour se nourrir. Ce chiffre étant majoré de 150 calories pour un individu actif et diminué de la même valeur pour un individu n'ayant aucune activité physique. Un grand sportif pouvant consommer plus de 3000 calories. Mais attention, il s'agit ici de la calorie alimentaire. Il faut dans la pratique multiplier ces chiffres par 1000 pour évaluer la consommation énergétique moyenne d'un individu si l'on raisonne dans le système international (SI). Compte tenu de l'équivalent mécanique de la calorie égal à 4,18 joules de l'anglais James Prescott, cela revient à dire qu'un individu consomme en moyenne 2500 kilocalories par jour où $2500 \times 4,18 = 10\,450$ kilojoules par jour ou encore $10\,450 \times 365 = 3\,815\,000$ kilojoules par an. Ou encore vu que 3600 kilojoules correspondent à 1 kWh sensiblement **1000 kWh annuellement**

On observe donc sans crainte de se tromper et aussi incroyable que cela puisse paraître qu'homo sapiens consomme nettement plus d'énergie pour se chauffer et alimenter sa voiture que pour se nourrir. Il suffit pour cela de comparer les chiffres pour constater qu'il consomme en pratique environ 6 fois plus d'énergie pour se chauffer que pour s'alimenter. La différence étant un peu plus faible lorsque l'on fait la comparaison par rapport à la voiture.

Agriculture locale ?

Mais attention, il faut faire la part des choses. Ce raisonnement n'est valable que si la nourriture est produite localement. Cela pour une raison simple, la quantité d'énergie consommée pour transporter l'aliment peut être bien supérieure à l'énergie contenue dans l'aliment lui-même. Ceci particulièrement avec les échanges internationaux. Par exemple si homo sapiens fait venir sa nourriture des antipodes par avion. On estime en effet que la consommation moyenne pour transporter une charge de 100 kg (un passager avec ses bagages) par avion à beau être sensiblement deux fois plus faible qu'avec la voiture (environ 3 litres de kérosène pour 100 km), il y a la distance. Cela signifie que si 1kg d'aliment venant des antipodes parcourt 20 000 km par avion avant d'être consommé, il aura fallu brûler pratiquement 8 fois son poids en kérosène avant de pouvoir le consommer. Ceci en assimilant le pouvoir calorifique du kérosène à celui de l'essence. Ces chiffres exorbitants devraient inciter :

- un organisme comme l'ONU du bien fondé de taxer le kérosène pour l'aviation civile comme cela se pratique pour le carburant destiné au transport routier et à la voiture individuelle.
- homo sapiens à [cultiver et manger local](#) pour éviter le gâchis actuel . Si ce n'est la mauvaise qualité du carburant utilisé la situation semble toutefois moins grave avec le transport maritime par porte-conteneurs qui traite sensiblement 80% des exportations-importations mondiales (voir figure 2 page suivante)

Suite aux quantités de gaz à effet de serre émises dans l'atmosphère et au dérèglement climatique, une notion instructive consiste à comparer l'énergie contenue dans l'aliment lui-même à l'énergie qui a été dépensée pour son transport. La **figure 2** ci-dessous établie par Tresorio.com fait le point à ce sujet pour différent mode de transport en qui concerne le déplacement à l'horizontal d'une charge de 100 kg sur 100 km. J'ai rajouté sur cet abaque le logo correspondant au porte-conteneur. Ce mode de transport maritime bien que proche de la mondialisation et du toujours + génère toutefois selon mes calculs une situation nettement moins grave que l'aviation avec un logo qui se situerait à environ 32 grammes de CO2.

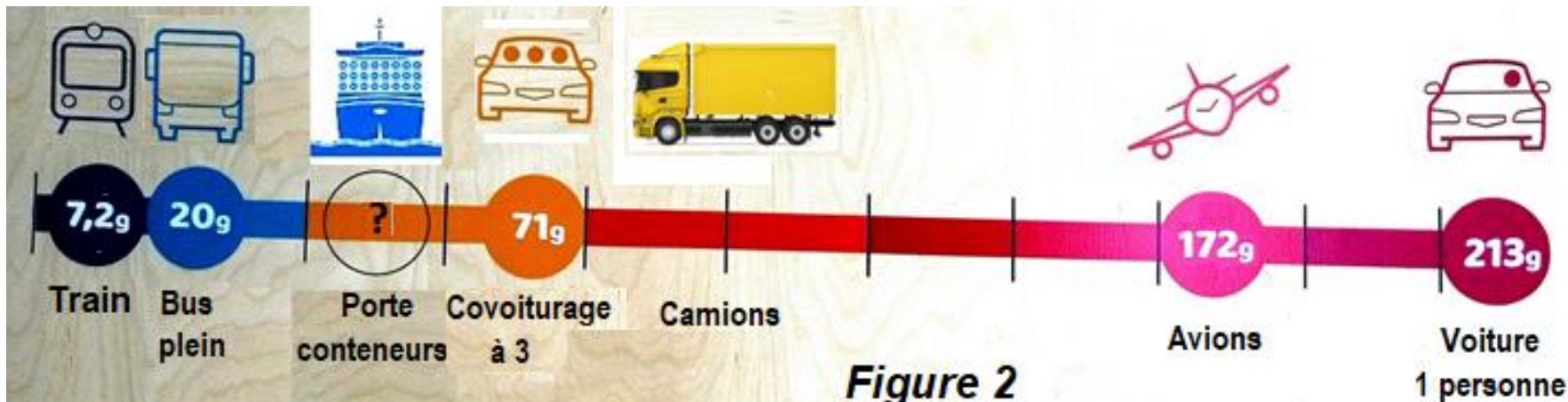
Porte conteneurs

En effet, si l'on en croit les [caractéristiques générales des porte-conteneurs](#), ces derniers peuvent transporter une charge de 185 000 tonnes (port en lourd) et ceci en navigant à 23 kns correspondant à 42 km/h (1 kns = 1,85 km/h) ce qui lui permet de parcourir ces 20 000 km s'il vient des antipodes en 480 heures (20 jours) Compte tenu de la puissance de ses moteurs diesel de 54 000 kilowatts ou 73 500 CV (1CV = 0,735 kW) et de la consommation moyenne d'un moteur thermique de 150 g/CV heure, il consomme pour faire ce trajet de 20 000 km : $0,15 \times 73\,500 \times 480 \times 10^{-3} = 5\,180$ tonnes de gasoil ce qui correspond à moins de 3% de la masse de marchandise transportée, ce qui est quand même nettement moins grave que l'aviation. C'est tout de même une quantité d'énergie égale à 25 millions de kWh qui est consommée pour le transport de ces 185 000 tonnes de marchandise. Certes, pour réduire les coûts, le combustible est parfois du fuel lourd de très mauvaise qualité mais on constate au travers de ces chiffres que dans le cas des très longs trajets l'énergie nécessaire au transport de l'aliment avec les portes conteneurs serait sensiblement 10 fois inférieure à l'énergie contenue dans l'aliment lui même au lieu d'être environ 8 fois supérieure pour l'aviation. Il faut espérer que sur le long terme on sera capable grâce à la recherche de développer la construction de structures volantes propulsées à l'hydrogène capables d'abaisser la consommation d'énergie au niveau du celle du porte conteneur. (Voir page 124)

Notas

1 Nous serons probablement amené à considérer que pour survivre, la [quantité utile d'énergie contenue dans les aliments](#) absorbés par une personne qui vit dans un milieu à -30 degrés C est supérieure à celle d'un individu qui vit dans un milieu à +40 degrés. En effet dans le premier cas la température extérieure est 67degrés C inférieure à celle de son corps alors que ces deux températures sont pratiquement au même niveau dans le deuxième cas.

2 Il est probable que l'agriculture purement urbaine restera insuffisante pour nourrir le citoyen



Tresorio.com

(Poids de CO2 émis pour déplacer à l'horizontal une charge d'environ 100 kg sur 100 km)

Figure 2

Lorsqu'on observe la figure 2 qui vise les émissions de gaz carbonique pour déplacer à l'horizontal une charge d'environ 100 kg sur une centaine de kilomètres on s'aperçoit, corolaire de ce que l'on vient de dire, que la voiture et l'avion sont très mal situées. Le train quant à lui est à l'évidence le moyen de transport de loin le plus économique en termes d'émission de gaz à effet de serre

Ce qu'homo sapiens consomme selon les pays

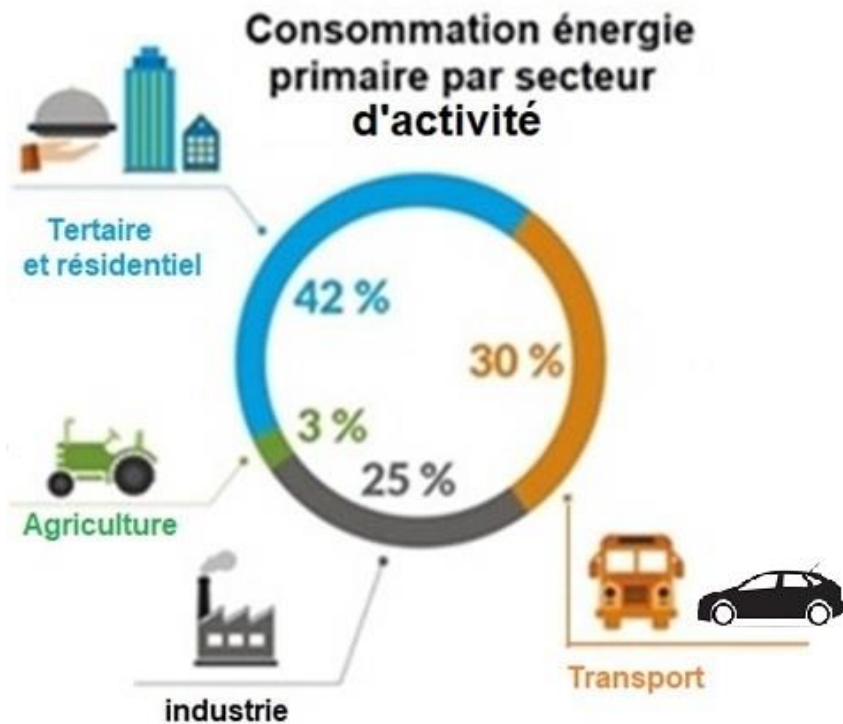
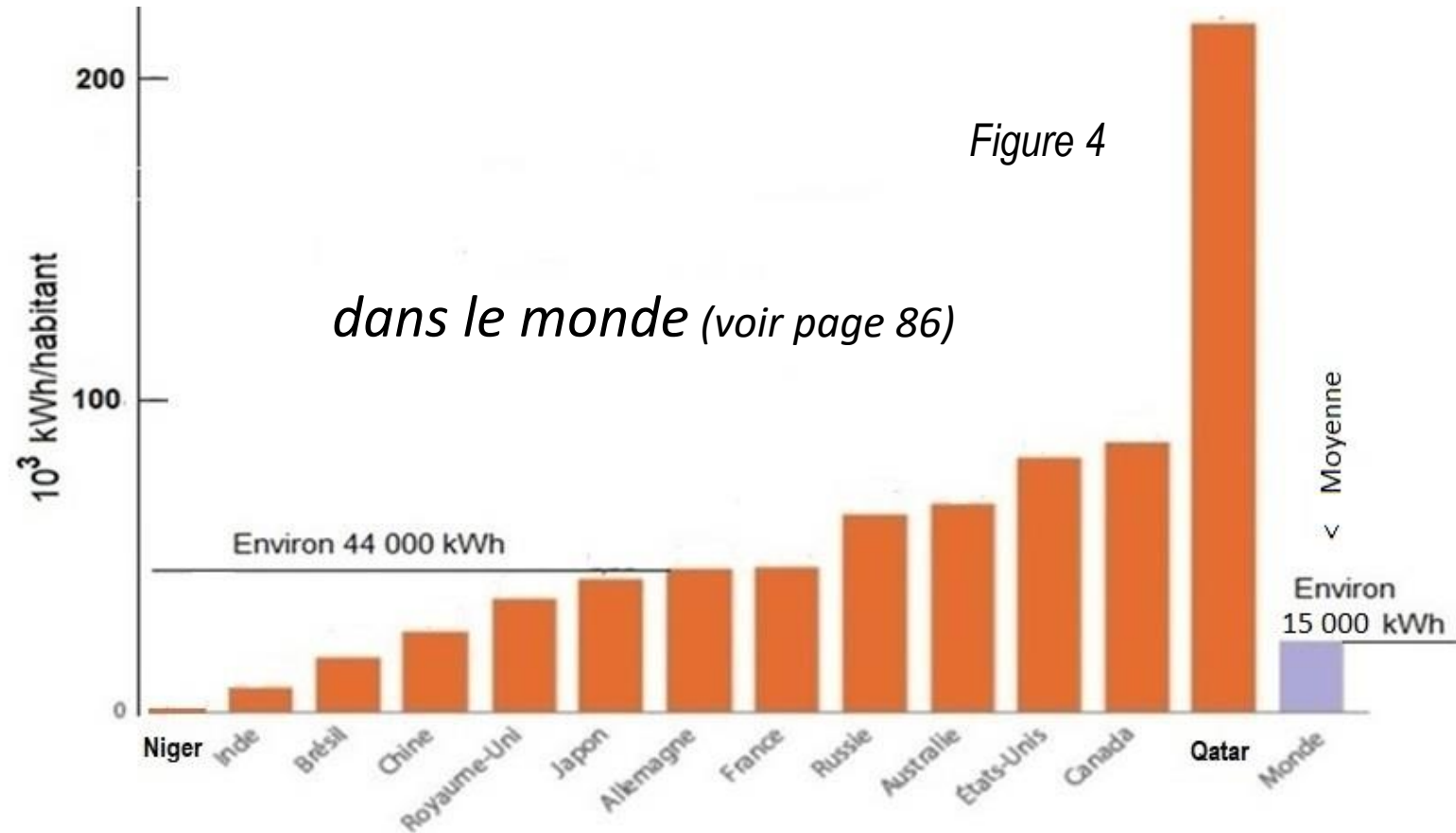


Figure 3

en France (voir page 84)



Le Canada, les USA, l'Australie, et la Russie sont les gloutons énergivores de la planète terre, la France et l'Allemagne très proches en terme de consommation pourraient faire mieux, quant au Niger...

Figure 3

La consommation d'énergie en France est différente selon le secteur d'activité. C'est de loin l'habitat qui absorbe le plus d'énergie : près de la moitié du total. Vient ensuite le transport et l'industrie avec un petit complément, celui de l'agriculture

Figure 4

Cette figure 4 quant à elle donne une idée de ce que chaque Homo sapiens consomme individuellement et annuellement selon le pays où il habite. La France et l'Allemagne se situent au milieu du lot avec environ 40 000 kWh par habitant

La combustion du fioul

Le chiffre 10

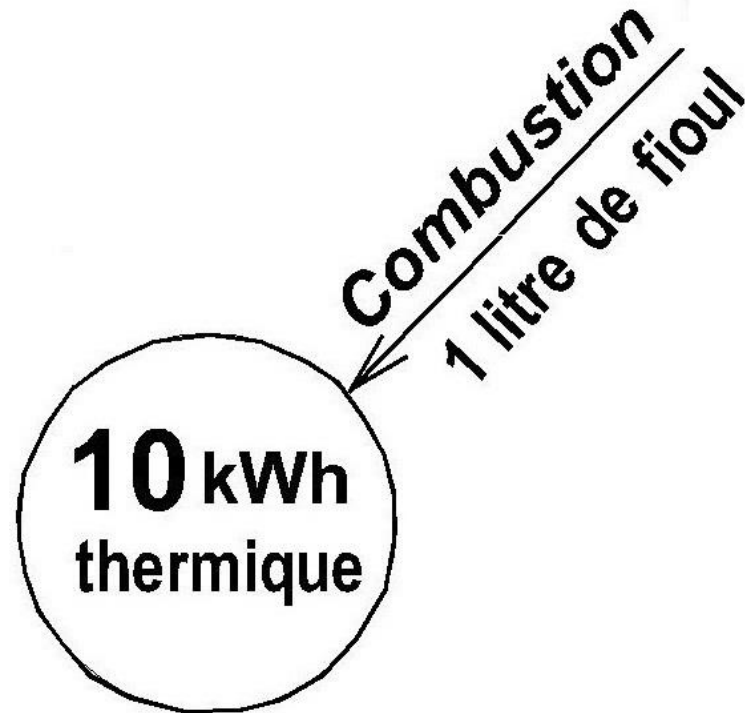


Figure 5



La puissance ***P*** est égale au débit de fioul ***Q_f*** que multiplie son pouvoir calorifique ***PCI***

$$\text{On a } P = Q_f \times PCI \quad \frac{\text{litre}}{\text{h}} \times \frac{\text{kW.h}}{\text{litre}}$$

CO₂ et pollution aux particules fines

Figure 5

Nous allons dans les pages qui suivent observer à partir de quelle quantité d'essence, de fioul, de gaz ou d'électricité il est possible d'obtenir 10 kWh d'énergie thermique. Ceci selon la nature des chaînes énergétiques que nous utilisons actuellement.

La combustion d'un litre de fioul permet par exemple d'obtenir 10 kWh thermique

La combustion du gaz naturel

Consommation

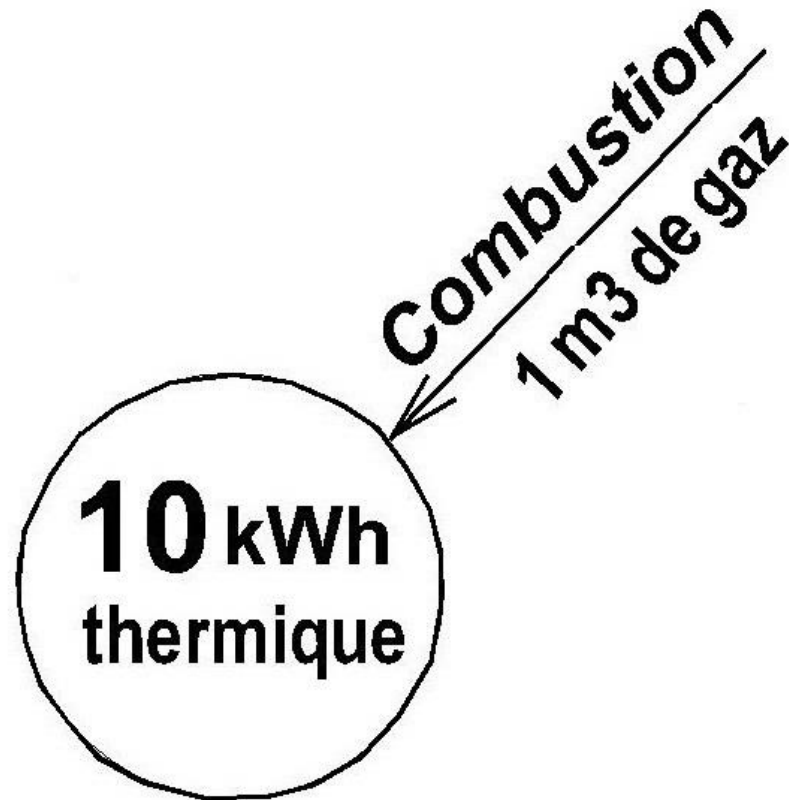


Figure 6

Figure 6

La combustion d'un m³ de gaz naturel permet elle aussi d'obtenir 10 kWh thermique

Ce qui est en passe de devenir le passé

1) L'effet Joule (Les radiateurs électriques)

Figure 8

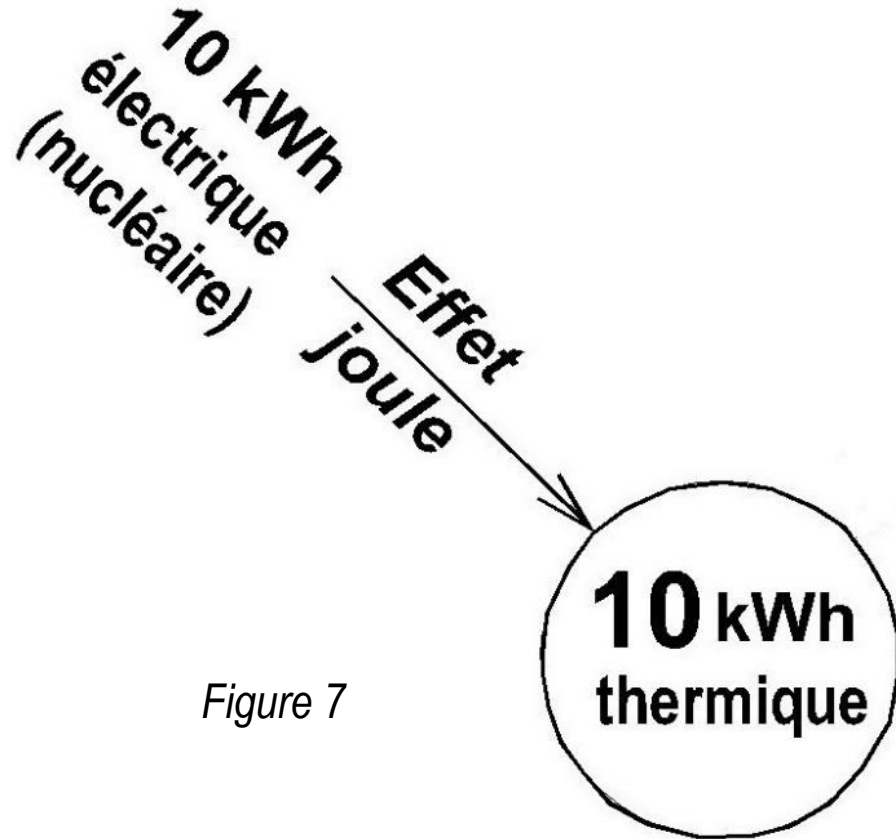
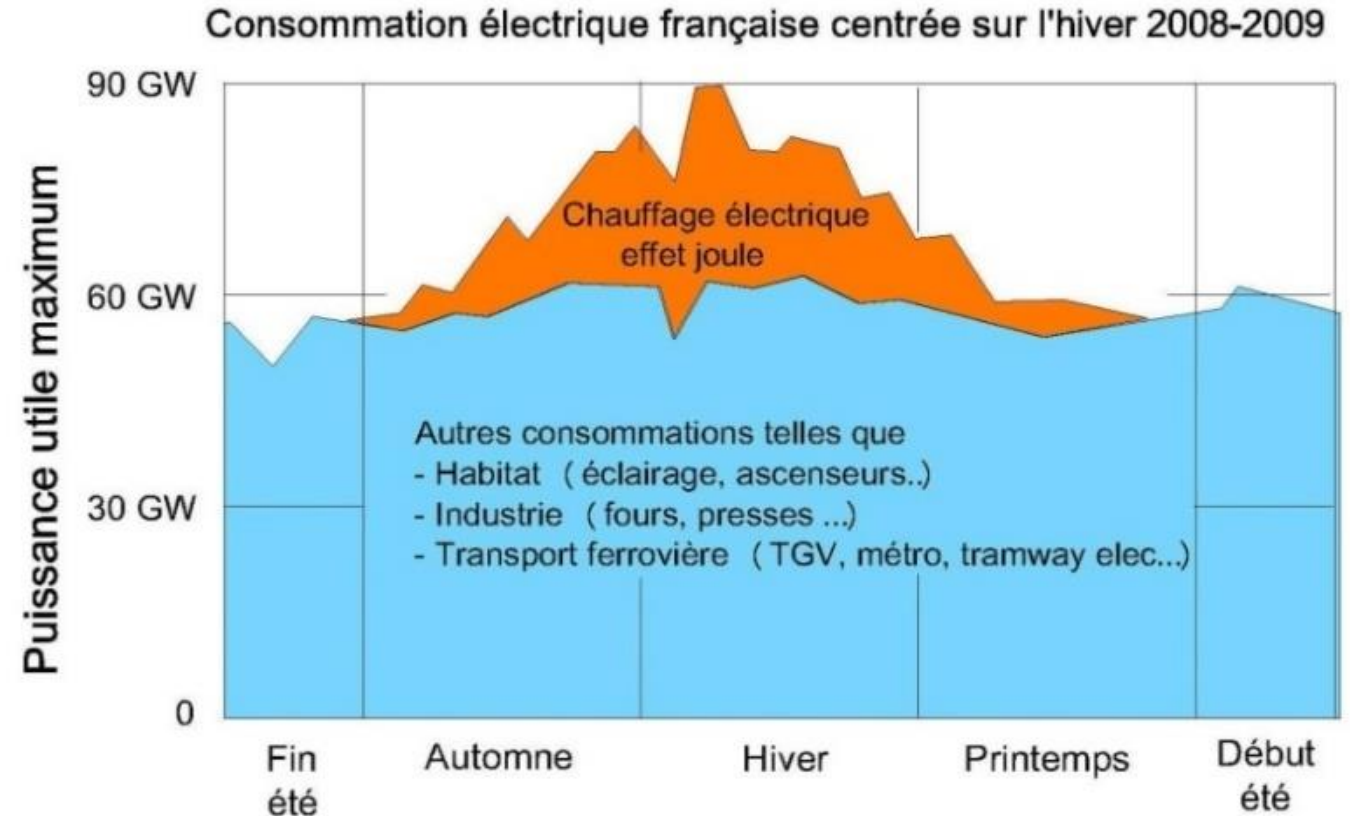


Figure 7



$$U = R i \quad P = U i = R i^2 \quad W = P t = R i^2 t \quad \text{les unités dans le système SI :}$$

U Tension en volt **P** Puissance en watt **W** Energie en joule **R** Résistance en ohm (Ω) **i** Intensité en Ampère **t** en secondes

Figure 7

Lorsqu'on envoie du courant électrique dans une résistance, ce que l'on appelle l'effet joule, il y a formation de chaleur et équivalence entre les kWh électrique consommés et les kilowattheure thermique fournis.

Ce mode de chauffage induit une surconsommation électrique importante au plus froid de l'hiver qui est indiquée en rouge sur la figure 8

2) Les moteurs thermiques

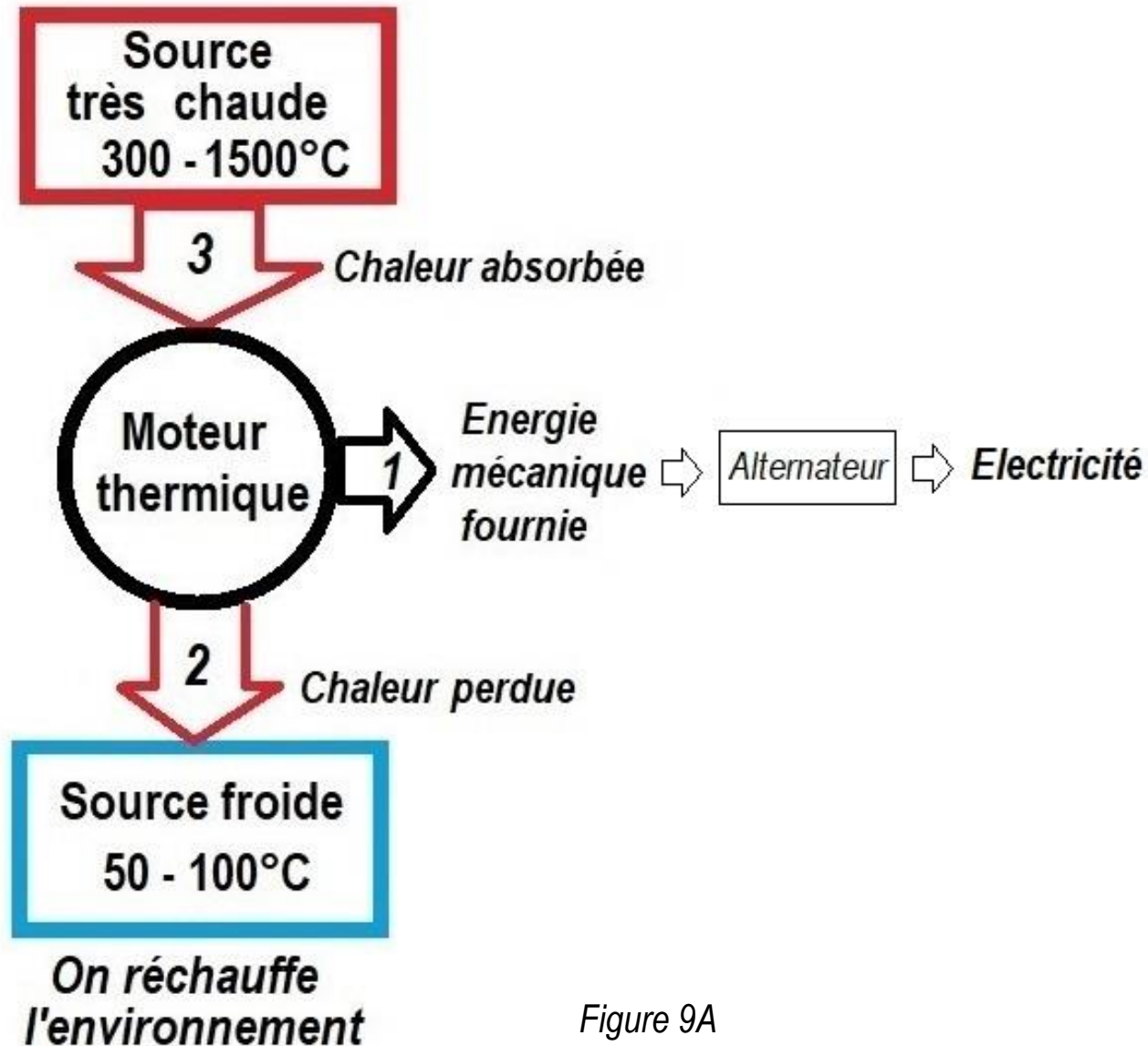


Figure 9A

Il s'agit des moteurs thermiques du type moteur à essence et turbine à gaz.

Ces deux systèmes très comparables passent par les hautes températures. Ils polluent et réchauffent l'environnement (2) en fournissant de l'énergie mécanique (1)*

La loi de conservation de l'énergie est respectée : le système émet autant d'énergie qu'il en reçoit : $1+2=3$

Rendement r : 1 que divise 3 = 0,33

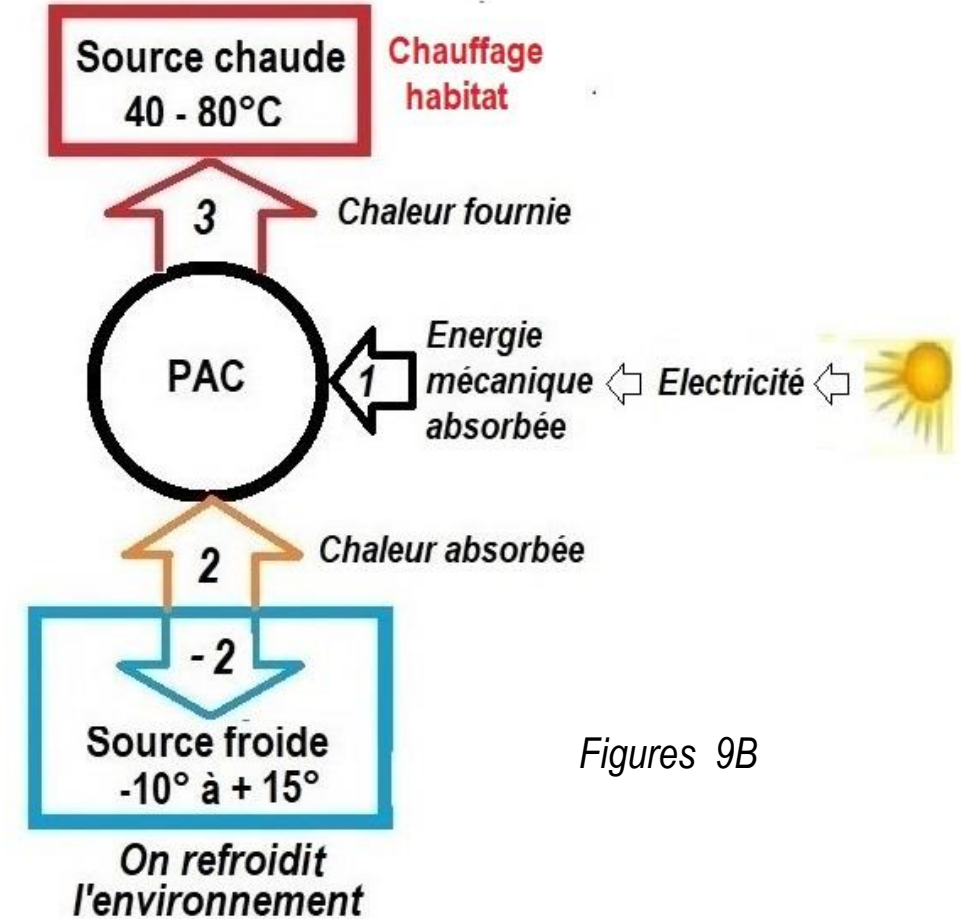
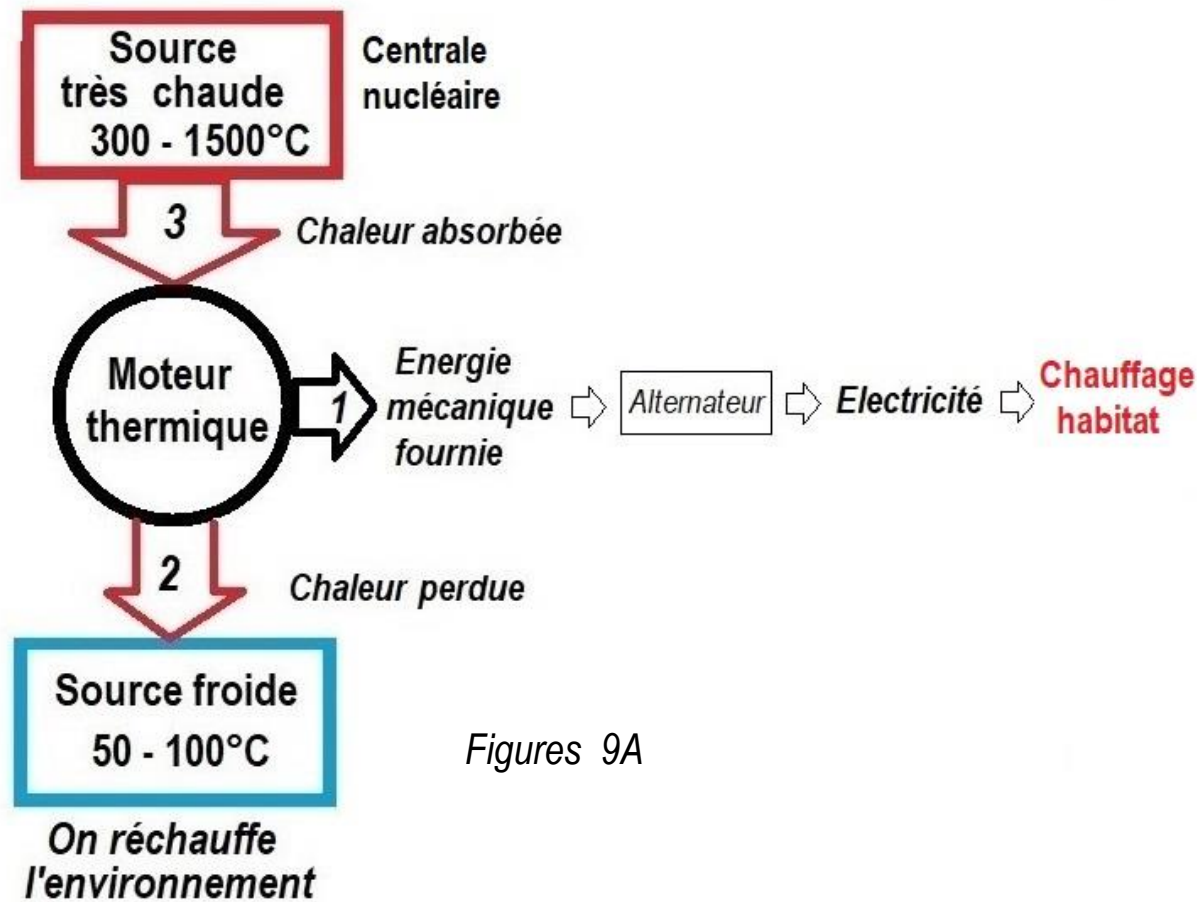
**La source très chaude peut même atteindre dans certains moteurs thermique des températures proches de 1500 ° Ceci en soulevant de graves problèmes métallurgiques. Voir [généralités sur les chaînes énergétiques](#).*

Figure 9A

Elle représente sous forme symbolique la chaîne énergétique actuellement la plus utilisée dans le monde : A savoir la chaîne énergétique comprenant un moteur thermique utilisant les hautes températures pour générer de l'énergie mécanique puis de l'énergie électrique en fin de chaîne. Ceci grâce à un alternateur.

Ceci aussi en sachant que les hautes températures en amont sont obtenues soit par la combustion des produits fossiles soit par la fission de l'uranium dans les centrales nucléaires.

Besoin en chaleur? 2 chaines énergétiques bien différentes



Les performances de la chaîne énergétique associée aux centrales nucléaires passant par le moteur thermique pour assurer le chauffage et la climatisation de l'habitat est à l'évidence longue et déplorable en terme de performance.

Pour une même quantité d'énergie électrique la Pompe à Chaleur (PAC) produit à minima trois fois plus de chaleur (Dans la pratique 5 à 6 fois plus si l'on prélève l'énergie thermique renouvelable dans l'eau et non dans l'air). On conçoit en observant la figure de gauche l'absurdité du chauffage par effet joule avec son COP de 1 (Voir figure 7)

18 figures 9A et 9B

Sur cette page qui reprends la précédente j'ai voulu montrer la modification qui est souhaitable pour chauffer l'habitat

- sur la gauche (figure 9A) : comment l'on chauffe actuellement l'habitat avec l'effet joule et la chaîne énergétique utilisant le moteur thermique
- sur la droite (figure 9B): comment on pourrait le faire avec une chaîne énergétique plus courte sans passer par les hautes températures et sans utiliser le moteur thermique. Ceci grâce à l'électricité solaire et au chauffage thermodynamique en prélevant l'énergie thermique sur l'air avec un coefficient de performance (COP) de 3

La bonne et la mauvaise chaîne énergétique

On commence je crois en 3^{ème} à manipuler les équations algébriques. Pour tenter de me faire comprendre je ne vous expliquerais pas les détails et la signification de ces formules valables si les températures sont exprimées en degrés Kelvin vu que vous ne comprendriez probablement pas mes explications. Je vous demande seulement de vous rappeler que la grande lettre T représente des températures (**c** quand c'est chaud, **f** quand c'est froid. Il y a une chose que vous pouvez je pense vérifier: son exactitude algébrique « apparente » vu que le produit des deux termes est bien égal à 1

$$\text{Rendement } r < 1 \text{ (le passé)} \leftarrow \frac{(T_c - T_f)}{T_c} \times \frac{T_c}{(T_c - T_f)} = 1 \rightarrow \text{Performance } p = 1/r > 1 \text{ (le futur)}$$

Je vous demande de me croire si je vous dis que le 1^{er} terme $(T_c - T_f)/T_c$ représente le rendement des chaînes énergétiques basées sur le « **moteur thermique** » que nous utilisons actuellement pour nous chauffer en hiver et assurer la motorisation de nos voitures. Ces chaînes énergétiques aux performances modestes (r comme rendement < 1) sont dans la pratique la combustion des produits fossiles et le nucléaire qui passent par la case thermique des hautes températures pour produire notre couteuse électricité. Ces deux chaînes énergétiques sont celles qu'il va falloir que nous abandonnions sans trop attendre pour assurer le confort thermique de notre l'habitat et la motorisation de nos voitures. Cela pour ne pas affecter dangereusement notre environnement. On a grosso modo $r = 0,33$ (ce qui revient à dire que l'on perd inutilement 66 % de l'énergie en réchauffant notre environnement).

Quant au 2^{ème} terme $T_c/(T_c - T_f)$, il représente les performances de la chaîne énergétique type « **moteur frigorifique** » qu'il va falloir généraliser en remplacement de la chaîne énergétique précédente pour assurer le chauffage et la climatisation de l'habitat. Ceci par le fait que la performance p aussi appelé **COP** est cette fois supérieure à 1. Les performances de cette 2^{ème} chaîne énergétique qui met en jeu des températures beaucoup plus faibles sont nettement améliorées par rapport à la précédente. Avec $p = 1/r = 1/0,33 = 3$ (ce chiffre beaucoup plus intéressant résultant du prélèvement important de chaleur renouvelable dans notre environnement)

Le bon et le mauvais COP

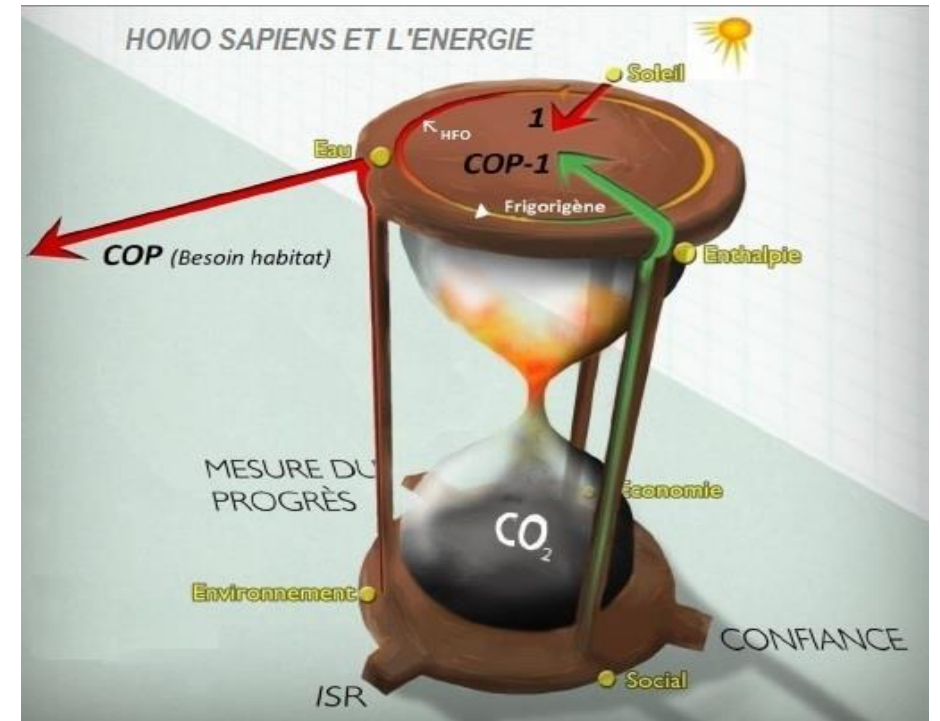
Améliorer rapidement la qualité de l'air dans nos villes en diminuant nos charges chauffage sans déséquilibrer notre économie et sans aggraver le réchauffement climatique devraient être les principaux objectifs de notre transition énergétique. Ceci de telle sorte que la médecine pulmonaire et le médiateur de l'énergie dans nos cités ainsi que la montée annoncée des océans ne soit plus qu'un mauvais souvenir. Pour cela il va falloir que nous réalisons après avoir choisi la bonne chaîne énergétique pour assurer le chauffage de l'habitat qu'il y a le "mauvais" et le "bon" COP, un peu comme il y a le mauvais et le bon cholestérol.

- Le "mauvais COP" c'est l'enfer du "consommer plus" avec tous ces voyages internationaux en avion convergeant vers le pays organisateur de ces COP, 22, 23, 24 25 et bientôt 26 à Glasgow en écosse heureusement repoussé etc... Un enfer pavé de bonnes intentions certes, mais absent de pragmatisme qui nous entraîne années après années vers l'aggravation de notre empreinte écologique

- Le "bon COP", c'est celui du "consommer moins" associé à la thermodynamique et sa pompe à chaleur pour la climatisation de l'habitat. Une chaîne énergétique aux performantes élevées ayant pour valeur le rapport entre l'énergie thermique arrivant dans le logement pour assurer notre confort et l'énergie électrique nécessaire pour produire cette énergie thermique. À l'inverse de la chaîne basée sur le cycle de Carnot et les hautes températures qui fournit de l'énergie mécanique cette chaîne énergétique du "consommer moins" se suffit d'une petite quantité d'électricité: celle nécessaire au moteur électrique entraînant le compresseur. Autre avantage important à l'heure du réchauffement climatique : elle refroidit plutôt notre environnement au lieu de le réchauffer. Quant aux performances de cette deuxième chaîne énergétique on observe que la performance s'améliore

- si la température à la source froide augmente.

- si l'on diminue la température à la source chaude. voir à ce sujet les [radiateurs basse température](#)



ISR investissement socialement responsable
COP coefficient de performance

Les 2 pages qui précèdent sont un petit peu plus difficile à comprendre.

Je vous demande seulement :

- pour la première et sa formule de vérifier qu'elle est exacte algébriquement. On verra par la suite que le terme de gauche représente les performances des anciennes chaînes énergétiques basées sur le moteur thermique correspondant aux figures 9A alors que le terme de droite qui correspond aux figures 9B représente les performances des chaînes énergétiques que nous allons devoir maintenant utiliser vu l'amélioration qu'elles apportent en ce qui concerne leur performances (*COP*)

- pour la page 20 qu'il y a le bon *COP* et le mauvais *COP*

Les pompes à chaleur aquathermique

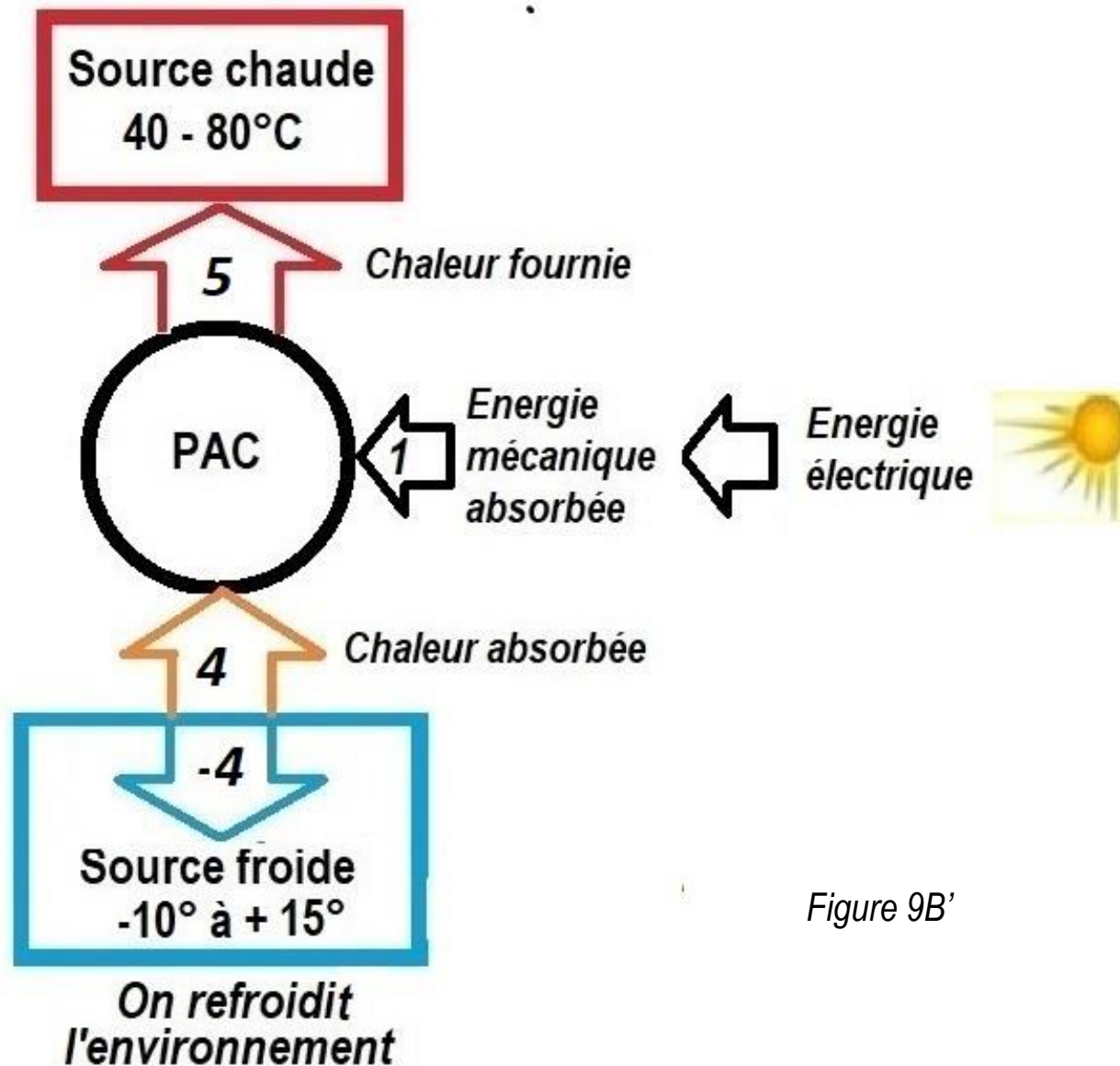


Figure 9B'

La pompe à chaleur aquathermique, comme les moteurs thermiques émettent autant d'énergie qu'ils en reçoivent et respectent les lois de conservation de l'énergie :

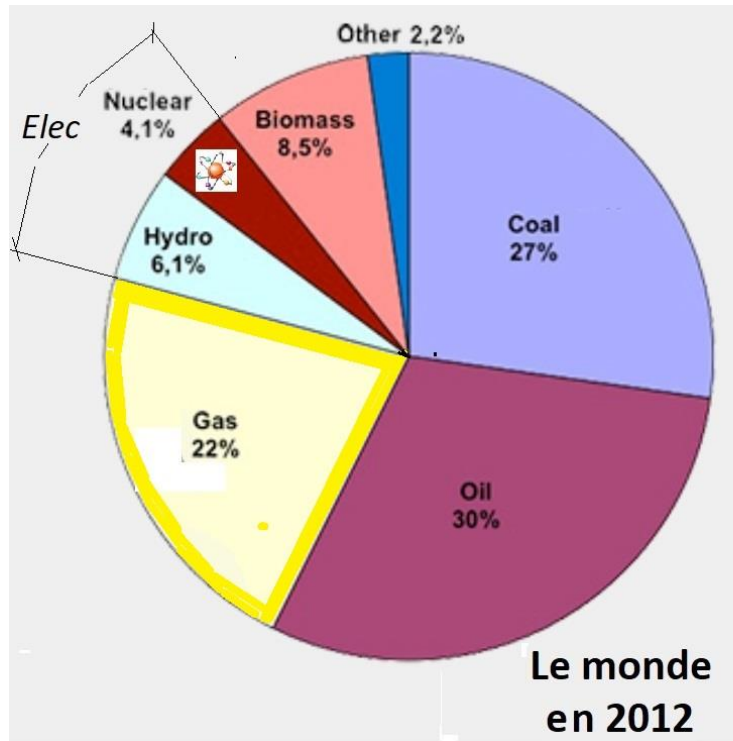
$$4 + 1 = 5$$

*En prélevant l'énergie dans l'eau en hiver leurs performances (**p**) sont presque deux fois supérieures à celles des pompes à chaleur échangeant sur l'air*

$$p = 5/1 = 5 \text{ (COP)}$$

Figure 9B'

Il s'agit de la même chaîne énergétique que celle de la figure 9B qui présente l'avantage de ne pas passer par les hautes températures et le moteur thermique. Mais cette fois en prélevant l'énergie thermique sur l'eau et non sur l'air avec un coefficient de performance COP de 5 au lieu de 3. L'amélioration des performances étant liée aux températures des sources chaudes (T_c) et froide (T_f) plus proches l'une de l'autre. On verra plus tard pourquoi



Le monde
en 2075 ?

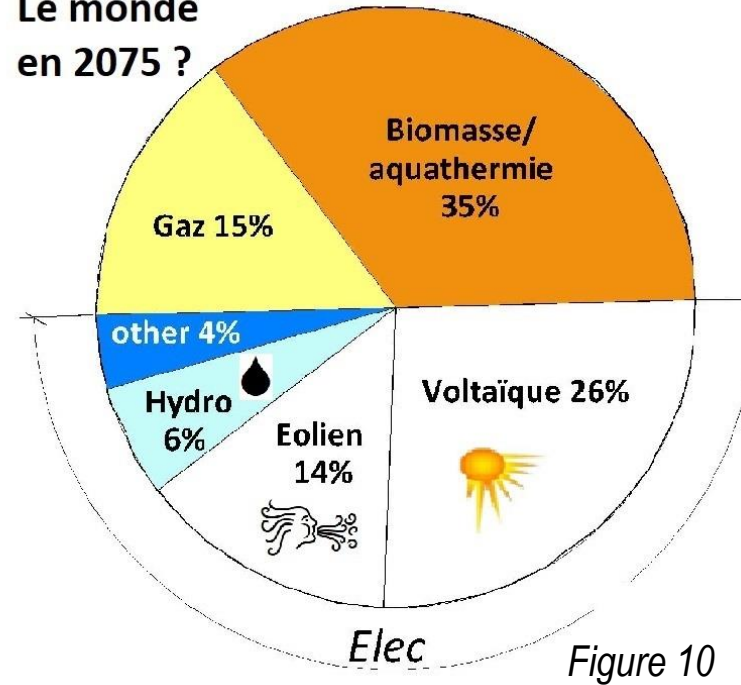


Figure 10

La théorie permet, à partir de la formule $\text{Rendement} = (T_c - T_f) / T_c$ d'évaluer le rendement du cycle de Carnot et de se faire une idée du rapport entre l'énergie mécanique en sortie du *moteur thermique* et la quantité d'énergie thermique qui a été nécessaire pour produire cette énergie mécanique. Le calcul montre qu'en pratique c'est 66 % de l'énergie potentielle contenue dans le combustible qui est perdue et qui réchauffe inutilement notre environnement!. En opposition complète avec le cycle de Carnot la théorie permet de mettre en évidence les performances du chauffage ou de la réfrigération thermodynamique. Une chaîne énergétique qui n'a rien à voir avec la précédente puisque les performances de cette chaîne énergétique s'obtiennent à partir d'une formule qui n'est autre que l'inverse de la précédente à savoir $T_c / (T_c - T_f)$.

Une chaîne énergétique qui est celle du réfrigérateur ou de la pompe à chaleur dans laquelle le système reçoit de l'énergie mécanique au lieu d'en émettre. Une chaîne énergétique qui, à l'inverse de la précédente voit sa performance s'améliorer lorsque la température à la source chaude T_c diminue et que la température à la source froide T_f augmente. À ce point différentes du *moteur thermique* que l'on ne parle plus de rendement mais de performances. Des performances on va le voir incomparablement supérieures au *moteur thermique* et à la combustion permettant de produire au choix de l'énergie thermique positive (du chaud) ou négative (du froid). Ceci en consommant sensiblement 5 fois moins d'électricité qu'avec le chauffage électrique par effet joule. Ce qui précède prouve que les pays dits « développés » n'ont pas montré l'exemple de ce qu'il faut faire en ce qui concerne l'énergie. [Ceci en ne considérant pas l'énergie thermique à sa juste valeur](#). Pour éclaircir la situation, il leur appartient maintenant de reconnaître qu'ils se sont trompés. L'influence néfaste des chaînes énergétiques actuelles qu'il s'agisse du nucléaire ou de la combustion des produits fossiles réside principalement dans le fait qu'elles passent par la case des hautes températures et du moteur thermique pour produire l'énergie électrique nécessaire à nos besoins. L'action de l'homme concernant la température sur terre n'est pas négligeable. Ceci dit l'épuisement prochain de nos réserves d'énergie non renouvelables à l'échelle du siècle et le temps qui va être nécessaire pour modifier nos chaînes énergétiques font que l'urgence du changement est bien là

Figure 10

Elle montre sur la gauche comment le monde s'approvisionne actuellement en énergie et sur la droite comment il pourrait le faire.

- à gauche actuellement grâce à l'essence, au charbon, au gaz, et accessoirement avec l'hydraulique, le nucléaire et la biomasse
- à droite comment il envisage de le faire en 2075. Ceci grâce à la géothermie associée à l'aquathermie, au voltaïque associé à l'éolien et probablement avec un petit reliquat gaz. La Chine optimiste, espère même parvenir au zéro carbone c'est-à-dire sans le gaz dès 2060.

Chaud Froid Performance (CFP)

Une PAC peut fonctionner selon deux modes de fonctionnement

En mode chaud (mode pompe à chaleur) la chaleur émise par le fluide caloporteur à l'intérieur de l'habitation est égale à la chaleur qu'il reçoit à savoir celle émise par le compresseur majorée de celle reçue par l'environnement lorsqu'il le refroidit

En été, une pompe à chaleur peut fonctionner en *mode froid* (mode climatisation) et refroidir l'intérieur du logement au lieu de le réchauffer. Ceci grâce à une vanne 4 voies qui inverse les fonctions assurées par l'évaporateur et le condenseur de telle sorte que le système réchauffe l'environnement au lieu de le refroidir.

Lors de son cycle de fonctionnement le *fluide caloporteur* de la pompe à chaleur passe alternativement de l'état liquide à l'état gazeux pour revenir à l'état liquide. L'énergie qu'il émet lorsqu'il est à l'état liquide dans le condenseur (entropie) est égale à la somme des énergies qu'il reçoit: celle lorsqu'il est à l'état gazeux et à très basse température dans l'évaporateur majorée de l'énergie fournie par le compresseur. Le coefficient de performance (COP) de ces deux systèmes est le rapport entre l'énergie émise par le fluide caloporteur lorsqu'il est à l'état liquide dans le condenseur et l'énergie utile à l'entretien du cycle à savoir celle fournie par le compresseur. On démontre que le **COP** de ces 2 chaînes énergétiques est égal à $T_c / (T_c - T_f)$. T_c et T_f étant les températures aux sources chaude et froide exprimées en degré Kelvin. voir [démonstration](#)

L'entropie du [fluide caloporteur](#) s'exprime en kJ/kg. La puissance thermique délivrée par une pompe à chaleur en mode chaud est égal à l'entropie du fluide caloporteur par son débit $\text{kJ/kg} \times \text{kg/s} = \text{kJ/s} > \text{kW}$

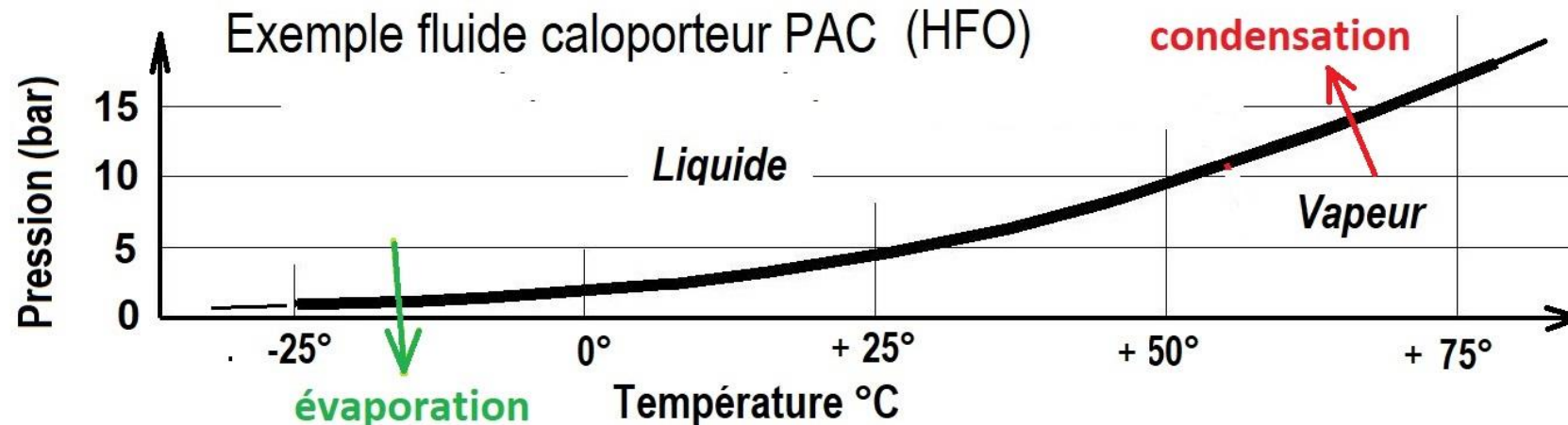


Figure 11

Voir page 107

Figure 11

Cette figure est un moyen pour moi de commencer à vous expliquer comment se font les transferts thermiques permettant de prélever l'énergie thermique dans notre environnement naturel avec la pompe à chaleur. Ceci sachant que :

- lorsque le fluide caloporteur est chaud lors de la phase condensation, il réchauffe l'habitat
- lorsque le fluide caloporteur est très froid lors de la phase évaporation, il refroidit l'environnement

Le diagramme de Mollier

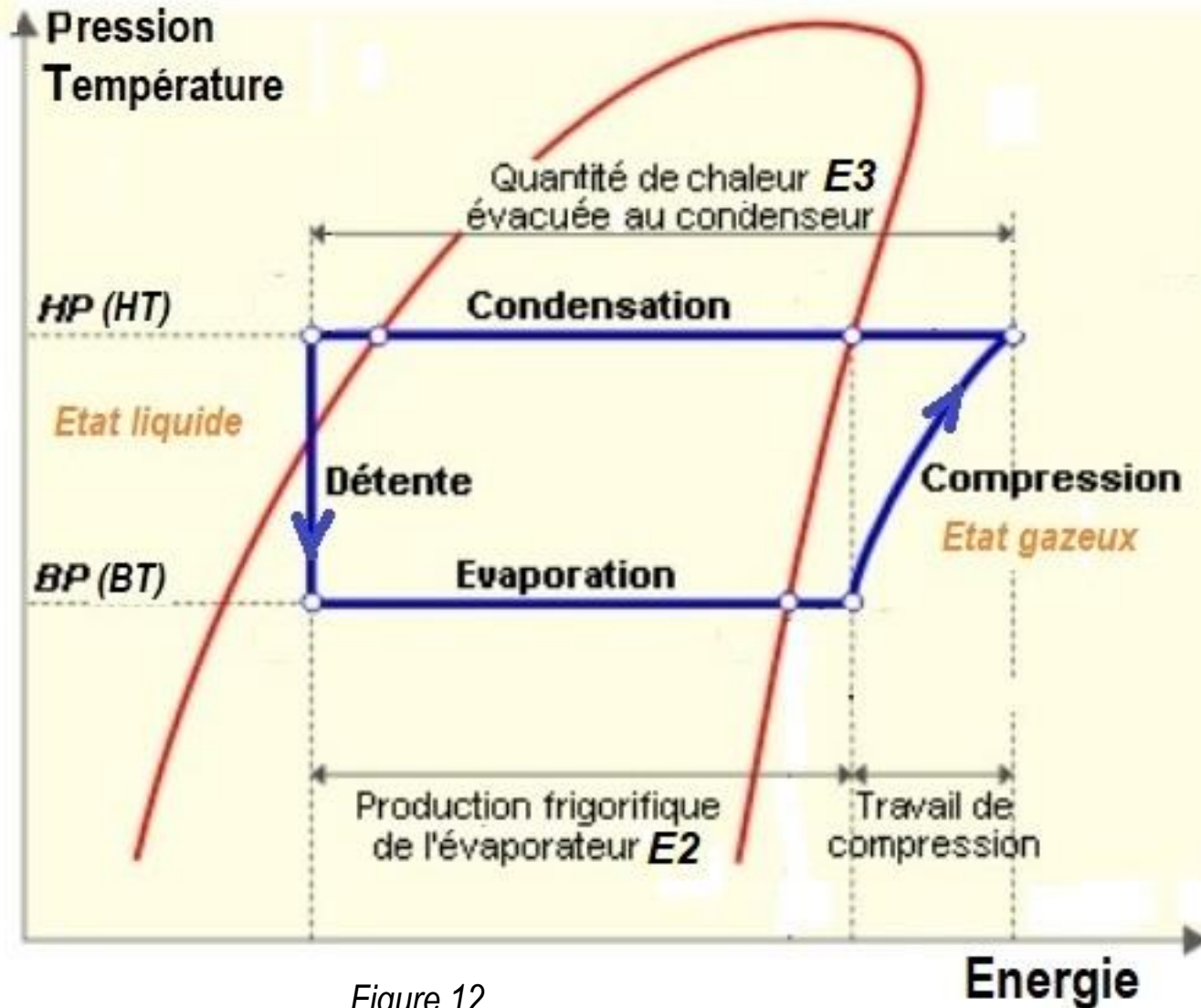


Figure 12

Lorsque le fluide caloporteur de la pompe à chaleur a fait un tour complet en se retrouvant dans l'état gazeux initial à l'entrée du compresseur après être passé par l'état liquide dans le condenseur, l'énergie qu'il a reçu, lors de la phase compression majorée de l'énergie thermique reçue de l'environnement en le refroidissant est égale au signe près à la quantité de chaleur qu'il a émis dans le condenseur.

Figure 12

Elle représente le diagramme de Mollier bien connu des techniciens se préoccupant des pompes à chaleur. Elle est complémentaire de la figure 11 de la page précédente.

Ce qu'il est important de comprendre c'est que la chaleur transmise à l'habitation par le condenseur de la pompe à chaleur est égale compte tenu de la conservation de l'énergie à la somme des énergies frigorifiques émise à l'évaporateur majoré du travail de compression lorsque le fluide caloporteur de la pompe à chaleur est à l'état gazeux.

Le fluide caloporteur reçoit et émet de l'énergie thermique

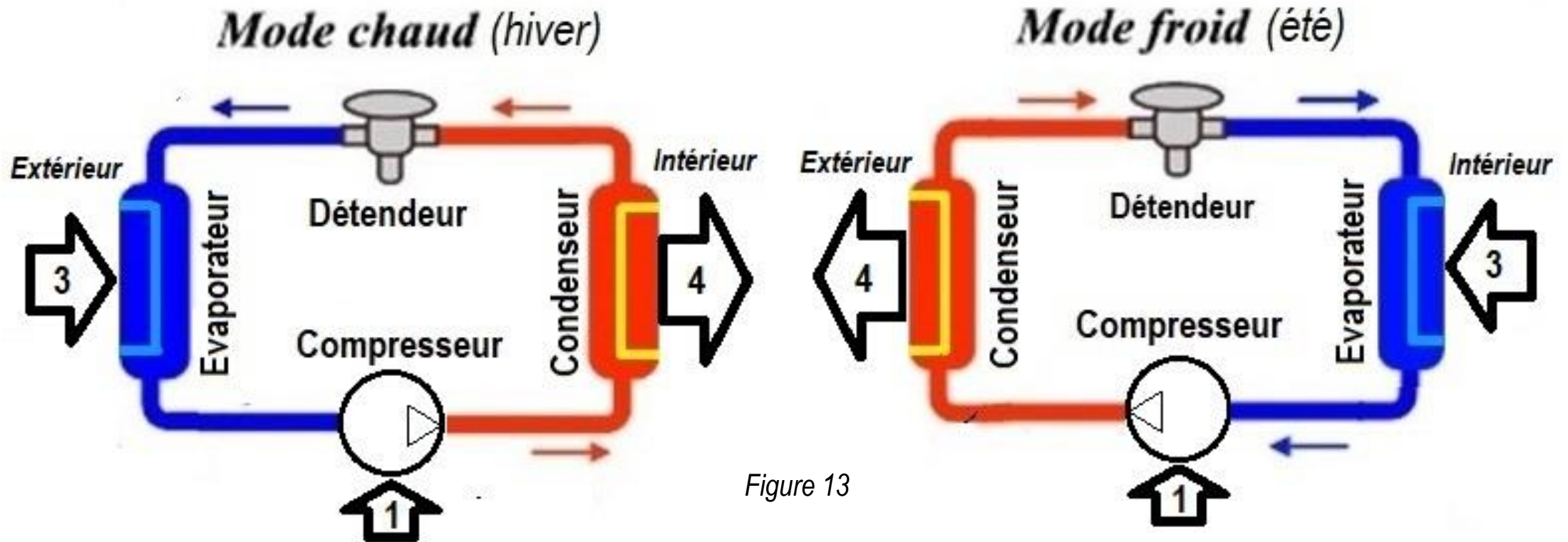


Figure 13

Que l'on soit en chauffage ou en climatisation la quantité de chaleur émise par le fluide caloporteur (flèche sortante) est égale à la quantité de chaleur qu'il reçoit (flèches entrantes). La qualité d'une chaîne énergétique se mesure comme étant sa faculté de satisfaire au mieux le besoin. Le besoin étant pour la chaîne de gauche la quantité de chaleur émise dans le condenseur (4) en regard de l'énergie électrique consommée égale à 1 (COP = 4). Quant à la performance de la chaîne de droite, elle s'évalue comme étant le froid émis par le fluide caloporteur dans l'évaporateur en regard de l'énergie électrique consommée égale à 1 (COP = 3).

Chaud ou froid dans l'habitat avec l'eau (douce ou [salée](#))

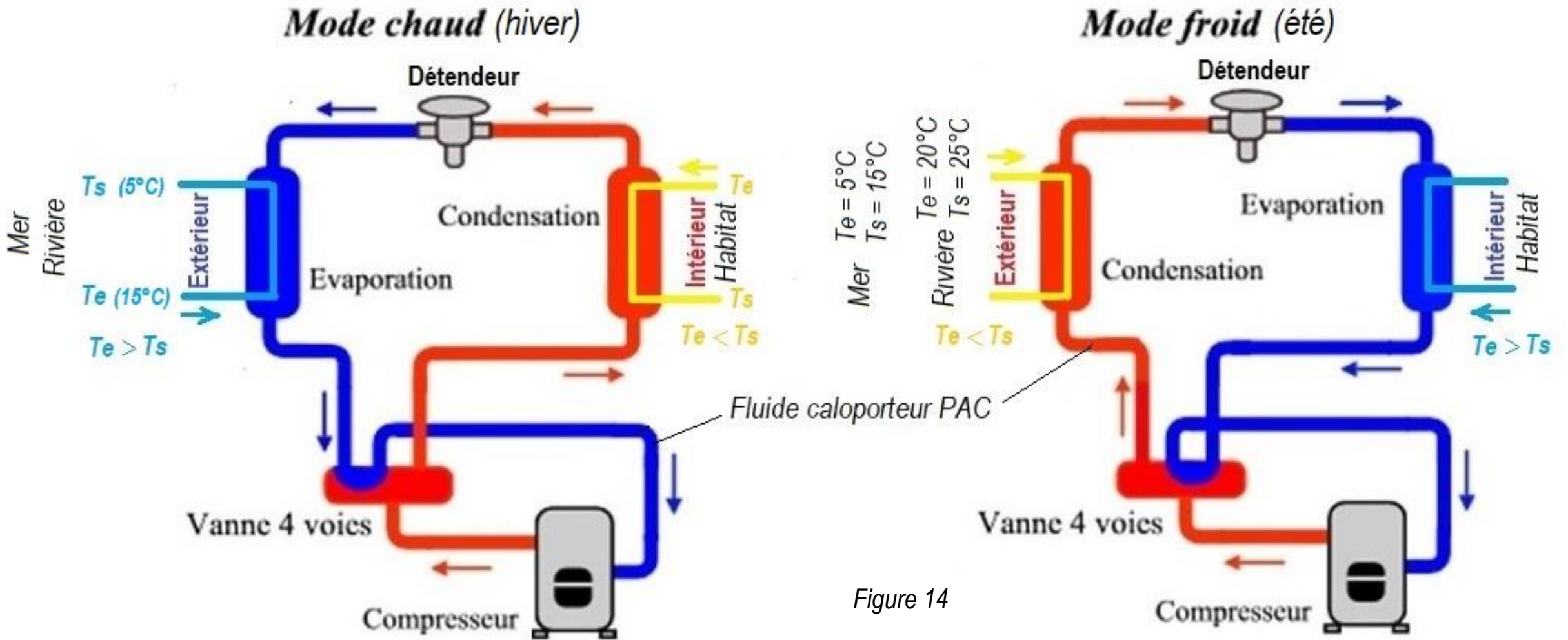


Figure 14

Mode pompe à chaleur (PAC)

Mode climatisation habitat

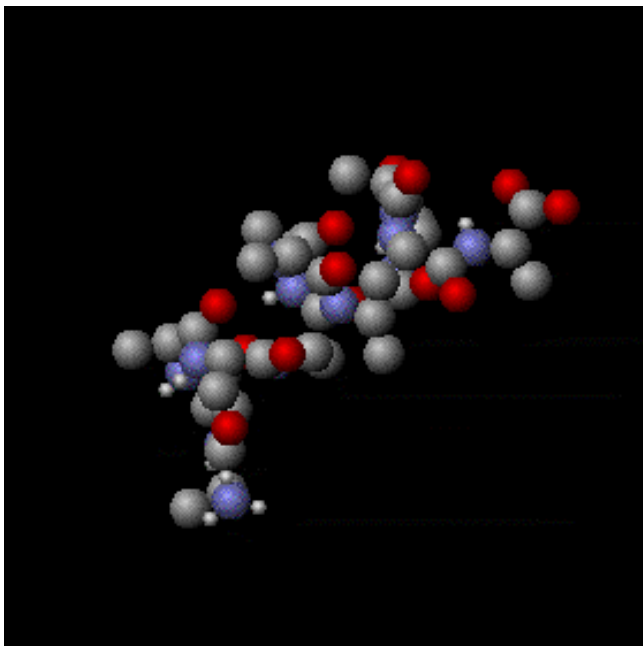
Figure 13 et 14

Ces 2 figures montrent comment il est possible en inversant le débit au niveau du compresseur d'inverser les flux thermiques. Ceci de telle sorte que le système puisse générer du chaud lorsqu'il fait froid et du froid lorsqu'il fait chaud.

L'inversion du débit pouvant se faire en changeant le sens de rotation du compresseur (fig 13) ou en rajoutant une vanne 4 voies sur le circuit (fig 14)

La pompe à chaleur:

L'égalité de Clausius



A -273°C rien ne bouge

Pour voir ce qui se passe lorsque la température augmente cliquer [ici](#)

Et si elle augmente encore [ici](#)

On ne peut évoquer les systèmes type pompe à chaleur sans introduire les études de Rudolf Clausius sur l'entropie de la matière et le fait que l'énergie contenue dans celle-ci ainsi que sa désorganisation augmente avec sa température. A la température de -273°C soit 0°Kelvin la matière est figée comme représenté sur la figure de gauche. Par contre si la température augmente la désorganisation de la matière augmente en proportion.

*Il y a beaucoup de paramètres qui caractérisent la qualité du fluide circulant dans le cœur d'une pompe à chaleur mais les 2 caractéristiques principales du fluide dit caloporteur d'une pompe à chaleur est sa capacité à générer du froid dans l'évaporateur à la sortie du détendeur et du chaud dans le condenseur (Ce que le thermodynamicien appelle son **enthalpie E** et qui s'exprime en kilojoule/kg) lorsqu'il vient d'être comprimé à l'état gazeux par le compresseur.*

Pour une pompe à chaleur décrivant un cycle thermodynamique (en principe réversible), l'application du second principe au système ditherme, permet d'écrire que **$E3 / Tc = E2 / Tf$** (Egalité de Clausius). Introduite par Rudolf Clausius dans ses études sur l'entropie de la matière, l'égalité de Clausius qui peut s'écrire

$E3 / E2 = Tc / Tf$ caractérise le degré de désorganisation des particules constituant cette dernière. (Voir page 20)

La quantité d'énergie contenue dans la matière étant d'autant plus grande que la température de celle-ci est élevée.

À la température de 0°Kelvin (-273°C), la matière est figée et l'énergie contenue dans celle-ci est nulle.

Cette désorganisation ainsi que l'énergie contenue dans la matière prouve la potentialité du chauffage thermodynamique. En effet, lorsque la température de la source chaude est égale à la température de la source froide, par exemple lorsque l'on commence à chauffer l'eau froide sanitaire à 10°C en utilisant l'eau de la nappe phréatique également à 10°C , **Tc** étant égal à **Tf** , il en résulte que **Tc / Tf** est égal à 1 ainsi que **$E3 / E2$** . Cela signifiant que toute l'énergie thermique **$E3$** disponible à la source chaude est théoriquement de l'énergie renouvelable **$E2$** prélevée dans l'environnement, l'énergie électrique **$E2$** nécessaire pour entrainer le compresseur étant théoriquement nulle. Il y a bien sur des limites physiques à cela mais la page 86 du complément illustre la potentialité de la thermodynamique. Cette limite physique semble être actuellement un COP voisin de 6

(voir la revue CFP et le constructeur de PAC Carrier aux USA qui évoque des COP de 7)

[Une chaîne énergétique oubliée](#)

Lorsque l'on parle de pompes à chaleur on ne peut ignorer ce qu'est l'enthalpie. Une notion associée à l'agitation interne de la matière.

La matière contient en effet en son sein de l'énergie thermique par le fait de l'agitation des molécules de matière qui la constituent

- lorsque la température de la matière est à $- 273^{\circ}\text{C}$ l'agitation ainsi que la quantité d'énergie contenues dans celle-ci est nulle

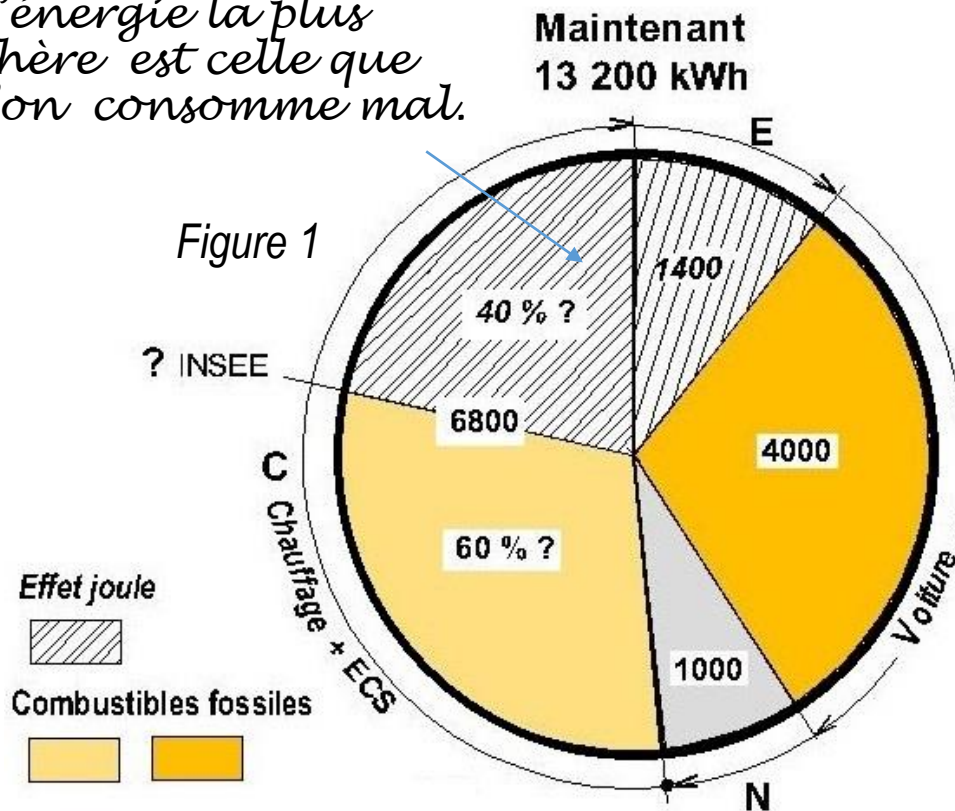
- lorsque la température de la matière augmente l'agitation de celle-ci augmente ainsi que la quantité d'énergie contenue dans cette dernière

Je reviendrais sur cette notion très importante.

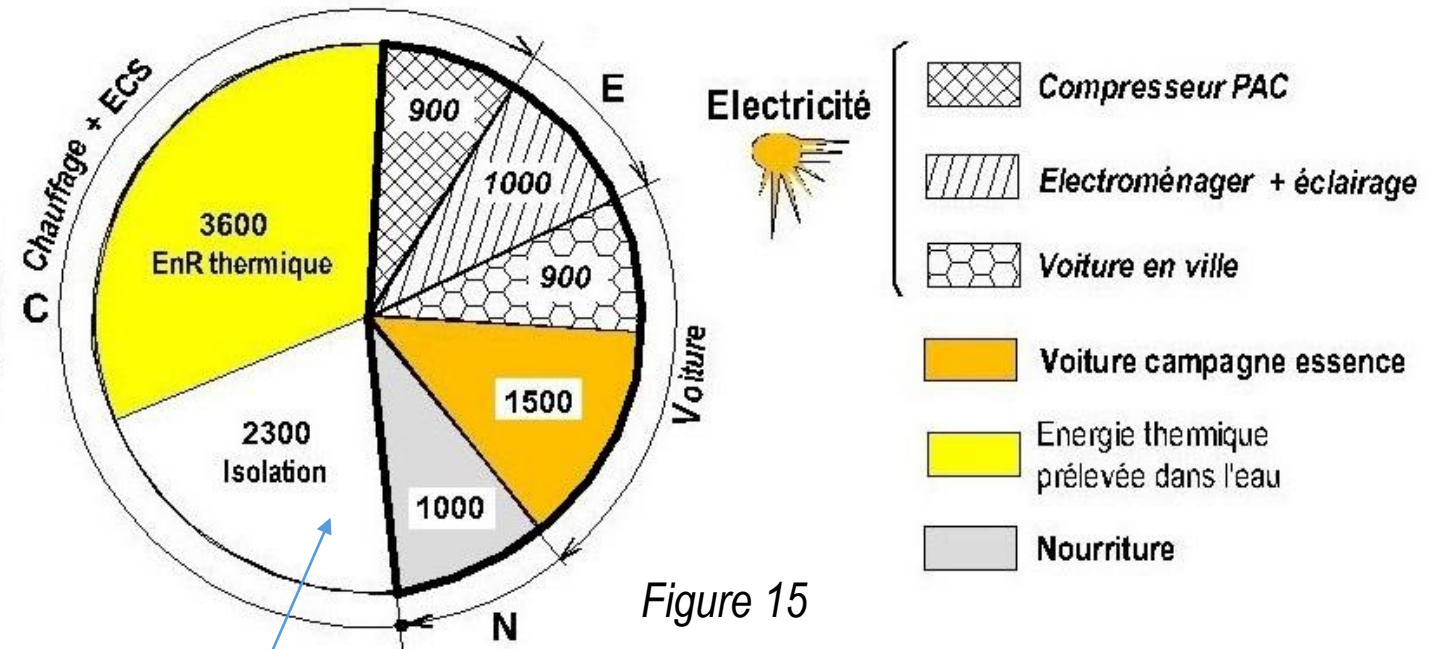
Nouvelles chaînes énergétiques en IDF

Consommation par citadin (chauffage + voiture + nourriture)

L'énergie la plus chère est celle que l'on consomme mal.



Après "SWE"
Consommation réduite à 5 300 kWh



Cartographie

L'énergie la moins chère est celle que l'on ne consomme pas

Figures 1 et 15

La figure 1 est sensiblement la consommation moyenne annuelle en énergie d'un parisien tel que cela a été évoqué précédemment. Quant à la figure 15 elle représente ce que pourrait être cette consommation avec une isolation raisonnable en adoptant :

- un chauffage thermodynamique échangeant sur l'eau ayant un *COP* de 5
- une motorisation hybride rechargeable pour la voiture. Ceci avec une voiture qui roulerait en mode électrique pour tous les petits déplacements en région parisienne et en mode conventionnel essence pour les grands déplacements vers la province pendant les vacances

Nouvelle façon de satisfaire nos besoins énergétiques avec la « Solar Water Economy » (SWE)

La "SWE" est la vision de ce que pourrait être une transition énergétique allant dans le sens de l'abandon de nos 2 principales chaînes énergétiques actuelles à savoir la combustion des produits fossiles et l'effet joule devenues obsolètes en raison de leur piètres performances. Ceci en ne faisant appel qu'au soleil et à l'eau pour satisfaire nos besoins en énergie les besoins en électricité avant et après mise en place des nouvelles chaînes énergétiques assurant la climatisation de l'habitat et la motorisation de la voiture individuelle. La partie gauche de la figure 15 montre comment l'on satisfait nos besoins en énergie actuellement et la partie droite comment le besoin en énergie pourrait être satisfait avec le concept énergétique "SWE" Un concept dans lequel l'eau occupe une position centrale qui est résumé pour ce qui concerne les généralités dans la dernière partie de mon [ebook](#). Une position centrale par le fait que l'utilisation de l'eau au lieu de l'air minimise le besoin liée aux apports solaires électrique et est mieux adaptée que l'air pour la santé de l'homme*. Si nous procédons sans trop attendre, il ne semble pas trop tard d'espérer mettre en place ce nouveau concept sans remettre trop gravement en cause notre modèle économique. On va se rendre compte qu'avec ces nouvelles chaînes énergétiques on pourra préserver nos ressources grâce à l'eau et au soleil en consommant nettement moins d'énergie finale qu'actuellement. Ceci particulièrement pour le poste le plus lourd quantitativement celui du chauffage de l'habitat. On va voir comment, en assurant son confort, la nouvelle consommation en énergie d'un citoyen français après mise en place de ces nouvelles chaînes énergétiques que nous allons évoquer maintenant peut devenir égale à 5300 kWh au lieu de 13 200 . Ceci moyennant un effort abordable pour l'isolation de l'existant (33%) avec des consommations pour chaque poste se répartissant ainsi.:

C La zone jaune représente **le chauffage**: 3 600 kWh d'énergie thermique gratuite prélevée dans l'environnement + 900 kWh électrique = **4500 kWh**

E Le chiffre de **1000 kWh** la nouvelle consommation correspond à **l'électroménager** et à l'éclairage** (environ -30%)

N La couleur grise, **1 000 kWh** inchangée représentant l'énergie contenue dans la **nourriture** produite localement***

V La nouvelle consommation pour la **voiture**. Ceci avec la voiture hybride rechargeable. La zone colorée rouge pendant les vacances (1 500 kWh de produits fossiles) et la zone avec figures hexagonales correspondant à la circulation en ville en mode électrique (900 kWh)

* La différence entre la température intérieure de notre corps et celle de notre environnement est très importante ce qui condamne dans la pratique l'utilisation de l'air comme véhicule thermique pour assurer notre confort en ville. Le chauffage et la climatisation thermodynamique consiste en effet à refroidir notre environnement en hiver et à le réchauffer en été pour assurer notre confort thermique à l'intérieur de notre habitat. A ce sujet chacun d'entre nous peut en effet comprendre que si le chauffage thermodynamique refroidit au plus froid de l'hiver l'air extérieur dans les villes de 4 ou 5 ° C alors qu'il fait -20 ° C dehors pour assurer le confort de ceux qui sont à l'intérieur de leur maison cela ne va pas affecter dangereusement ceux qui sont à l'extérieur. Par contre s'il fait en été 45 ° C dehors et qu'il faut augmenter la température extérieure de 5 degrés pour assurer le confort thermique de ceux qui sont à l'intérieur chacun d'entre nous comprend qu'il en est tout autrement. En d'autres termes on conçoit que pour satisfaire autant ceux qui sont dehors que ceux qui sont dedans, il est irrecevable d'espérer généraliser les échanges thermiques avec l'air en ville pour assurer la climatisation des logements.

** Concernant la consommation d'énergie et d'eau pour [produire les vêtements en coton](#) et pour laver le linge (voir par exemple le dispositif à ultrasons [Dolfin](#)) nous avons des progrès à faire

*** Ceci dit la tendance du [toujours+](#) et des transports maritimes internationaux de la nourriture par porte conteneurs est bien là avec le risque de voir le poste **V** flamber.

C'est surtout ce que l'on appelle la résistance de vague du paquebot qui est source de consommation énergétique. Nos kayakistes ont trouvé comment supprimer cette [résistance de vague](#) ce qui permet d'augmenter la vitesse sans consommer plus d'énergie

Conductivité thermique (Isolation)

Conductivité λ (lambda)	Watt.m ⁻¹ .K ⁻¹
Air et le verre	0,024
Bois	0,2
Eau	0,6
Terre sèche	0,75
Acier	50
Cuivre	386

La conductivité thermique est un paramètre associé à la matière qui permet de chiffrer sa capacité à transmettre l'énergie thermique.

Cette capacité est d'autant plus élevée que λ (lambda) est important. Lambda (λ) est défini à partir du système international d'unité (le mètre) à savoir pour une épaisseur de matière égale au mètre sur une surface de 1 m². A titre d'exemple:

- La puissance thermique traversant une couche d'air de 2 cm d'épaisseur soit 0,02 m (par exemple entre deux vitres) laisse passer une puissance de $0,024/0,02 = 1,2$ watt par m² et 1 ° K (ou 1 ° C) de différence de température entre la face intérieure des vitres
- Pour une même différence de température de 1 ° K (ou 1 ° C) entre ses 2 faces, la puissance thermique traversant une paroi métallique en acier de 1 mm d'épaisseur est de $50/0,001 = 50\,000$ watt par m²

En d'autres termes on peut dire qu'à épaisseur égale, le verre et l'air qui laissent passer l'énergie sensiblement la même quantité d'énergie sont environ 8 fois moins déperditif que le bois et 2 000 fois moins déperditifs que l'acier.

Quant au cuivre son coefficient de transmission thermique extrêmement élevé est bien utile pour transmettre la chaleur du circuit chauffage à l'eau chaude sanitaire. (Voir page 53)

La conductivité thermique des matériaux est un paramètre important en ce qui concerne :

- l'isolation des bâtiments
- La transmission de l'énergie thermique dans les échangeurs de température

Ces deux pages qui suivent mettent en évidence que l'eau, en raison de sa capacité à emmagasiner la chaleur ou le froid est un formidable véhicule thermique.

La capacité thermique massique (faut-il prélever l'énergie thermique naturelle dans l'air, la terre, ou eau ?)

Homo sapiens craint plus le chaud que le froid. Lors de la canicule de l'été 2003 qui a fait selon l'Inserm plus de 70 000 morts en Europe, les températures enregistrées n'ont guère dépassées les 40 degrés soit seulement 3 degrés au-dessus de la température intérieure naturelle du corps humain de 37 degrés C. Ceci alors que lorsque la température extérieure est de 7 ° C, il supporte sans problème en se couvrant une différence de 30° C dix fois supérieure. Heureusement que l'eau sur la peau qui s'évapore dans l'air apporte de la fraîcheur vu que nous n'allons probablement pas pouvoir généraliser la climatisation avec l'air à l'intérieur de l'habitat. Ceci compte tenu du fait que l'air n'est pas le véhicule thermique adapté pour réguler la température. Une raison importante va en effet probablement condamner cette technologie en ville, elle est dans le fait que pour créer du froid à l'intérieur de l'habitat au plus chaud de l'été ces évaporateurs (qui fonctionnent comme le fait un réfrigérateur) réchauffent dangereusement l'air ambiant extérieur des villes déjà très élevée. Si l'on devait généraliser ce type de régulation à l'ensemble de l'habitat urbain, la température à l'intérieur des villes deviendrait intenable. Qui plus est, en raison du bruit qu'ils génèrent et de leur encombrement les évaporateurs des pompes à chaleur *air air* [sont gênants](#). Heureusement comme nous le verrons par la suite, grâce à la Seine, le potentiel thermique de l'eau superficielle est là pour nous aider. On mesure en écrivant ces lignes tout l'intérêt de la "Solar Water Economy" qui échange l'énergie thermique renouvelable dans l'eau et non dans l'air. Ceci dans la mesure où il est alors possible de restituer dans l'eau géothermale des nappes captives profondes l'énergie thermique que l'on y a prélevée en hiver. La qualité de l'air à l'intérieur de l'habitat nécessite une bonne [ventilation des bâtiments](#) et est indispensable.

Air ou eau?	<u>Phase</u>	Capacité thermique massique (J K ⁻¹ kg ⁻¹)
<u>Air</u> (sec)	gaz	1 005
Air (saturé en <u>vapeur d'eau</u>)	gaz	≈ 1 050
Eau	liquide	4 185

On constate sur le tableau ci-contre que la capacité thermique massique de l'eau (4,18 kilojoules/kg et degré) est sensiblement 4 fois plus importante que celle de l'air. Pourtant on verra que le potentiel thermique de l'eau géothermale profonde est relativement faible en regard du besoin important résultant de la densité urbaine élevée. Il faut savoir qu'une capitale comme Paris intra-muros et sa proche banlieue ne laisse sensiblement que 50 m² au sol disponible par parisien (20 000 habitants au km²)

La chaleur spécifique.

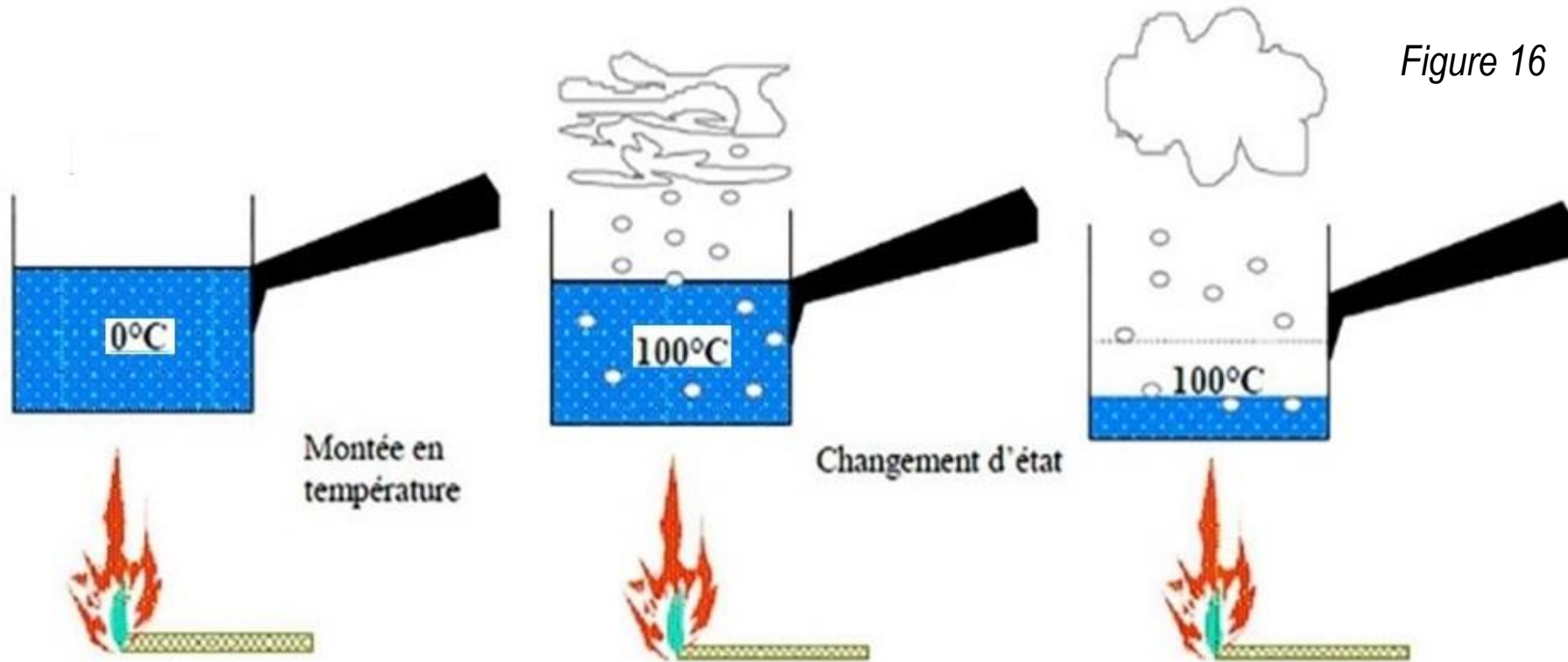
Pour augmenter la température de un gramme ou un cm³ d'eau de 1°C, il faut fournir une quantité de chaleur égale à 1 petite calorie.

L'anglais James Prescott a établi l'équivalent mécanique de la chaleur : à savoir 1 petite calorie = 4,18 joules

Cette correspondance permet d'établir qu'il faut une énergie égale à 1,16 kWh pour élever 1 m³ d'eau de 1°C

(Ceci vu 1 kilocalorie correspond à 4,18 kilojoules et qu'il y a 3600 kilojoules dans 1 kWh)

L'eau véhicule thermique



Sa chaleur spécifique 4,18 kJ/kg et degréC

on a : $W = 1,16 \ V \times \Delta T$

énergie en kWh volume en m³ écart de température en °C

ou en puissance :

Puissance en kW $\cong$ débit en m³/h $\times$ écart de température en °C

Sa chaleur latente 2250 kJ/kg

Figure 16

Qui plus (Voir fig 16) est on s'aperçoit qu'en mettant une casserole d'eau très froide sur le feu et en laissant la même puissance de chauffe, on constate qu'il faut 5 fois plus de temps pour évaporer l'eau que pour élever la température à 100 degrés. Cette capacité des corps à transférer de l'énergie lorsqu'ils changent d'état est le point de départ qui permet de comprendre le chauffage thermodynamique.

Flux thermique eau avec mélange physique

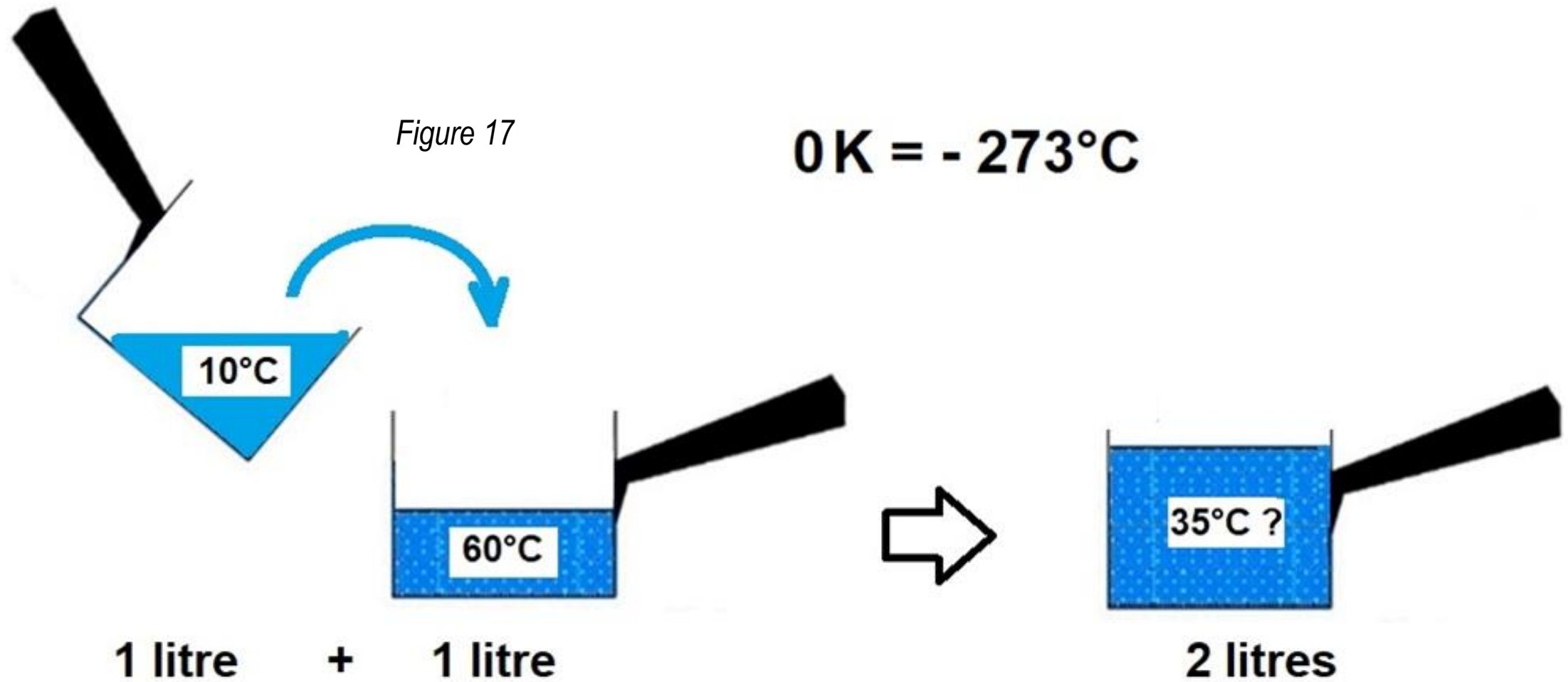


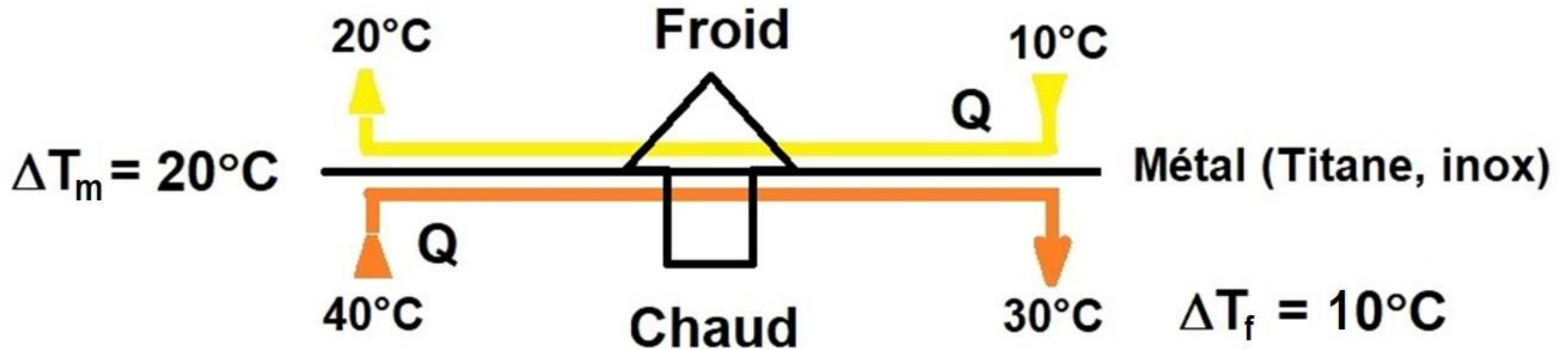
Figure 17

Si on mélange un litre d'eau à 10 degrés avec un litre d'eau à 60 degrés on devine intuitivement que l'on obtient 2 litres d'eau à 35 degrés.
(Les quantités sont les mêmes et la moyenne arithmétique de $60+10$ est 35.

Dans la pratique les deux potentiels thermiques s'additionnent ce qui permet de trouver la température du mélange lorsque les volumes ne sont pas les mêmes (voir lien vers théorie)

Flux thermique sans mélange physique

Figure 18



Le milieu froid reçoit une puissance thermique venant du milieu chaud

$$P \text{ en kW} \cong Q \text{ (débit en m}^3\text{/h)} \times \Delta T_f \text{ en } ^\circ\text{C} = 10 Q$$

Cette puissance traverse la paroi métallique avec un écart de température ΔT_m de 20°C la surface d'échange étant calculée par le constructeur de l'échangeur de température. A noter que l'écart de température n'est pas nécessairement constant le long des plaques (Voir pour cela page 47 ainsi que le complément concernant les échangeurs à plaques page 106 avec les transferts thermiques envisageables selon la nature du métal et son épaisseur)

Figure 18

Il est possible avec les échangeurs à plaques métalliques d'assurer des transferts thermiques importants sans mélange physique entre l'eau chaude et l'eau froide. La quantité de chaleur émise par le réseau chaud inférieur est égale à la quantité de chaleur reçue par le milieu froid supérieur.

Si les débits sur le circuit inférieur chaud et supérieur froid sont identiques la chute de température sur le milieu chaud est égale à l'augmentation de température sur le milieu froid.

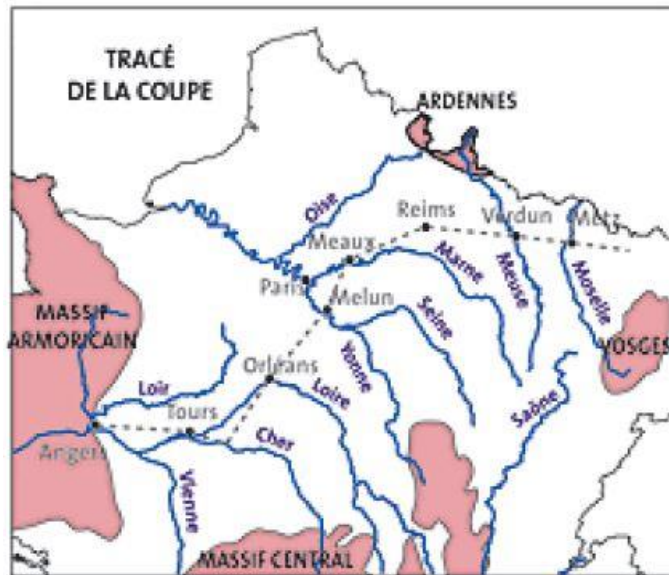
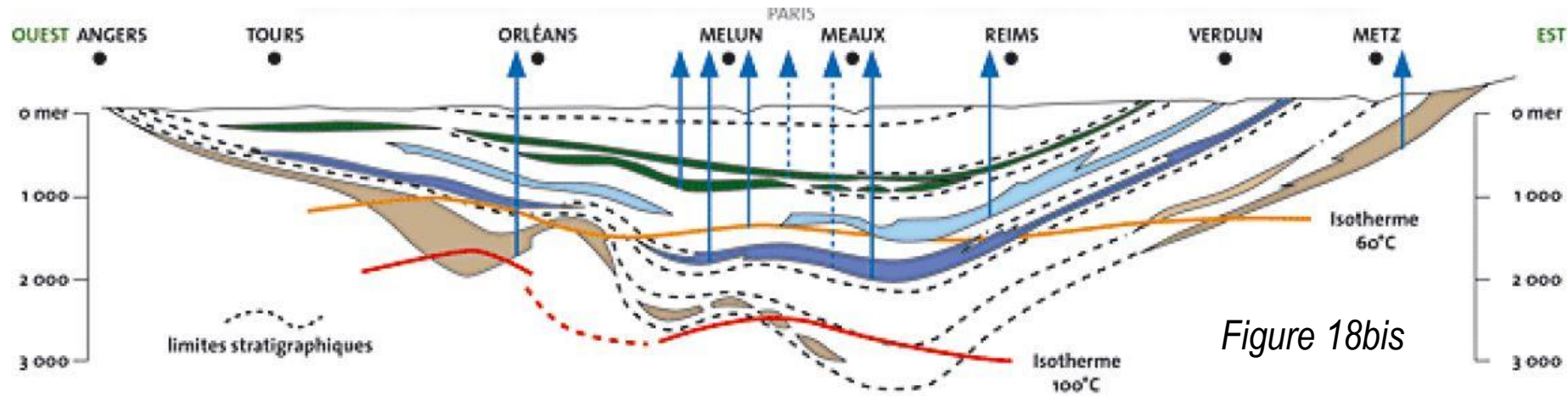
On verra par la suite que la différence de température de part et d'autre de la plaque métallique entre l'entrée et la sortie ne sont pas nécessairement constants.

Figure 18 suite

Il est possible, en observant la figure 18 de commencer à extrapoler ce qui va être dit les pages suivantes. Ceci en considérant que le réseau inférieur est celui de l'eau géothermale profonde des nappes captives alors que celui du réseau supérieur est le réseau alimentant l'évaporateur des pompes à chaleur provenant de la Seine.

On constate avec ce circuit hydraulique que les 2 potentiels thermiques, géothermique et superficiel s'additionnent. Ceci sans qu'il y ait le moindre mélange physique entre les deux écosystèmes lors des transferts thermiques. On comprend alors l'importance du sous-sol parisien notion évoqué dans la *production d'énergie*.

Les grands aquifères du bassin parisien



PÉRIODES		AQUIFÈRES
SECONDAIRE	TERTIAIRE 65 millions d'années	
	CRÉTACÉ 140 millions d'années	NÉOCRÉTACÉ Sables de l'Albien Sables du Néocomien
		ÉOCRÉTACÉ
	JURASSIQUE 195 millions d'années	MALM Calcaires du Lusitanien
		DOGGER Calcaires du Dogger
		LIAS
	TRIAS 225 millions d'années	Grès du Retien Grès de Lorraine à l'est Grès fluviatiles à l'ouest
	PRIMAIRE	

Les effets de parois

Avec l'eau dans les tuyaux

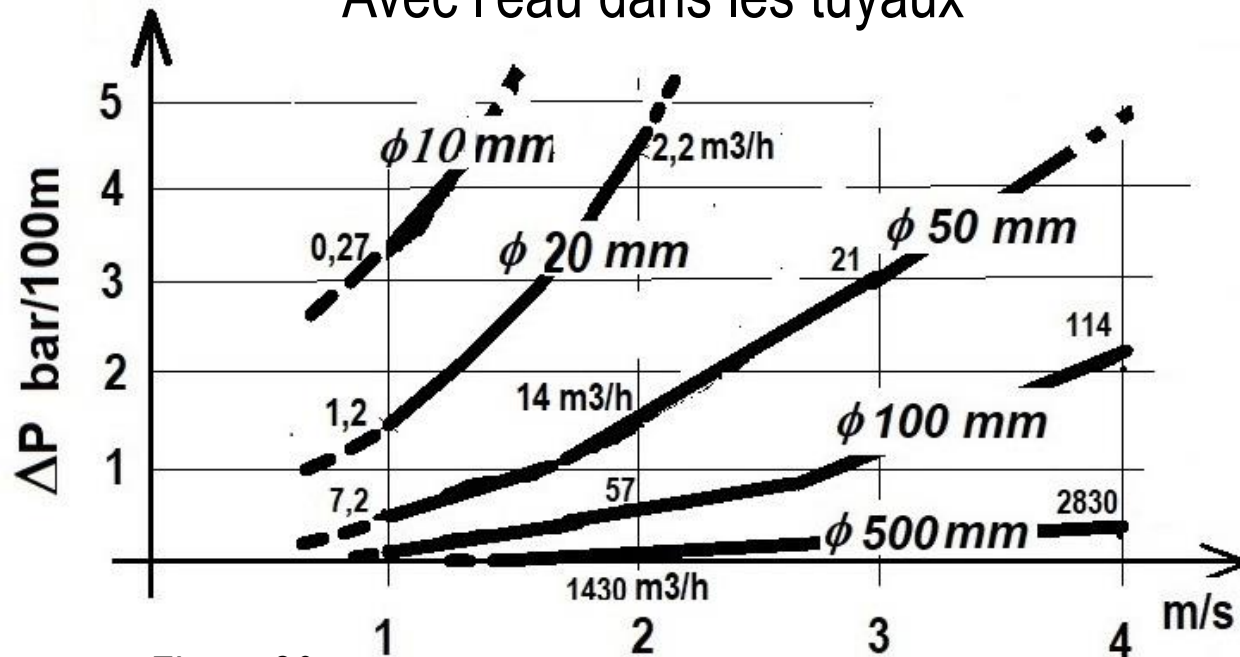


Figure 20 Vitesse de l'eau dans la tuyauterie

Avec l'air à la surface de la terre

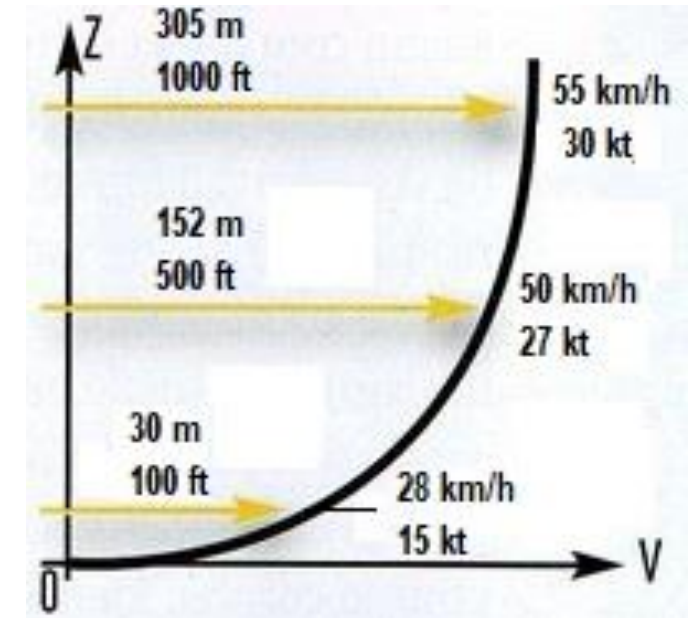


Figure 21 [Vers le gigantisme](#)

Les courbes ci-dessus ont été tracées en faisant appel aux théorèmes de Bernoulli et à la viscosité des fluides. [Voir OCES](#)

Les viscosités de l'air et de l'eau sont certes très différentes mais il faut savoir que lorsqu'un fluide se déplace le long d'une paroi qu'il s'agisse de l'eau ou de l'air, la vitesse du fluide augmente au fur à mesure que l'on s'éloigne de la paroi et est nulle au contact de celle-ci. Ces effets de paroi évoqués ci-dessus et les chutes de pression qui en résultent sont donc autant valables pour l'eau circulant dans une tuyauterie (figure de gauche) que pour l'air circulant à la surface de la terre (figure de droite). Il en résulte que pour une même vitesse de circulation de l'eau dans la tuyauterie les pertes de charges en ligne sont beaucoup plus importantes pour les tuyauteries de petit diamètre que pour celles de grande dimension. ([Voir fichier xls](#) pour calcul). Il en résulte également que les pales des éoliennes ne doivent pas être trop proche de la surface de la terre vu que la vitesse du vent augmente au fur à mesure que l'on s'éloigne du sol.

Figure 20

On comprend au travers des propos qui précèdent que l'étude de l'eau qui circule dans les tuyauteries ainsi que l'évaluation des pertes de charge associées à cette circulation sont indispensables pour pouvoir dimensionner correctement les réseaux de chaleur. Le constat est le suivant : pour limiter les pertes de charge en ligne, il faudra en raison des effets de parois éviter impérativement les grandes longueurs avec les petites tuyauteries.

Figure 21. Le constat est un peu le même avec les éoliennes. L'air est évidemment totalement différent de l'eau en ce qui concerne la viscosité et la densité mais le constat est similaire : la vitesse du vent augmente si l'on s'éloigne de la surface du sol, ce qui explique en partie l'orientation vers le gigantisme actuel en ce qui concerne les éoliennes

L'étalement urbain: La ville et la campagne

Répartition moyenne mondiale

La tendance à l'urbanisation semble inexorable. Ceci au détriment du confort, de la surface habitable et de l'agrément de vie et de la santé. Le coronavirus a toutefois mis en avant une nouvelle méthode de travail basée sur le télétravail. Cette méthode qui permet de diminuer les déplacements en voiture ou par les transport en commun n'est bien évidemment pas valable pour tous les corps de métier. La plupart de ceux faisant appel pour l'essentiel à l'ordinateur et au téléphone sont toutefois accessibles au télétravail

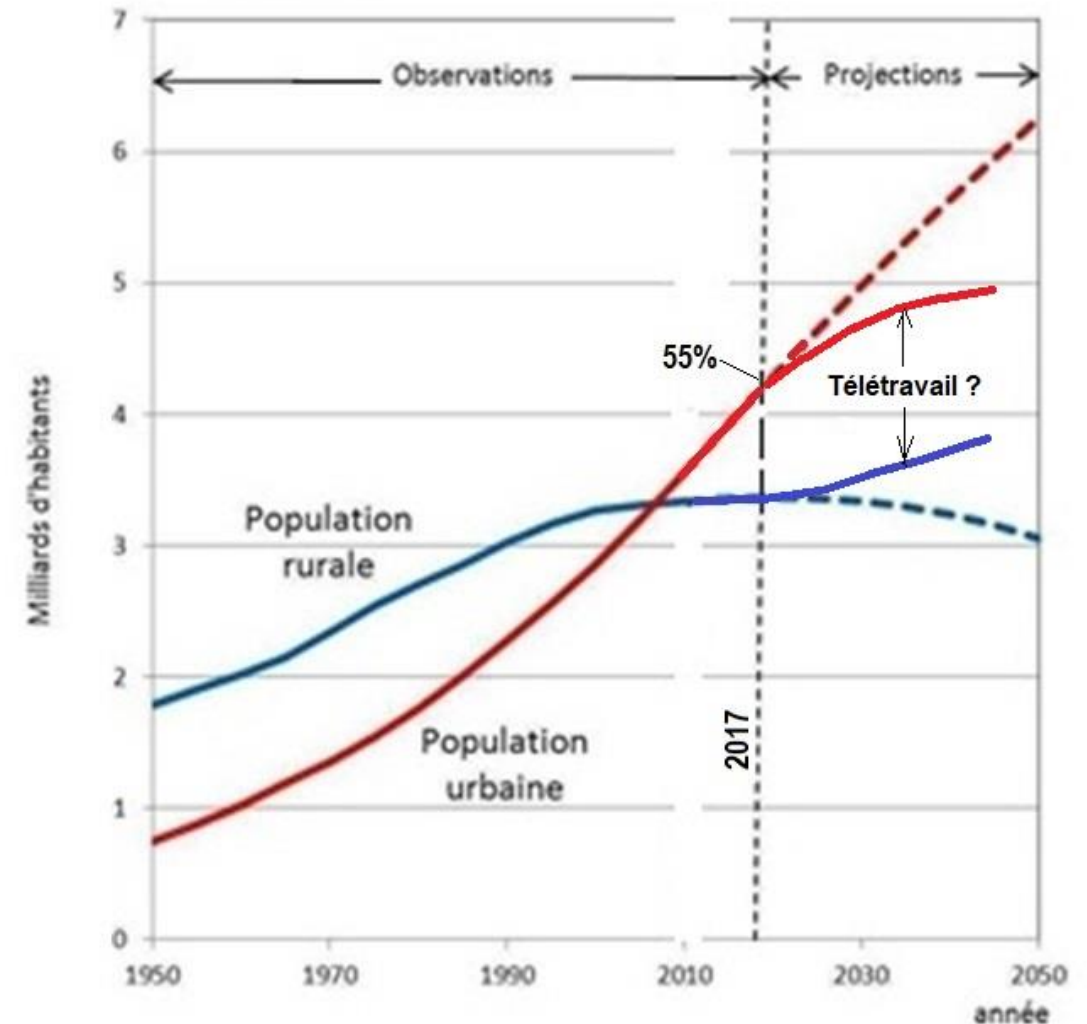


Figure 22

Figure 22

Le télétravail va changer un peu la donne mais la figure 22 est là principalement pour vous expliquer la raison pour laquelle j'ai concentré mon étude vers les villes plutôt que vers les zones rurales.

Ceci pour aller à l'essentiel étant donné que c'est là où la majorité d'entre nous allons vivre.

Le chauffage de l'habitat et la thermodynamique

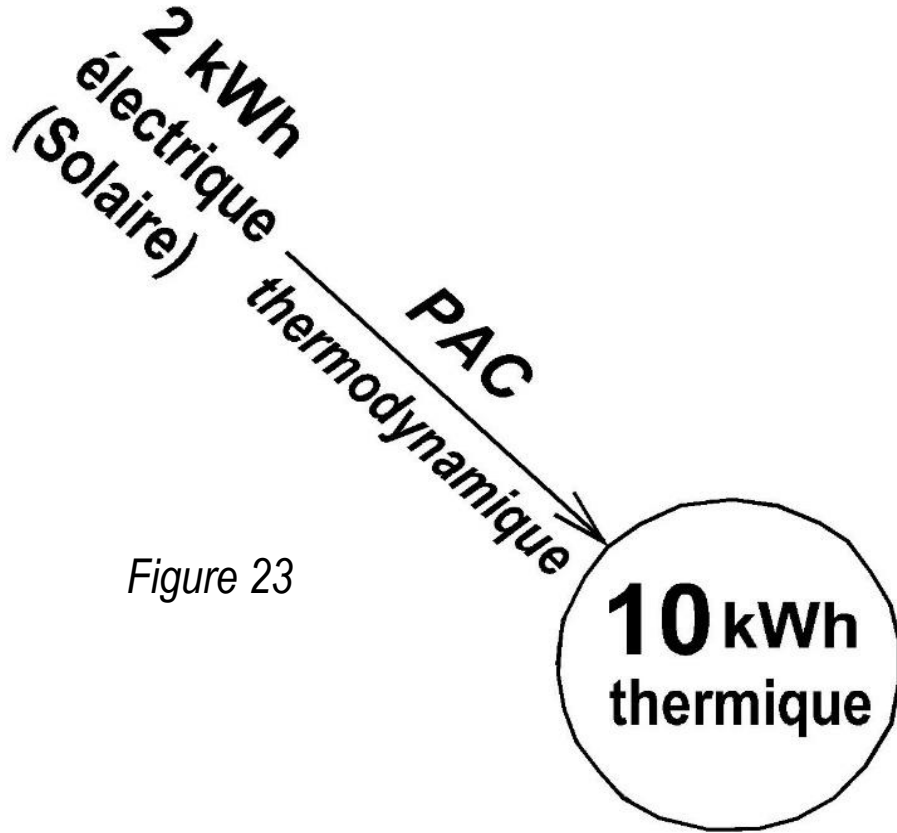


Figure 23

Alors qu'il faut 10 kWh électrique (correspondant à 1 litre de fioul ou 1 m³ de gaz) avec les chaînes énergétiques actuelles et leur COP de 1 pour fournir 10 kWh thermique, 2 kWh électrique sont suffisant pour fournir la même quantité de chaleur 10 kWh thermique avec le COP égal à 5 du chauffage thermodynamique. La consommation en énergie pour satisfaire le besoin thermique assurant la climatisation de l'habitat est totalement bouleversée. Ceci par rapport celle constatée avec la combustion ou le chauffage électrique actuel par effet joule évoqué aux pages 10, 11 et 12. Cela particulièrement lorsque les échanges thermiques prélevant l'énergie thermique renouvelable se font sur l'eau. On va voir par la suite comment, en prenant en compte des 1^{ère} et 2^{ème} loi de la thermodynamique, on obtient les 10 kWh thermique avec seulement 2 kWh électrique comme source d'énergie extérieure. Ceci dans le cadre d'un système fermé type pompe à chaleur avec un fluide caloporteur qui échange de l'énergie thermique mais pas de la matière.

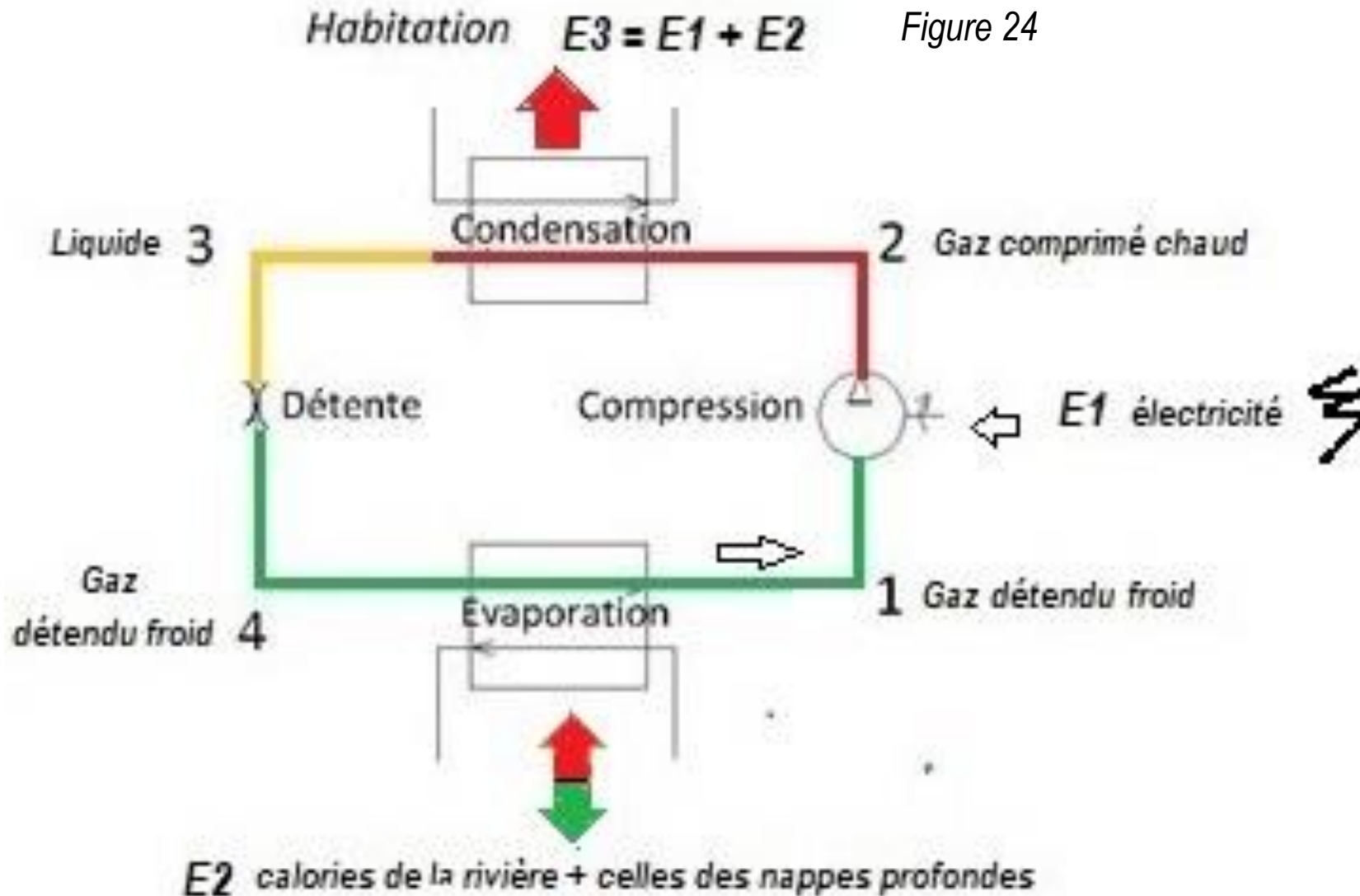
Ceci avec un COP de 5 avec l'eau et non avec l'air.

Figure 23

Nous allons maintenant commencer à évoquer plus en détail comment le chauffage thermodynamique de l'habitat, en limitant la quantité d'énergie finale nécessaire pour assurer cette fonction sans affecter notre confort, va nous sortir d'affaire

Alors que seulement 2 kWh thermiques pouvaient être obtenus à partir de 2 kWh électriques dans le cas des radiateurs électriques, c'est sensiblement 10 kWh thermiques qui seront disponible avec le chauffage thermodynamique, la différence 8 kWh étant prélevée dans l'environnement en le refroidissant.

La pompe à chaleur (Transferts thermiques)



Coefficient de performance

$$COP = E3/E1$$

[La théorie](#)

Pour augmenter $E3/E1$ on a intérêt à [baisser la température dans les radiateurs hydrauliques](#)

[Les fluides frigorigènes](#)

Figure 24

Comme on vient de le voir, il n'y a pas de miracle dans le fonctionnement d'une pompe à chaleur dans la mesure où elle respecte les lois de conservation de l'énergie.

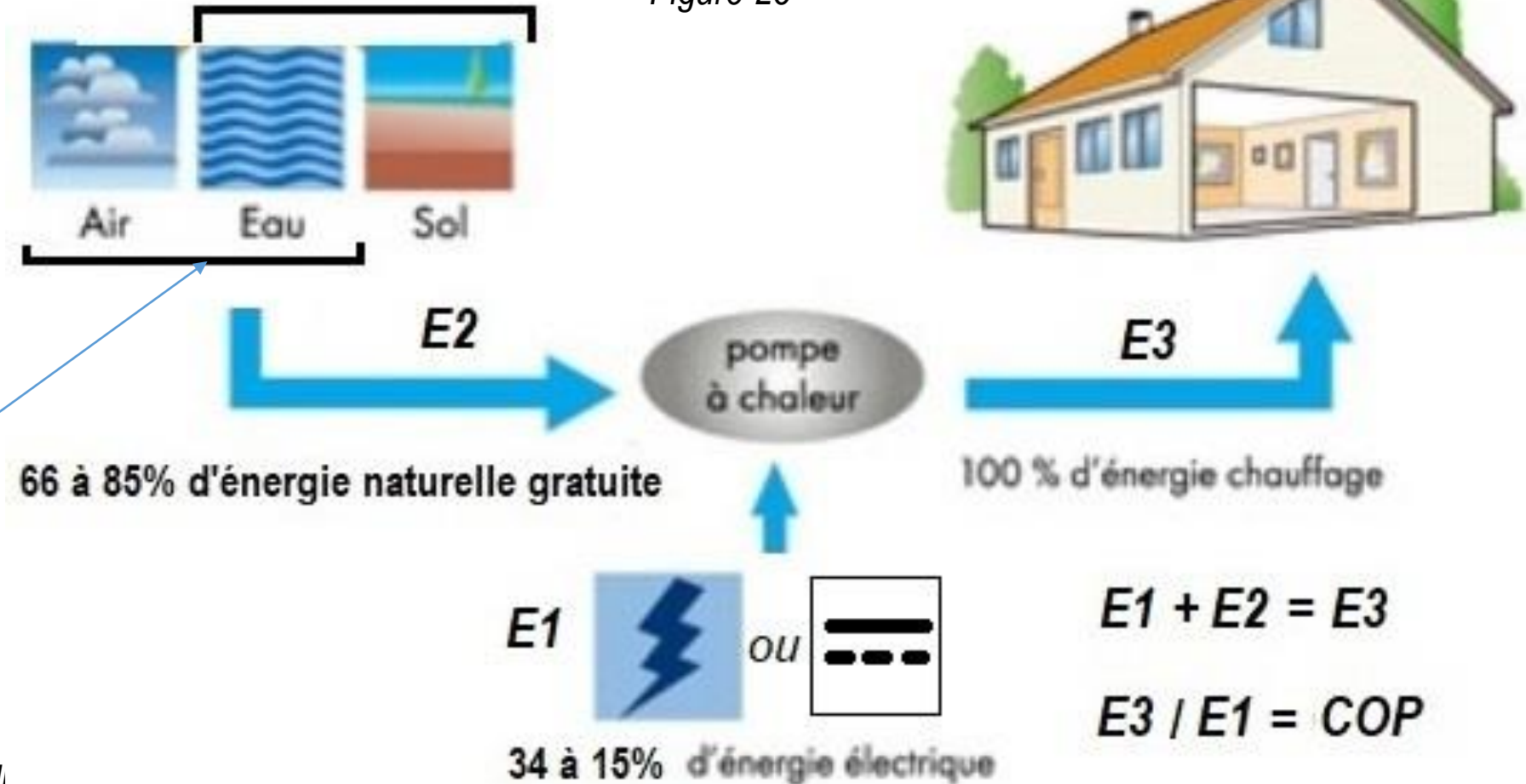
Ce qu'il est important de comprendre est le fait que l'énergie thermique E_3 émise sous forme de chaleur dans le condenseur par le fluide caloporteur est égale à la somme des énergies qu'il reçoit à savoir :

- celle E_2 de l'environnement lorsqu'il le refroidit dans l'évaporateur
- celle E_1 lors de la phase compression

La thermodynamique

Electricité > chaleur

Figure 25



Questions réponses

Air ou eau?

Exemple avec l'air seul

Exemple avec l'eau seul

Calcul du COP selon les températures aux sources froides et chaude

Figure 25

En complément de la figure précédente on comprend que l'énergie prélevée dans l'environnement par l'évaporateur peut-être associé à l'air, à l'eau, ou au sol. La maison quant à elle peut être remplacée par un immeuble avec bien évidemment un niveau de puissance plus important fonction de la consommation en combustible ou en électricité de l'ensemble des copropriétaires.

Un certain nombre de liens vers des applications permet de se faire une idée plus approfondi du fonctionnement de ce type de chaîne énergétique.

Consommation chauffage seul

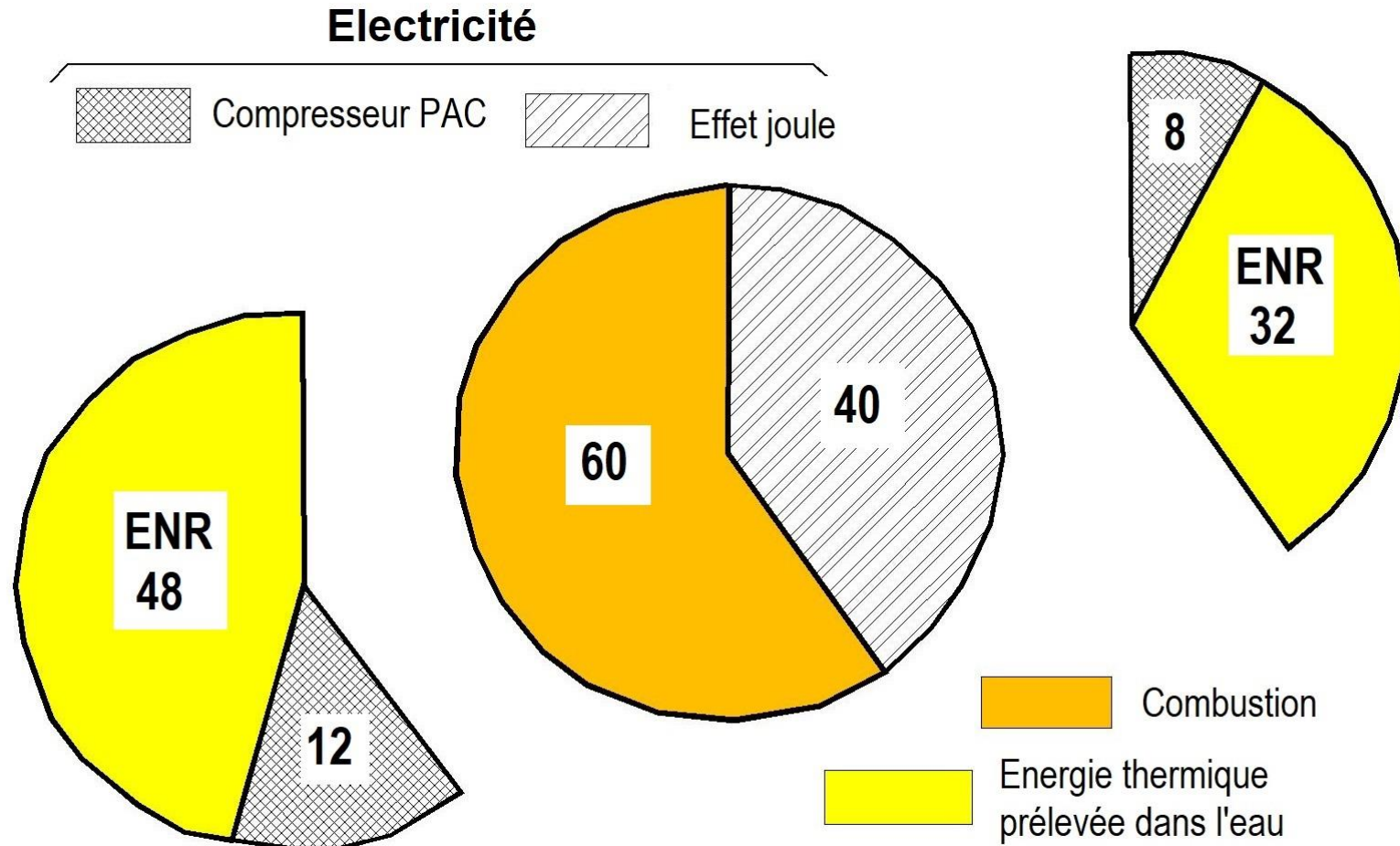


Figure 26

Conservation énergie

1) Energie globale

- avant $60 + 40 = 100$

- après

ENR $(48 + 32) = 80$

Electricité $(12 + 8) = 20$

Total 100

2 Par secteur avec **COP de 5**

- combustion

$48 + 12 = 60$ $60 / 12 = 5$

- effet joule

$32 + 8 = 40$ $40 / 8 = 5$

Figure 26

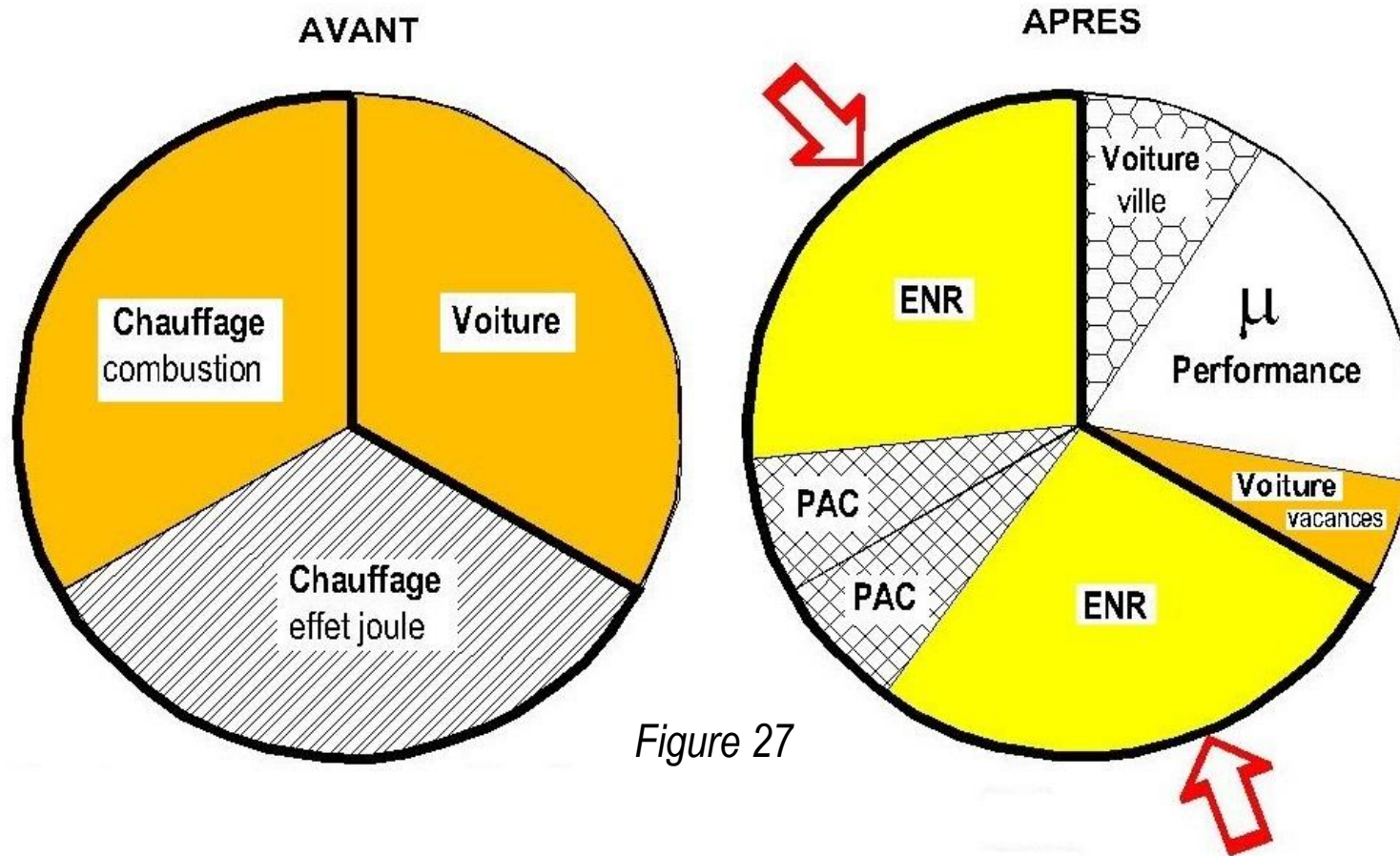
Il est très difficile de trouver des statistiques sur la part relative des deux mode de chauffage utilisés actuellement en France pour chauffer l'habitat, à savoir les radiateurs électrique à effet joule (ce que l'on nomme à juste titre les grilles pain) et la combustion des produits fossiles

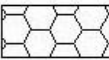
Le pourcentage 60 % combustion 40 % chauffage électrique retenu ici est probablement plus proche que celui de 50/50 évoqué dans les pages suivantes

On constate qu'un chauffage thermodynamique échangeant sur l'eau d'une nappe libre avec un COP de 5 demande des connaissances mais est relativement facile à obtenir (voir lien pour démonstration)

Tout compte fait on constate que sans toucher à l'isolation des bâtiments on supprime la consommation d'énergie fossile et la consommation électrique avec une consommation électrique globale 2 fois plus faible ($12 + 8 = 20$ au lieu de 40)

Consommation chauffage + voiture



	AVANT	APRES
 Chauffage effet joule	120	0
 Voiture en ville	0	33
 Compresseur PAC	0	2 x 24
 Combustion Voiture + chauffage	240	20
 ENR	0	2 x 96
Total électricité	120	81
Total général	360	293

Explication pour la voiture électrique hybride

Figure 27

Cette figure est une projection de ce que pourrait être notre nouvelle consommation globale en énergie pour assurer les deux fonctions les plus énergivores : le chauffage de l'habitat associé à la voiture. Ceci avec :

- un chauffage thermodynamique ayant un COP de 5 et une répartition 50 50 au lieu 60 40 en ce qui concerne la répartition combustion-effet joule
- Une consommation d'essence par la voiture avant conversion sensiblement égale au volume de fioul assurant le chauffage et une nouvelle consommation de la voiture conforme à celle définie précédemment avec la voiture hybride.

On observe que la consommation globale en produits fossiles est 12 fois plus faible (240 à 20) et la consommation en électricité réduite de 32% (120 à 81).

Les potentiels thermiques de l'eau

Pour appréhender correctement comment nous pourrions assurer le chauffage et la climatisation de l'habitat en utilisant les milieux aquatiques naturels il faut comprendre :

- que le potentiel de refroidissement de l'eau en hiver avant qu'elle n'arrive à l'état de glace dans une région surpeuplée comme la région parisienne est au signe près sensiblement égal au besoin thermique permettant d'assurer le chauffage de l'habitat parisien existant. Ceci tel qu'il est conçu actuellement au niveau de l'isolation
- que l'énergie thermique prélevée en hiver dans le milieu naturel profond dit "géothermique" que l'on devrait en toute logique appeler " [aquathermique](#) " vu que l'énergie est prélevée en hiver dans ce que l'on nomme les nappes captives. Ceci en les refroidissant avec la possibilité d'y réinjecter en partie l'énergie thermique que l'on y a prélevé en hiver pendant la saison chaude en assurant la climatisation de l'habitat en été
- qu'il est possible grâce aux échangeurs à plaques et à l'hydraulique de bénéficier de l'important potentiel thermique des eaux superficielles (la Seine pour la région parisienne). Ceci en le cumulant avec celui des milieux naturels profonds dits "géothermiques" des nappes captives (le dogger pour la région parisienne). Et cela de telle sorte que la chaleur qui a été prélevé dans le milieu naturel profond y soit restitué en été sans réchauffer dangereusement l'atmosphère comme cela est le cas lorsque l'on échange les calories sur l'air
- que les miracles n'existent pas et que ces échanges thermiques ne peuvent se faire sans un minimum de consommation en énergie électrique à savoir l'électricité entraînant le compresseur des pompes à chaleur

La région IDF et les eaux superficielles (débits moyens)

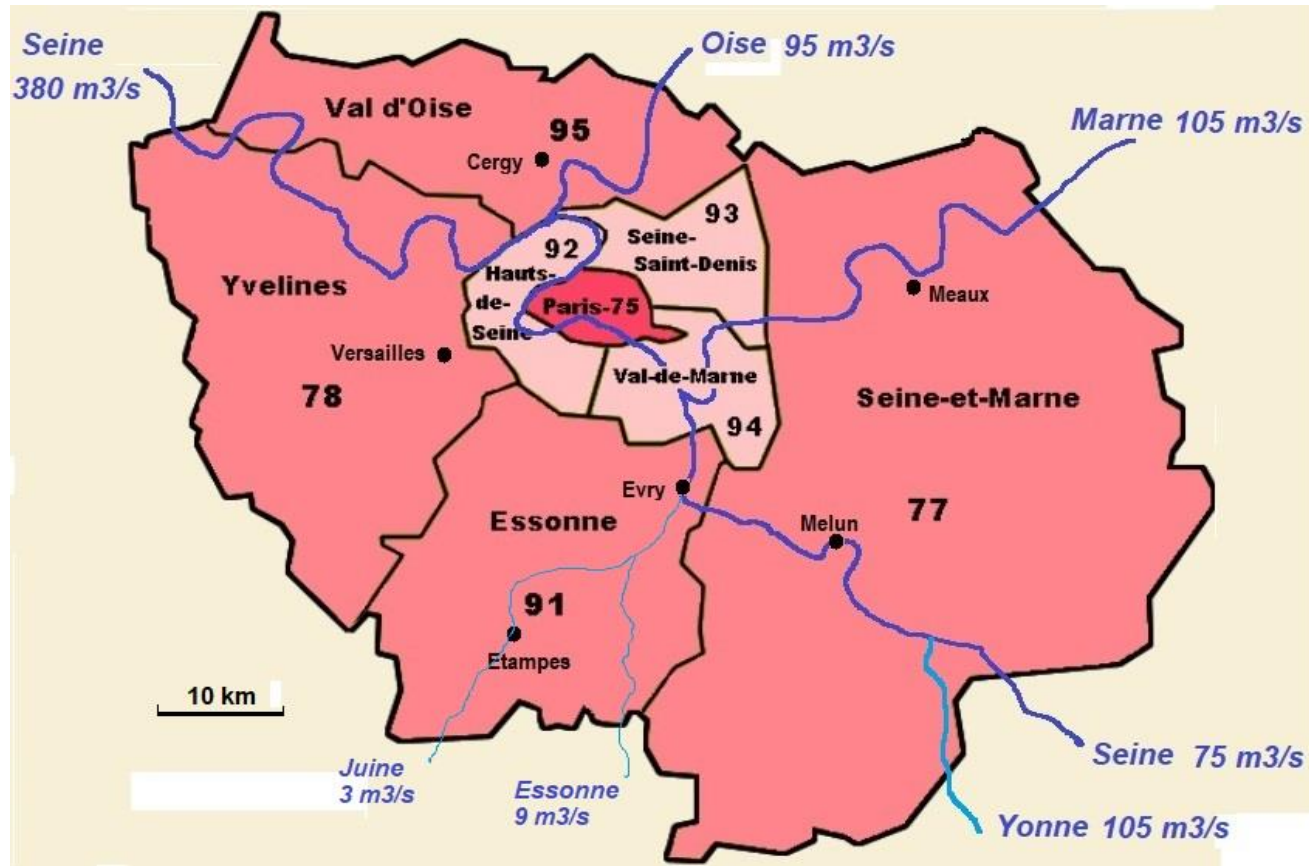


Figure 28

Chiffres clés : 8 départements, 12 millions d'habitants, 12 000 km, 1000 m² au sol par francilien

Figure 28

Il est difficile de se procurer des éléments concernant la température de la Seine à Paris. La figure 28 donne une idée de ce que pourrait être actuellement les variations de cette température pendant l'année calendaire

Quant à la figure de gauche, les débits indiqués sont plutôt des valeurs minimum, les débits réels étant plus proches de ceux indiqués par WIKI.

Voir fig 32

On constate que le débit de l'Yonne lors de son confluent avec la Seine est paradoxalement sensiblement supérieur à celui de la Seine. Le débit de l'Oise quant à lui n'est pas à prendre en compte pour déterminer le potentiel thermique utile à la petite couronne (92 + 93 + 94)

Paris intramuros

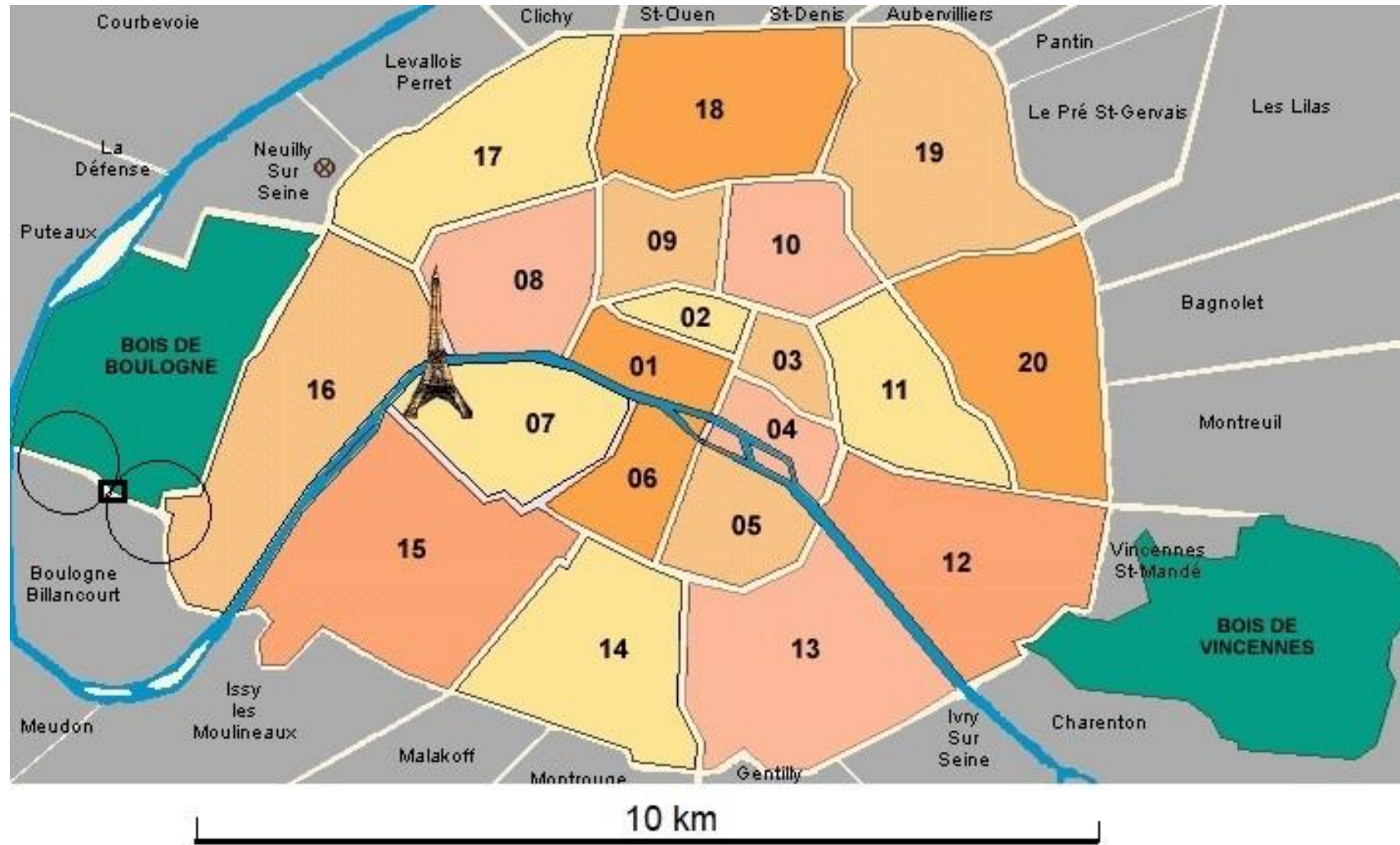


Figure 29

Métro parisien

actuel

futur

Chiffres clés : 20 arrondissements, 2 millions d'habitants, 100 km², soit 20 000 habitants au km² et 50 m² au sol par parisien. Beaucoup de communes à l'extérieur de Paris intramuros comme Boulogne ont environ la même densité urbaine.

Figure 29

Le constat est un peu effroyable mais il faut se rendre à l'évidence : la densité urbaine dans Paris et sa petite couronne est considérable.

Avec une densité urbaine de 20 000 habitants au kilomètre carré, chaque parisien ne dispose en effet que d'une surface au sol voisine de 50 mètres carrés. Ceci en raison de l'empilage à la verticale des appartements et compte tenu du fait que 1 km² c'est un million de mètres carrés.

Les eaux superficielles et géothermales

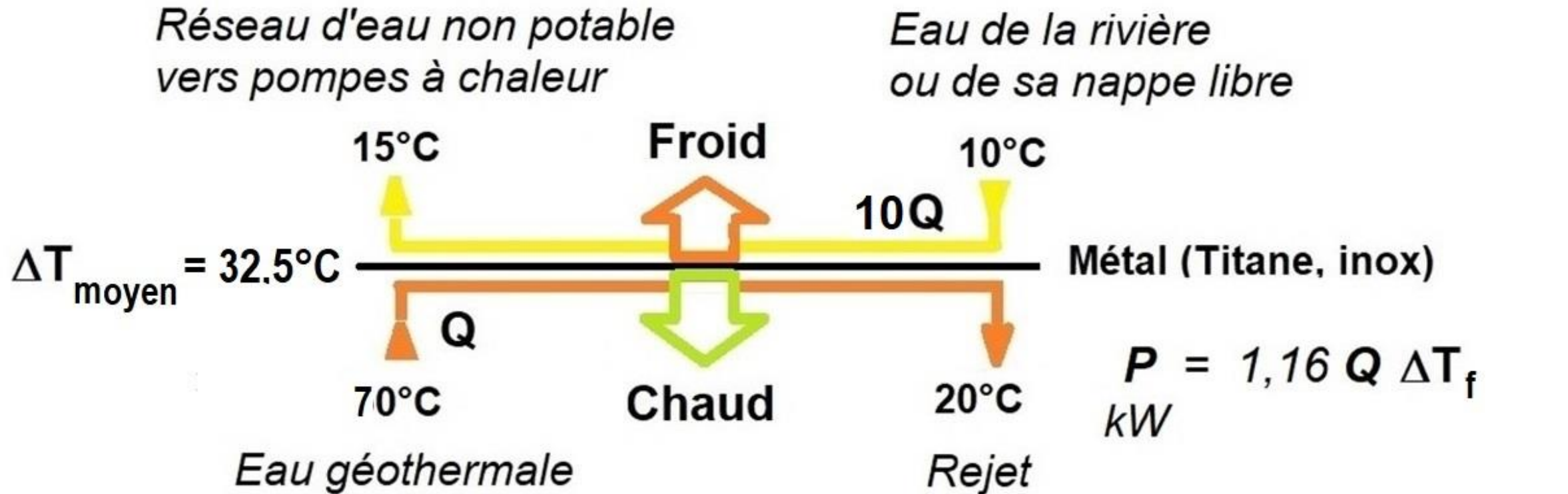
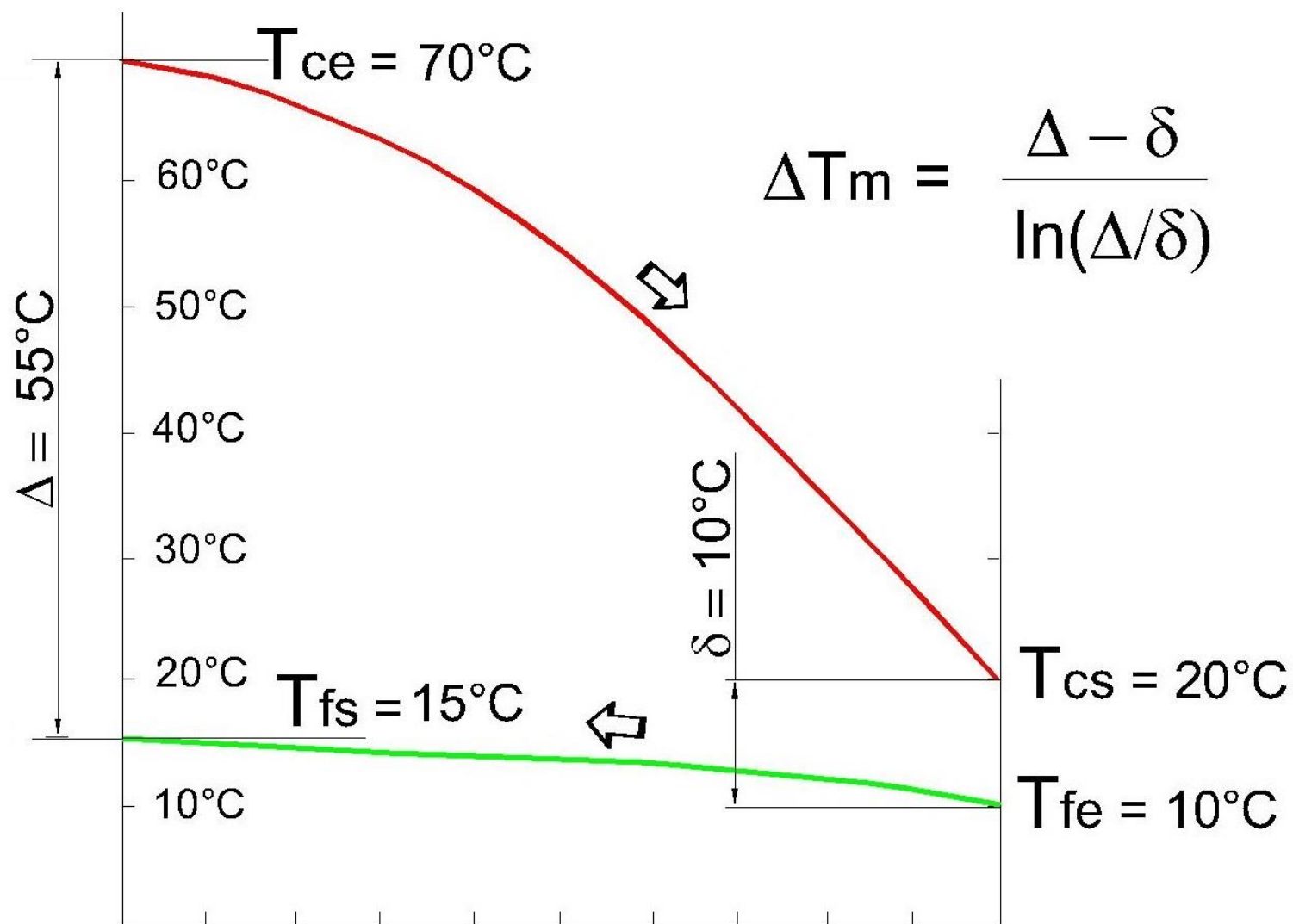


Figure 30

Chaleur spécifique de l'eau
1,16 kWh/degré et par m3

Conservation de l'énergie
 $10 Q \times 5 = Q \times 50$

$$\frac{\text{kWh}}{^\circ\text{C} \cdot \text{m}^3} \times \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times ^\circ\text{C}$$



La différence de température le long de la plaque métallique variant le long de la plaque on peut pour simplifier prendre la moyenne arithmétique entre la valeur haute et la valeur basse, par exemple à partir de la figure précédente $(10 + 55)/2 = 32,5$.

Les constructeurs d'échangeurs thermiques à plaques utilisent plutôt la formule plus précise utilisant les logarithmes :

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{\text{moyen}} &= (55 - 10) / \ln(55/10) \\
 &= 45 / 1,7 = 26,4
 \end{aligned}$$

Figure 30 bis

Figures 30 et 30 bis

On aborde ici un point extrêmement important: prendre conscience comment il est possible grâce aux échangeurs à plaques d'additionner le potentiel thermique des énergies géothermales profondes avec celui des eaux superficielles (la Seine pour ce qui concerne la région parisienne)

Cette fois-ci le débit dans chacun de ces deux réseaux étant nettement différent contrairement à ce que l'on a vu précédemment.

La différence température de part et d'autre des plaques métalliques n'étant cette fois pas constante, il faudra toute l'expérience de fabricants tels que Alfa Laval pour dimensionner ces dispositifs d'échange thermique.

Leur association

Le dogger en région parisienne, c'est un gradient géothermique d'environ 3 degrés par 100m
Un forage type gaz de schiste comme ceux réalisés au USA est adapté à nos besoins et à l'exemple des quelques doublets géothermiques réalisés à Villejuif

[Cartes géologiques du BRGM](#)

[Réseau de Villejuif](#)

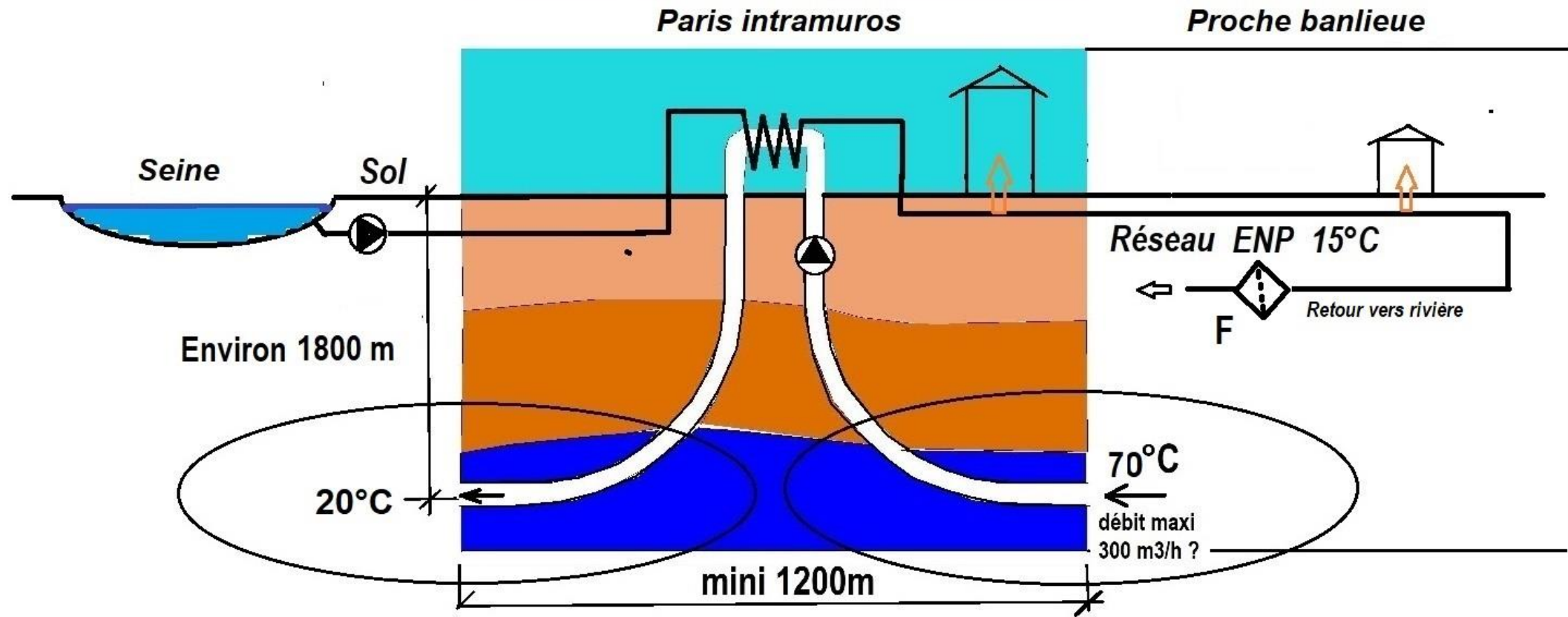


Figure 31 se reporter à la figure précédente pour compréhension

Figure 31

On retrouve sur cette figure le réseau hydraulique précédent utilisant les échangeurs à plaques pour ajouter au potentiel thermiques du réseau d'eau non potable (ENP) des eaux superficielles celui d'un doublet géothermique (voir complément ci-dessous) pompant l'eau chaude géothermale profonde

Le chauffage urbain généralisé en région parisienne

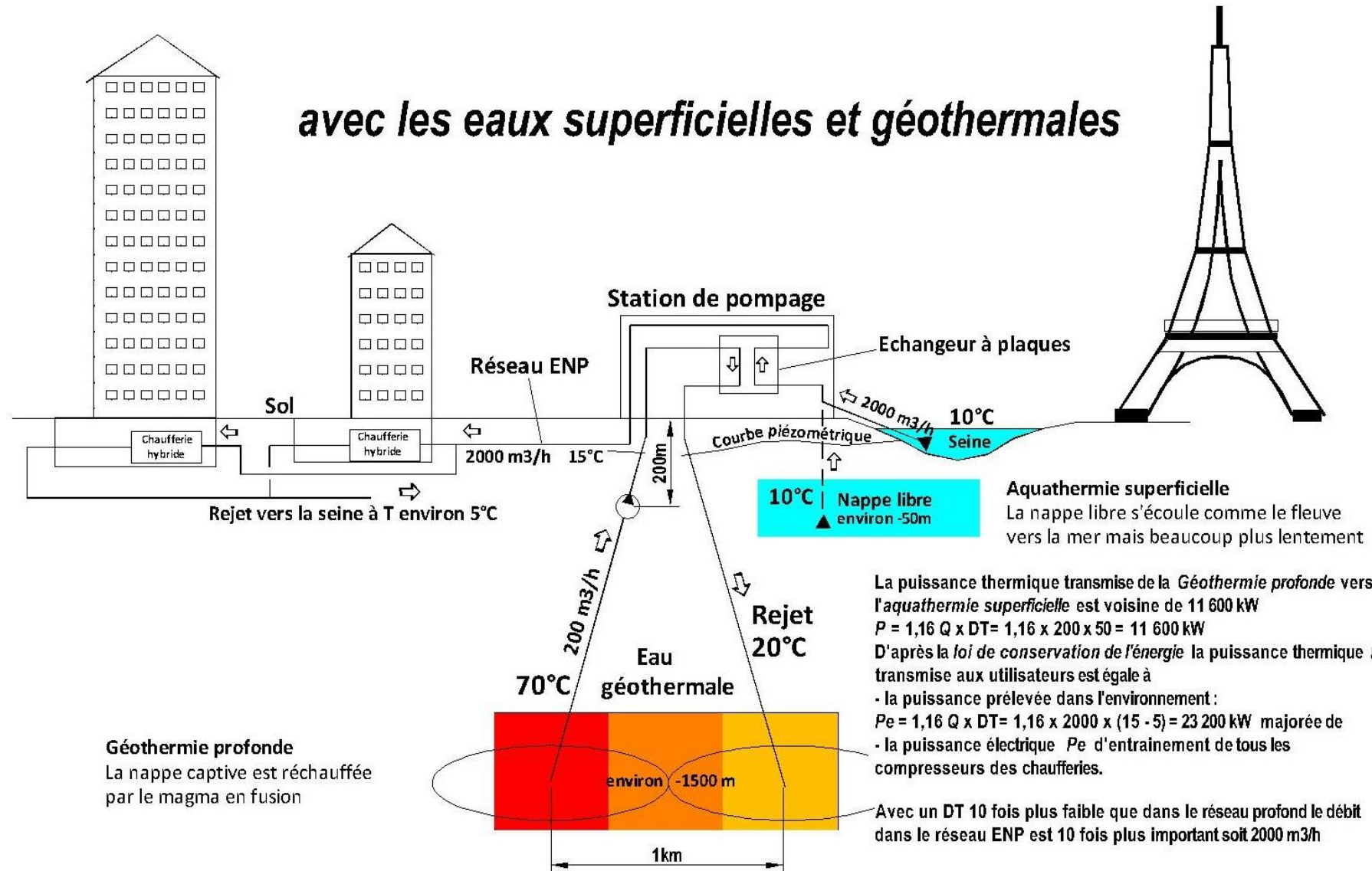


Figure 31bis

Etude lorsque la température de la Seine change

Débit des rivières françaises en temps réel

Figure 31bis

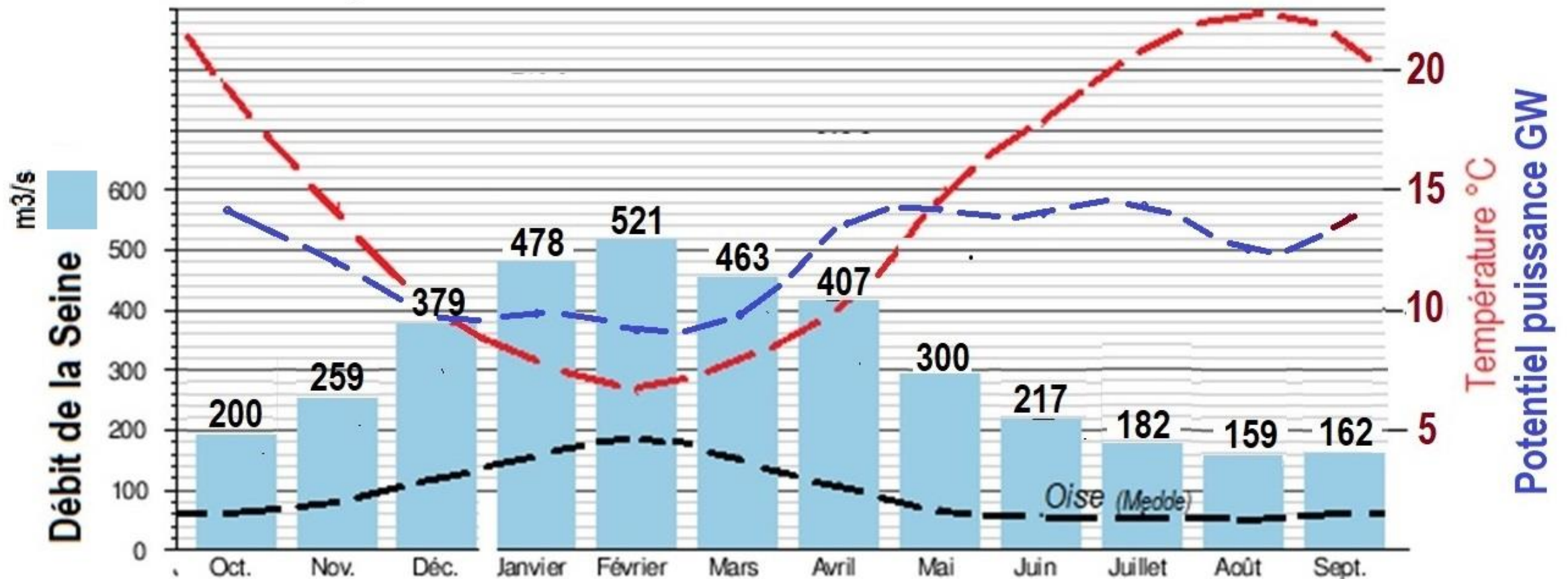
Cette figure 31bis n'est d'autre que la figure 31 représentée différemment.

L'idéal serait bien sûr de pouvoir pomper dans les nappes libre associées à la rivière au lieu de prélever l'eau dans cette dernière. Ceci compte tenu du fait qu'en prélevant directement dans la rivière, le potentiel thermique de cette dernière peut être nul au plus froid de l'hiver. Cela ne semble malheureusement pas envisageable dans les grandes métropoles vu le manque de surface au sol disponible.

Ceci est la raison pour laquelle on voit apparaître sur la gauche la notion de chaufferie hybride dans lesquelles le gaz peut venir au secours du chauffage thermodynamique et à l'eau géothermale au plus froid de l'hiver lorsque la température de la Seine est trop basse

Potentiel thermique de la Seine à Paris

Figure 32



Valeurs moyennes de débit observées sur plusieurs dizaines d'années selon WIKI

[selon CSLT](#)

Potentiel thermique de la Seine (pour Paris intramuros + proche périphérie)

		octobre	novembre	décembre	janvier	fevrier	mars	avril	mai	juin	juillet	aout	septembre
Seine	Potentiel débit m3/s	272	327	485	600	650	580	535	360	272	240	207	200
	Potentiel température degrés C	15	11	7	4	3	2	7	12	15	19	21	19
	Potentiel puissance kW	17038080	15021072	14177520	10022400	8143200	4844160	15639120	18040320	17038080	19042560	18153072	15868800
	Potentiel par parisien (base 5 millions parisien) kW	3.4	3.0	2.8	2.0	1.6	1.0	3.1	3.6	3.4	3.8	3.6	3.2
	Périodes	période de chauffe du 15 septembre à la mi avril											
	Besoin	Moyen	-----	Maximum	-----	faible hors période de chauffe							
Géothermie	Potentiel par parisien kW	0.3625	0.3625	0.3625	0.3625	0.3625	0.3625	0.3625	0.3625	0.3625	0.3625	0.3625	0.3625
	base 250 m3/h ΔT =50°C avec 50 m2 au sol par parisien soit sur 2 km2: 40 000 parisiens												
Total kW	Σ des POTENTIELS	3.8	3.4	3.2	2.4	2.0	1.3	3.5	4.0	3.8	4.2	4.0	3.5
Besoin	Moyen presque 1kW (cas pratique 800 000 kWh pour 150 hab)	satisfait sans la partie gaz de la chaufferie hybride qui est plutôt en secours en cas d'incident sur la pompe à chaleur (Voir pages 90 à 92)											
	Et au plus froid de l'hiver de l'ordre de 2 kW. Les dérèglements climatique sont là mais ce n'est tout de même pas au mois de mars que les tempéatures sont les plus basses												

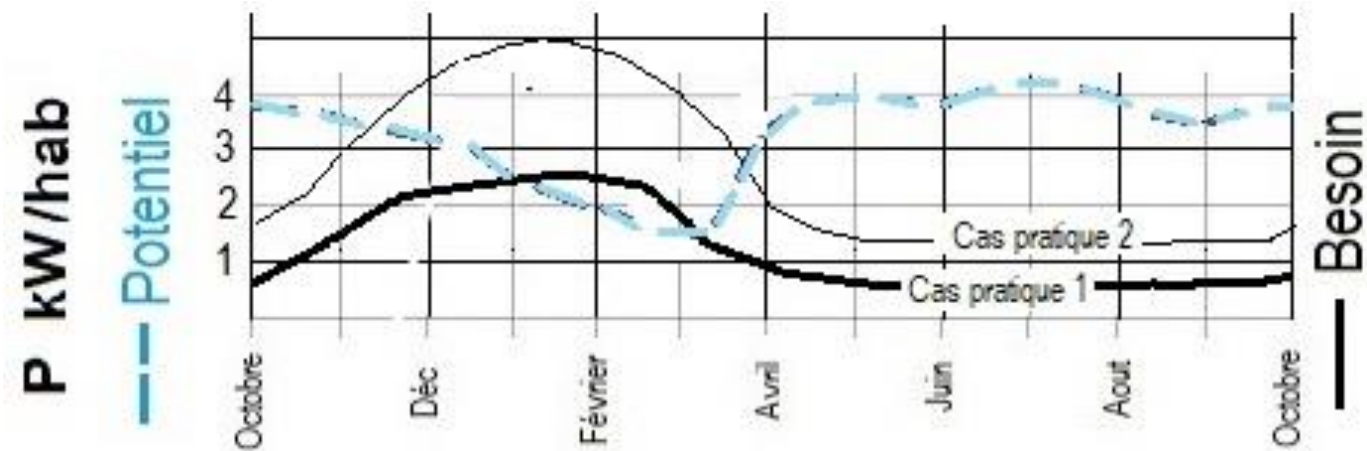


Figure 32bis

Le potentiel thermique a été défini en tenant compte 18 avec un rejet dans la Seine en sortie des évaporateurs à 3° C - du fait que le débit de l'Oise (voir figure 19) qui se jette dans la Seine en aval de Paris n'est pas à prendre en compte.

Quant au besoin on peut se reporter au 2 cas pratiques de mon livre sur l'énergie (Voir page 621 de [mon livre](#))

C'est peut-être un peu juste si dans le cas d'un hiver rigoureux. Dans ce cas le gaz peut venir au secours du chauffage thermodynamique avec la chaufferie hybride décrite aux pages 61 et 62.

Figure 32 et 32 bis

On observe sur ces figures que le potentiel thermique de la Seine à Paris est considérable (proche de 10 gigawatt au plus froid de l'hiver).

Il faut toutefois se rendre à l'évidence: vu la population de Paris avec sa petite couronne voisine de 10 millions d'habitants cela ne fait que 1 kW disponible par parisien. Heureusement avec le réseau envisagé les pages précédentes le potentiel thermique de l'eau géothermale s'ajoute à celui des eaux superficielles et il n'est peut être pas inenvisageable vu les faibles pertes de charge en ligne évoqués figure 20 de profiter aussi de l'eau des nappes libres qui est elle à 10°C voire un peu plus

La "Solar Water Economy" est la vision de ce que pourrait une transition énergétique allant dans le sens de l'abandon des 2 principales chaînes énergétiques actuelles à savoir la combustion et l'effet joule assurant le chauffage de l'habitat et devenues obsolètes en raison de leur piètres performances. Ceci en ne faisant appel qu'à l'eau pour satisfaire l'essentiel de nos besoins en énergie thermique. Je vais maintenant tenter de faire sans me tromper une approche chiffrée de ce que pourrait être ce type de transition dans une région à forte densité de population comme la nôtre, celle de la région Parisienne. En raison d'une densité urbaine de 20 000 habitants au km² dans Paris intramuros et sa proche banlieue chaque parisien ne dispose que de 50 m² au sol, ce qui n'est pas grand chose. Pour ce qui concerne dans un premier temps l'énergie thermique associée à l'eau, pilier central de la "Solar **Water** Economy". Le potentiel thermique de l'eau en région IDF s'établi comme suit:

- le potentiel thermique des nappes captives profondes
- celui des eaux superficielles à savoir de la Seine qui traverse votre région
- la capacité que nous offre l'hydraulique d'additionner ces deux potentiels pour assurer nos besoins thermiques

1) Doublet géothermique avec l'eau géothermale profonde

Hypotheses

- surface doublet 2 km² (ou 2 millions de m²) soit compte tenu de la densité urbaine en region Parisienne (20 000 habitants au km²)
 $2\,000\,000 / 50 = 40\,000$ habitants
- débit doublet $Q = 250\text{ m}^3/\text{h}$ (Ce débit devant toutefois être confirmé par le BRGM) avec un ΔT de 50°C (70 a 20°C)

Ceci en perçant à un peu moins de 2000 m (voir page 75)

Puissance géothermique disponible par doublet $P = 1.16 \times 50 \times 250 = 14\,500\text{ kW}$ soit $14\,500 / 40\,000 = 0,36\text{ kW}$ disponible pour chacun de ces 40 000 parisiens 24h sur 24. Soit une énergie disponible à l'année par parisien de $0,36 \times 8760 = 3100\text{ kWh}$.

A l'appui de ces chiffres la formule $P = 1,16 Q \times \Delta T = 1,16 \times (250/40\,000) \times 50 = 0,36\text{ kW}$ qui fait que chaque parisien dispose bien en effet d'une puissance moyenne de 0,36kW

2 Eaux superficielles (Seine)

Le débit moyen de la Seine à Paris de 300 m³/s c'est sensiblement un milliard de kg d'eau en une heure.

Grâce à la capacité thermique de l'eau égale à 4,18 kJ / kg et par degré si on refroidit cette masse de 15 à 5 degrés on dispose d'une quantité de chaleur égale à $4,18 \times 1\,000\,000\,000 \times 10 = 41\,800\,000\,000$ kJ et vu que 1 kWh c'est 3600 kJ c'est 11,6 millions de kWh qui sont disponibles en une heure pour environ les 10 millions de citadins en région IDF ce qui correspond sensiblement à une puissance de 1 kW par citadin.

3 Comment profiter des 2 potentiels

Les figures des pages 43 et 44 permettent de comprendre comment l'hydraulique nous offre la possibilité grâce aux échangeurs de température à plaques (Voir complément page 106 pour plus de détails) d'additionner ces deux potentiels. Ceci en portant la température de l'eau superficielle de 10 à 15 ° C. Cela permet de disposer d'un potentiel thermique plus important par le fait que la différence de température utile dans les évaporateurs des pompes à chaleur aquathermiques est portée de 5 à 10 ° C. Le ΔT dans le primaire des échangeurs à plaques étant de 50° C alors qu'il n'est que de 5° C dans le primaire on comprend que le débit mis à disposition dans le secondaire de l'échangeur à plaque est 10 fois supérieur à celui du primaire.

C'est donc en conséquence un débit d'eau à 15° C de 2500 m³/h 10 fois supérieur à celui du doublet géothermique qui est disponible pour les 40 000 parisiens. Il n'y a donc pas de souci à se faire sur la potentialité des eaux superficielles dans la mesure où le besoin débit en eau superficielle pour les 10 millions de parisiens est sensiblement 2 fois inférieur au débit moyen de la Seine

$$[(2500 / 40\,000) \times 10\,000\,000] / 3600 = 173 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le potentiel thermique en énergie thermique renouvelable mis à la disposition de chaque parisien à partir d'un tel réseau est donc de

$$[1,16 (2500 \times 8760) \times (15-5)] / 40\,000 = 6350 \text{ kWh.}$$

Cela signifie que le besoin en énergie électrique permettant de satisfaire ce besoin thermique de 6300 kWh nécessaire au chauffage de l'habitat pourrait être limité à 1000 kWh.

Si l'on ne procédait à aucune amélioration de l'isolation des bâtiments existants, on observe que ce potentiel thermique de 6300 kWh reste supérieur au besoin maximum correspondant de 5900 kWh (Voir page 24). On verra cependant par la suite dans le cadre de la **"Solar Water Economy"** que notre intérêt ne nous dispense pas de procéder à une isolation sommaire des bâtiments existants. Et ceci même si le besoin en électricité pour entraîner le compresseur des pompes à chaleur est sensiblement divisé par 2 par rapport à ce qu'est le besoin en France avec les chaînes énergétiques actuelles. Il va falloir en effet prendre en compte que le toujours+ est derrière nous. Ceci aussi par le fait qu'il va falloir tenir compte non seulement du besoin électrique de l'éclairage, de l'électroménager et surtout de la voiture hybride rechargeable. Ceci en tenant compte du fait qu'avec les chaînes énergétiques actuelles associant la combustion et l'effet joule et l'isolation inconsistante de l'habitat existant il est proche en France du besoin chauffage ($6800 \times 0,4 = 2700$ kWh) majoré de 1400 kWh pour l'éclairage et l'électroménager soit 3120 kWh au total.

A ceux qui m'accuseraient d'un excès d'optimisme je dirais qu'il est toujours possible grâce à la chaufferie hybride évoquée aux pages 51, 52 et 53 de satisfaire le besoin thermique en cas d'hiver particulièrement rigoureux avec un complément thermique assuré par la combustion gaz.

Il faut toutefois relativiser. La dernière fois que la Seine a gelé c'était il y a bien longtemps (en 2006 je crois ?). Quoiqu'il en soit lorsqu'elle est à 5°C son potentiel thermique pour le chauffage de l'habitat est effectivement bien faible, voire nul.

Une société comme la CIAT bien au fait de ces techniques de chauffage thermodynamique basée sur l'aquathermie estime à juste titre qu'une pompe à chaleur échangeant sur l'eau ne peut fonctionner valablement si la température à la source froide est inférieure à 8°C

Généralisation du réseau

Il faut maintenant aussi tenir compte que l'étude ci-dessus a été faite en raisonnant à partir d'un seul doublet géothermique assurant le besoin pour 2 km² de surface au sol CAD pour 40 000 parisiens. Ceci alors que Paris intra-muros c'est 20 arrondissements et sensiblement 2 millions d'habitants sur environ 100 km². Il est pour cette raison nécessaire de se faire à l'idée que pour subvenir aux besoins de l'ensemble des parisiens, il faudra en moyenne sensiblement 3 voire 4 doublets de ce type par arrondissement parisien ou par commune accolée au périphérique attenante à Paris Intramuros (Voir exemple pour la commune de Boulogne Billancourt page 79). Cela permet de situer le projet dans son ampleur. Ceci dit il faudra aussi tenir compte que certains arrondissements sont plus vastes que d'autres. La surface au sol nécessaire pour implanter les groupes de pompes ainsi que les échangeurs à plaques est heureusement faible. Reste les tuyauteries et la gêne temporaire que va entraîner leur mise en oeuvre. Pour ce poste je me réfère au commentaire de Jean-Marc Jancovici: *" Il n'y a pas d'innovation sans contrainte "*

L'eau formidable véhicule thermique

Généraliser le chauffage urbain en région parisienne en utilisant l'électricité pour entraîner le compresseur des pompes à chaleur ainsi que l'eau circulant dans des tuyauteries comme cela est proposé pages 47 à 49 serait une solution particulièrement performante pour généraliser un mode de chauffage de l'habitat particulièrement sobre en énergie finale payante. Ceci par le fait qu'il serait capable de cumuler deux potentiels gratuits

- Celui de l'eau géothermale de la nappe captive constituée par le dogger

- Celui des eaux superficiels constituée par la Seine

L'expérience acquise dans les technologie de forage pétrolier serait bien utile pour la conception du 1er. Quant au réseau secondaire à 15° C avec retour à 5° C une fois la chaleur transmise à l'habitat, il serait constitué de groupe de pompage et de tuyauteries basse pression

Voir Tableau ci-contre avec un petit clin d'œil à Mr Grossetête et les cours du CNAM

	B	C	D	E	F
1	RESEAU TUYAUTERIE d'ENP		Allée à 15°C	Retour à 5°C	Total
2					
3	Diamètre intérieur tuyauterie	mm	700	700	
4	Viscosité cinématique	centistoke	1.1	1.3	
5	Longueur tuyauterie	m	2000	2000	
6	Nombre de coudes arrondis		5	5	
7	Débit	m3/h	2500	2500	
8					
9					
10	Débit	litres/mn	41667	41667	
11	Surface intérieure tuyauterie	m²	0.385	0.385	
12	Vitesse du fluide	m/s	1.804	1.804	
13	Nombre de Reynolds	sans dimension	1148297	971636	
14	Type d'écoulement	Turbulent	> 4000	> 4000	
15					
16	Longueur équivalente totale	m	2070	2070	
17					
18					
19					
20	Perte de charge totale	bar	0.93	0.97	1.90
21	Puissance perdue	kW	65	67	131.85
22	Puissance thermique transférée	kW			29000
23	Rendement				0.995
24					
25	Temps de transfert	secondes			2217
26	Pertes thermiques en ligne				négligeables

Le chauffage de l'habitat avec les systèmes hybrides et l'eau

Paris ne s'est pas fait en un jour

Performance en mode pompe à chaleur

$$COP = (E1 + E2) / E1 = 5$$

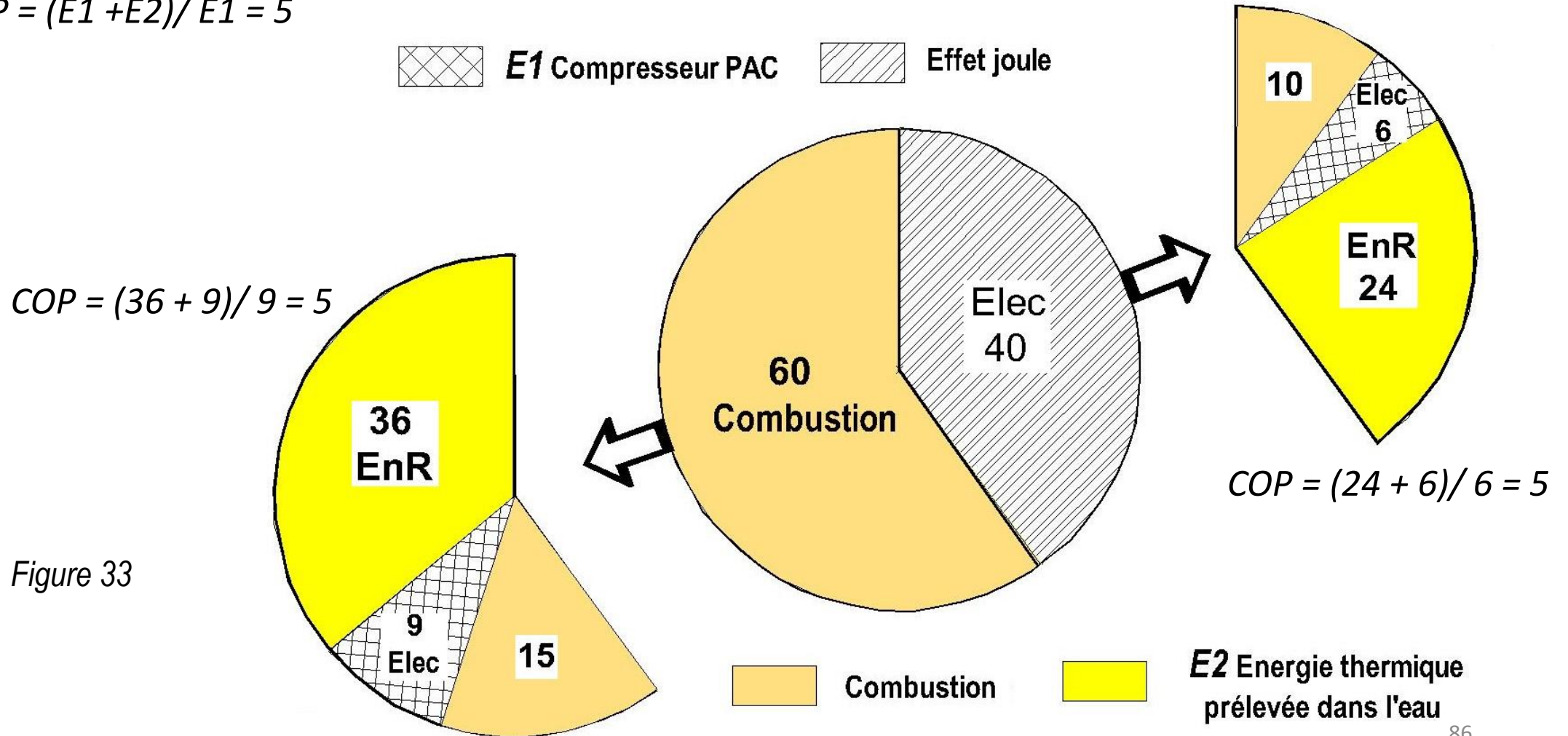


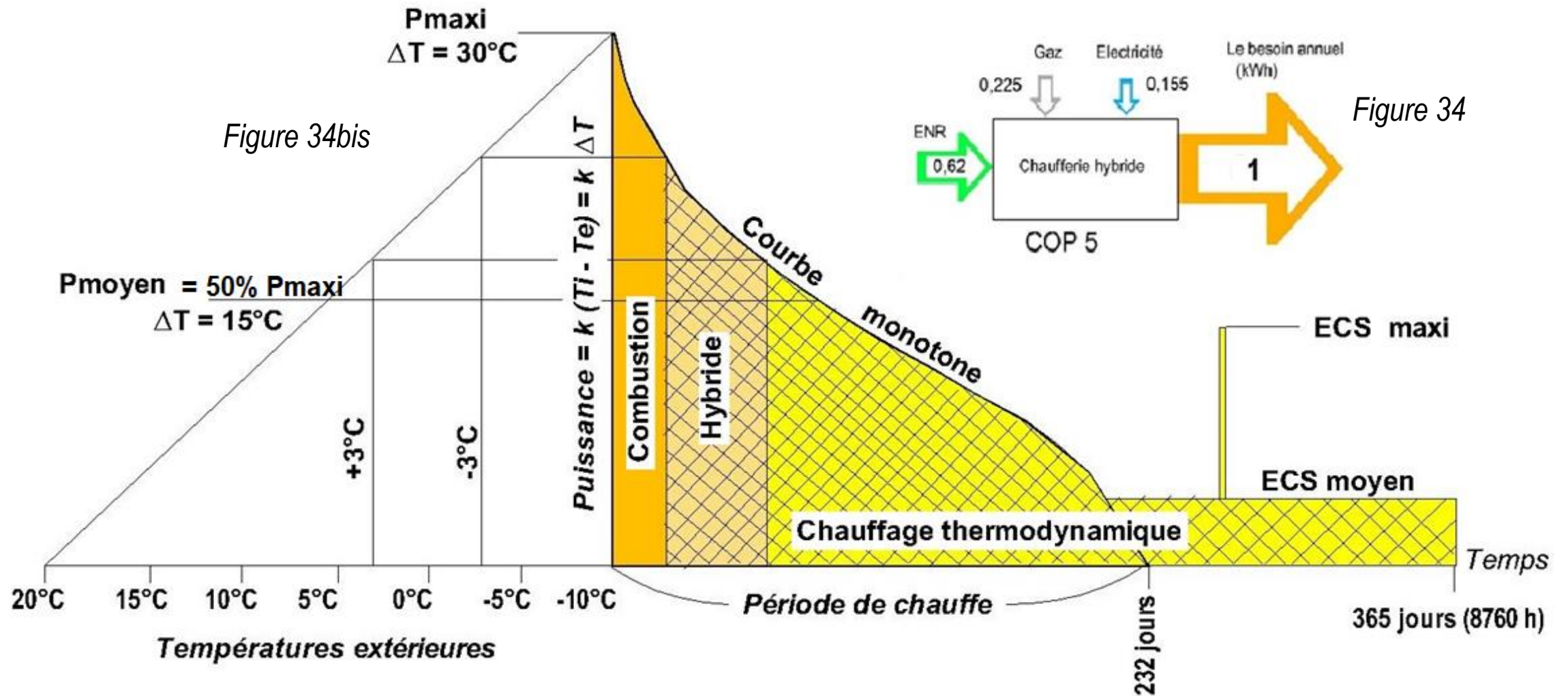
Figure 33

Figure 33

Le réchauffement climatique est là mais il ne faut pas perdre de vue qu'au plus froid de l'hiver la température de la Seine peut malgré tout descendre à des températures sensiblement inférieures à 5 degrés, ce qui annule le potentiel thermique des eaux superficielles. Il est dans ce cas certes possible d'élever la température sur le réseau ENP à environ 10 degrés grâce à l'apport géothermal mais comme chacun sait Homo sapiens est plutôt frileux et une évolution temporaire vers la *chaufferie hybride* capable d'assurer un apport thermique grâce à la combustion sera dans un premier temps probablement considéré comme nécessaire.

La figure 33 montre dans ce cas ce que pourrait être la nouvelle répartition des énergies associant le gaz, l'électricité et l'énergie prélevée dans l'environnement

La puissance de la chaufferie hybride durant l'année calendaire

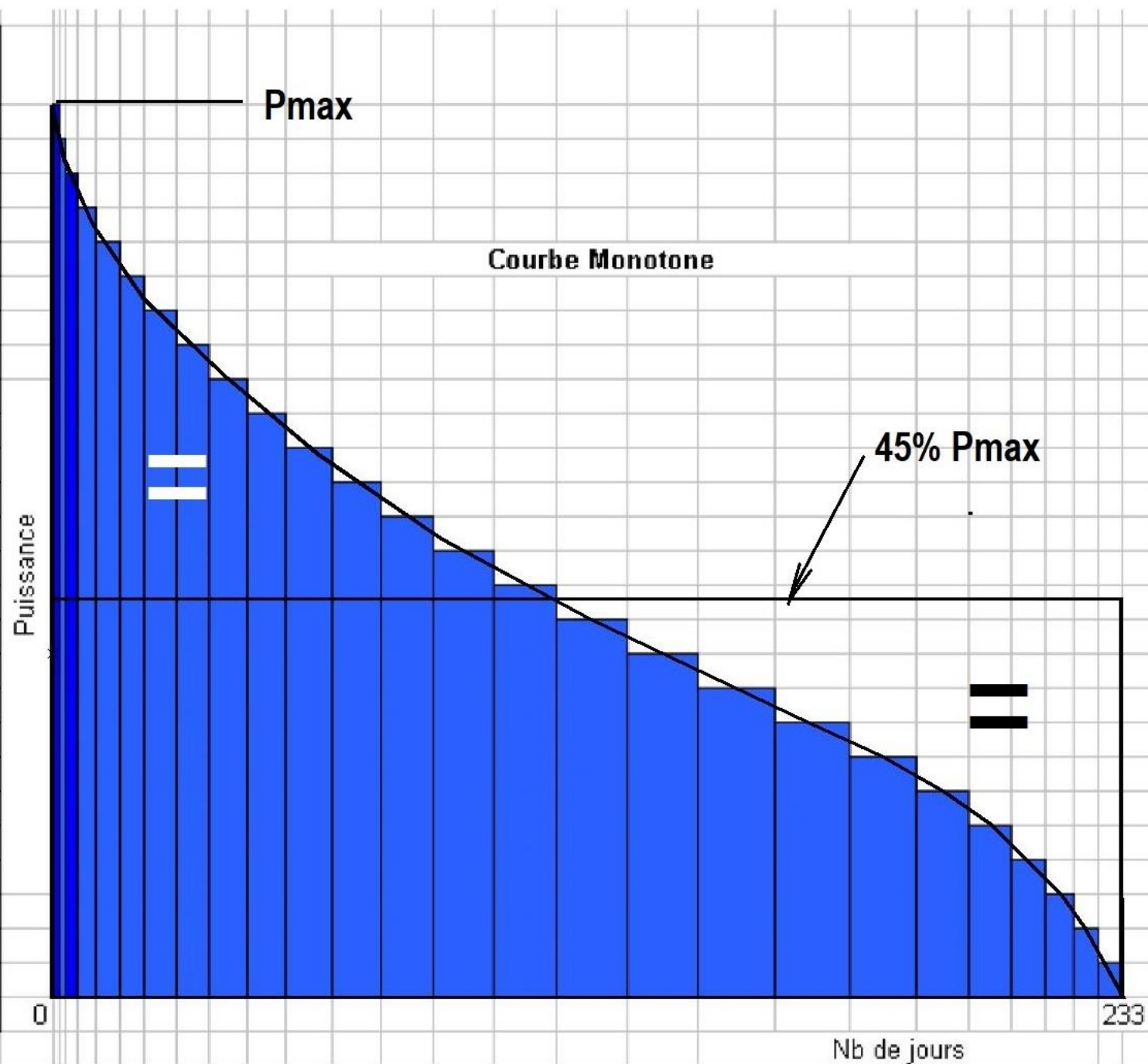


La courbe monotone et les [DJU](#) (Voir page 110 pour mieux comprendre comment le gaz et l'électricité se répartissent le travail)

Figure 34 et 34 bis

Ces figures permettent de comprendre comment, en fonction de la courbe monotone, le gaz et l'électricité se partagent le travail pour assurer le besoin.

T ext	nb de jours	nb jours cumulés	DJU	P
-7	1	1	25	25
-6	1	2	24	24
-5	2	4	46	23
-4	3	7	66	22
-3	4	11	84	21
-2	4	15	80	20
-1	6	21	114	19
0	6	27	108	18
1	8	35	136	17
2	8	43	128	16
3	10	53	150	15
4	11	64	154	14
5	12	76	156	13
6	14	90	168	12
7	15	105	165	11
8	17	122	170	10
9	17	139	153	9
10	19	158	152	8
11	18	176	126	7
12	16	192	96	6
13	12	204	60	5
14	9	213	36	4
15	7	220	21	3
16	5	225	10	2
17	4	229	4	1
18	4	233	0	0
			2432	



Rien n'est simple

Le dimensionnement d'une pompe à chaleur à compresseur est complexe. Et ceci même si l'on connaît les déperdition de la maison ou de l'immeuble ce qui est le cas d'une modernisation. Il faut mettre en évidence:

1) Le volume du circuit d'eau chaude

Celui de l'installation existante n'est pas nécessairement adapté à la nouvelle chaîne énergétique. Pour les anciennes PAC type « tout ou rien », la recommandation était de prendre environ 50 litres/kW (soit 750L pour une PAC de 15kW ou 7,5 m³ pour 150 kW. Avec les PAC nouvelle génération type « inverter » et débit du fluide caloporteur variable, il existerait une norme technique spécifiant que 14 litres/kW est largement suffisant (soit un volume de ballon tampon limité à environ 200 litres pour une PAC de 15kW et environ 2 m³ pour 150 kW

2) Le débit maximum du fluide caloporteur contenu dans la PAC

ce débit Q est fonction de la puissance thermique maximum P_{max} que devra délivrer la pompe à chaleur en kW ainsi que de l'enthalpie E en kilojoules par kilo (kJ/kg) du fluide caloporteur : on a $Q = P_{max} / E$

Si l'on utilise un fluide caloporteur HFO 1234 ze ayant une l'enthalpie de 290 kJ/kg alors que la puissance thermique maximum requise est de 150 kW le débit de fluide caloporteur utile est égal à $Q = 150 / 290 = 0,517$ kg/s

On observe l'homogénéité de la formule dans la mesure où 1 kW correspond 1 kilojoule par seconde (des kJ/s que divise des kJ/kg donne bien des kg/s)

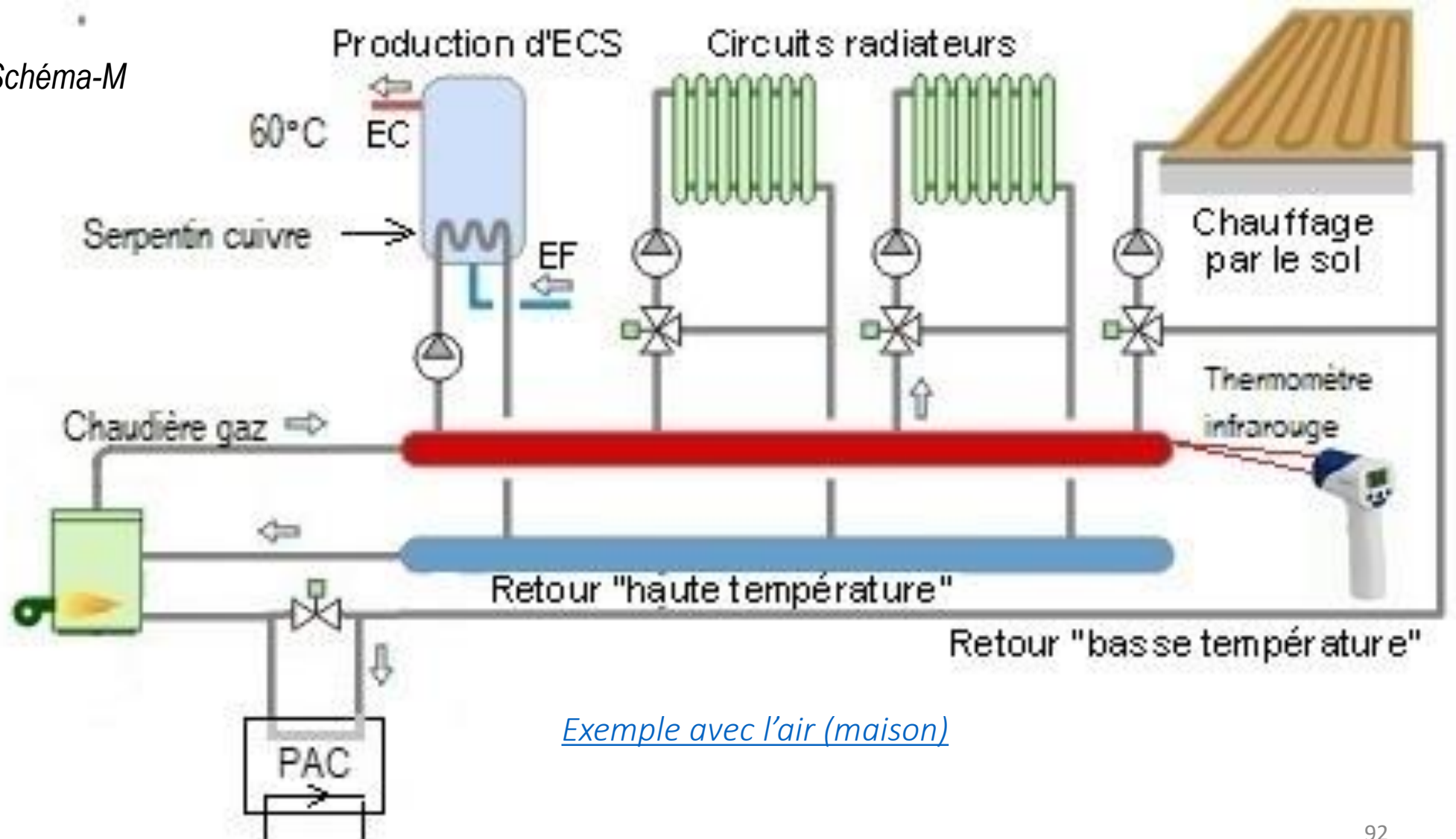
3) La masse de fluide caloporteur en circulation dans la PAC

Maintenant que l'on a une notion du débit requis pour le fluide caloporteur on conçoit que la masse m utile de fluide caloporteur dans le circuit fermé de la pompe à chaleur est fonction du temps de cycle T mis par le fluide caloporteur pour faire boucler son cycle répétitif compression à l'état gazeux, condensation détente. Ce temps de cycle est laissé à l'appréciation du constructeur de la pompe à chaleur en fonction de sa taille et ne devrait pas être inférieur à 6 minutes (360 s) pour les PAC de petite taille. Si l'on décide de prévoir le même temps de cycle pour la PAC de 150 kW la masse de fluide caloporteur est égale à $m = Q \times T = 0,517 \times 360 = 180$ kg

On conçoit au travers de ces calculs que l'installation d'une PAC est complexe, et demande du sérieux, du temps et des compétences : pour votre installation vous devrez faire appel à un professionnel maîtrisant les métiers de Chauffagiste, Thermicien, Frigoriste et Electricien, disposant de qualifications reconnues et de références, proposant uniquement du matériel performant et robuste ayant la certification « NF PAC », un matériel provenant de fabricants d'échangeurs de température issus nativement du monde du chauffage (meilleures régulations) et non du « froid » ou de la climatisation, et surtout ayant des compétences en régulation. Sans quoi, des conseils erronés seront graves de conséquences, notamment financières (réparation et surconsommation d'énergie). Une pompe à chaleur n'est assurément pas une « petite » chaudière gaz murale

Circuit simplifié chauffage - Eau Chaude Sanitaire (maison)

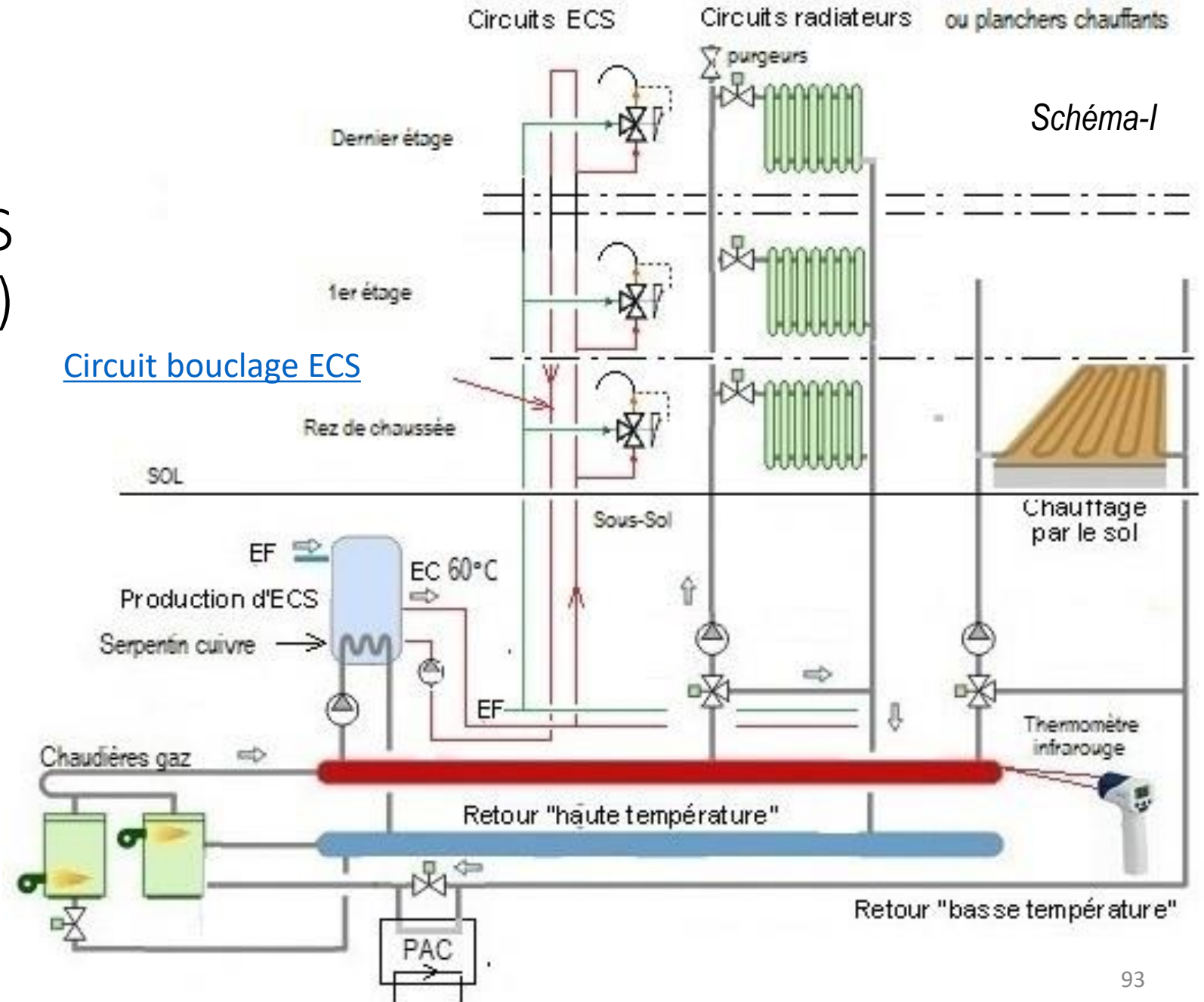
Schéma-M



Exemple avec l'air (maison)

Circuit simplifié chauffage – ECS d'un immeuble)

Prévoir une température de
départ vers les mitigeurs au
moins égale à 50° C en
raison de la légionellose



Figures *Schéma-M* et *Schéma-I*

Elles montrent comment pourrait être conçu le schéma hydraulique dans le cas d'une chaufferie hybride associée à la maison pour la première et à l'immeuble pour la deuxième.

Dans la pratique le condenseur du système thermodynamique produisant la chaleur serait raccordé sur le circuit de retour basse température venant des radiateurs ou des planchers chauffant hydrauliques. À noter que dans le cas des immeubles le circuit comprend un bouclage permettant de disposer plus rapidement de l'eau chaude sanitaire

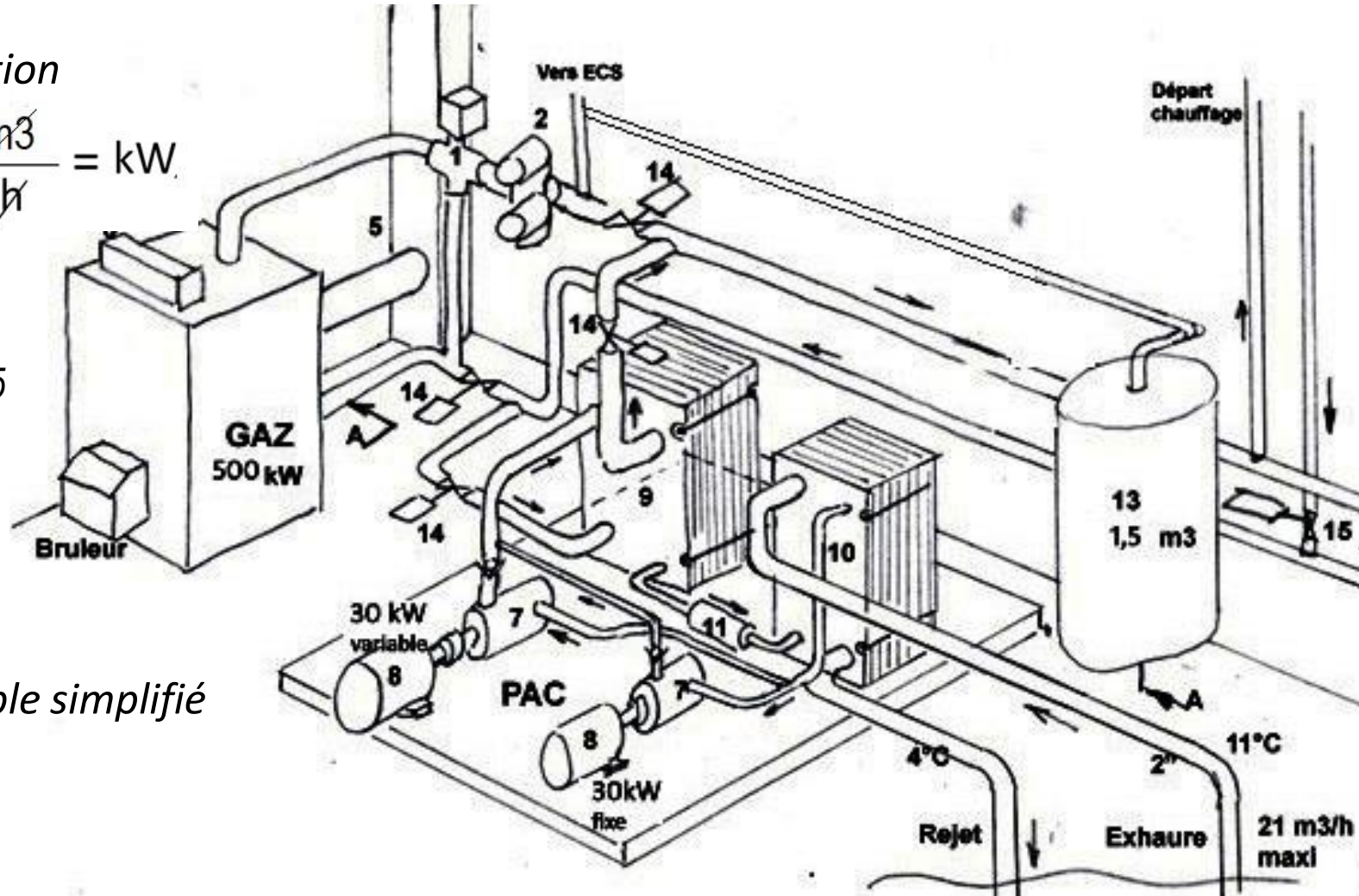
La chaufferie hybride avec l'eau (gaz + électricité) en sous-sol [Ses composants principaux:](#)

Combustion

$$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = \text{kW}$$

Figure 35

Ensemble simplifié



PAC en relève
 $P = Q_f \times E$

$$\frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} > \text{kW}$$

[La chaufferie hybride avec l'air](#)

[Conseil PAC sur nappes libres en IDF](#)

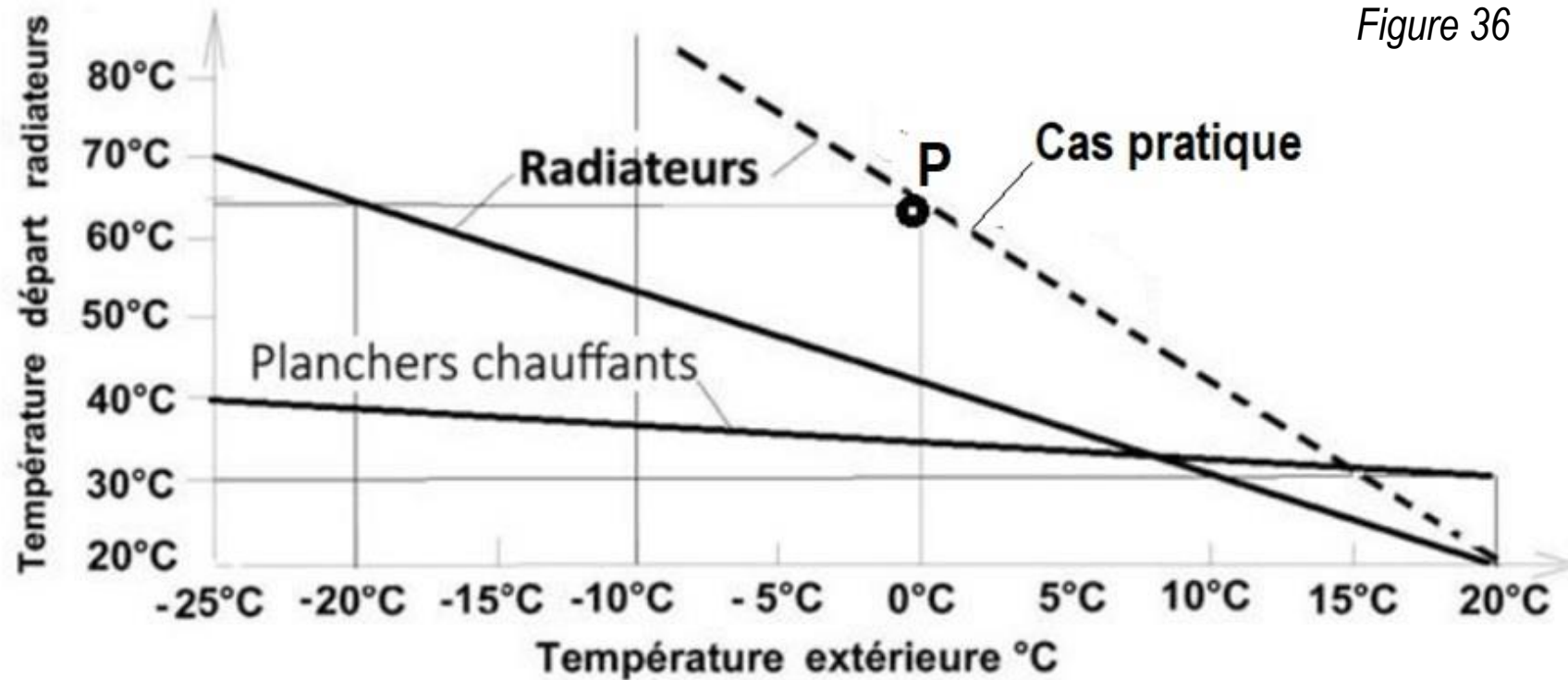
Figure 35

Elle représente une vue en perspective ce que pourrait être une chaufferie hybride associant le gaz et l'électricité pour assurer le besoin thermique d'un immeuble.

Les deux échangeurs à plaques repère 9 et 10 constituant le condenseur et l'évaporateur de la pompe à chaleur seraient naturellement capotés thermiquement pour supprimer les déperditions thermiques.

Quant aux groupes motopompes qui symbolisent le compresseur de la pompe à chaleur, ils pourraient être disposés avantageusement à axe vertical plutôt que horizontal pour tenir compte du manque de place dans le sous-sol des immeubles (Technologie spirale *Copeland*)

La température à la source chaude



La figure ci-dessus montre la loi d'eau (en traits pleins) de plusieurs systèmes de chauffage collectifs en Finlande, un pays plus froid que le nôtre. L'auteur a ajouté en pointillé pour comparaison la loi d'eau de l'immeuble objet du « cas pratique » de son livre sur l'énergie avec les radiateurs hydrauliques existants de son appartement. On observe l'avance technologique de la Finlande qui a déjà standardisé les [radiateurs basse température](#). Il est triste de constater le retard technologique de notre pays à ce sujet. Le calcul prouve en effet une amélioration des performances du chauffage thermodynamique lorsque l'on adopte ce type de radiateurs. On a intérêt à doubler, voire à tripler la surface des radiateurs hydrauliques existants pour diminuer la température à la source chaude. Quant à la construction neuve, le plus efficace est de prévoir des planchers chauffant.

La mesure de la température de départ vers les radiateurs peut se faire avec un [thermometre infrarouge](#)

Figure 36

Extraite d'une revue CFP, cette figure montre les résultats obtenus dans des chauffages collectifs finlandais en ce qui concerne la température utile dans les planchers chauffants et dans les radiateurs lorsque la température à extérieure varie. Elle prouve que ce pays est très en avance sur nous étant donné que les performances du chauffage thermodynamique s'améliore lorsque la température utile pour assurer le besoin thermique est plus faible

Pour comprendre comment se situe mon immeuble à ce sujet j'ai mesuré qu'elle était le besoin en température dans notre circuit de chauffage pour une température extérieure de 0°C (point P)

Projet de chaufferie hybride (Cas pratique)



Gaz
+
électricité

Chiffres clés

800 000 kWh annuel
5000 m² habitables
60 appartements

L'Ademe et le mélange des genres

L'assistance locale forage vers nappe libre

Les deux orifices permettant de connecter le condenseur de la pompe à chaleur aquathermique sont prévus sur le circuit retour des radiateurs (voir à droite de la photo)

Assistance à mise en œuvre

Théorie du comportement thermique de l'ensemble chaufferie-immeuble

On ne peut pas dire que nos radiateurs soient à basse température mais cette température étant malgré tout raisonnable, j'ai essayé de convaincre ma copropriété de commuter vers une chaufferie hybride à l'occasion de l'abandon de la chaufferie fioul. Ceci sans y parvenir complètement. Il a seulement été décidé :

- de concevoir un circuit gaz autorisant cette évolution
- de mettre en place les deux connexions de la PAC sur le circuit de retour basse température du circuit chauffage
- de conserver le réservoir fioul enterré dans le jardin avec un additif antirouille aux fins d'utilisation comme bac de décantation en amont de l'évaporateur

Schéma hydraulique

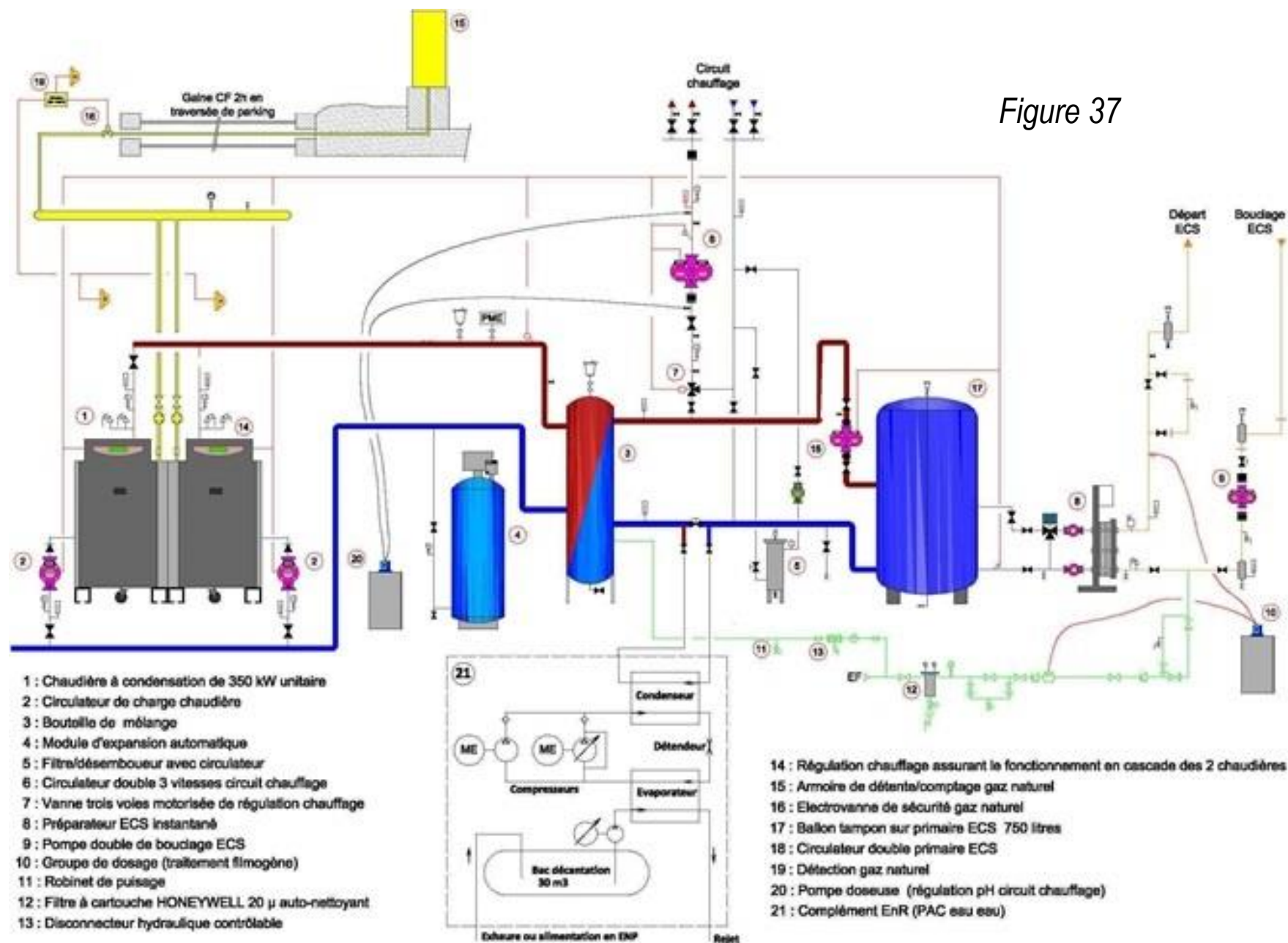


Figure 37

Le schéma hydraulique de la chaufferie hybride

Le temps qui passe... 10 mn

L'âge est le temps qui nous sépare de notre date de naissance

L'énergie W est égale à la puissance P que multiplie le temps t : **$W = P t$**

Si l'on exprime la puissance P en kilowatt (kW) et le temps t en heures l'énergie W s'exprime en kilowattheure (kWh)

Le chauffage

S'il faut par exemple 30 kW pour chauffer une maison au plus froid de l'hiver, l'énergie consommée en une journée de 24h est égale à $P t = 30 \times 24 = 720$ kWh

L'ECS

Compte tenu de la chaleur spécifique de l'eau, il faut sensiblement* un kWh pour augmenter un m³ d'eau de 1 degré. (Voir page 32)

Cela signifie qu'il faut une quantité d'énergie égale à $0,2 \times 25 = 5$ kWh si l'on se fait couler un bain de 0,2 m³ à la température de 35 degrés en utilisant une résistance électrique pour élever de 25 degrés la température de l'eau froide initialement à 10 degrés. Cela signifiant également que si l'on souhaite que son bain soit prêt en 10 min (0,166 heure), la puissance thermique requise pour obtenir ce résultat est de $P = W / t = 5 / 0,166 = 30$ kW et est égale à celle qui est nécessaire pour chauffer la maison au plus froid de l'hiver.

Ces chiffres signifiant que si l'on utilise une pompe à chaleur ayant un coefficient de performance (COP) de 5 pour produire l'eau chaude sanitaire et chauffer la maison en coupant le chauffage pendant 10 mn, la chute de température dans la maison n'est pas significative compte tenu de la constante de temps thermique du système logement-chaufferie voisine de plusieurs dizaines d'heures et l'énergie électrique requise pour assurer la fourniture de l'eau chaude du bain et le chauffage est limitée à $725/5 = 145$ kWh** la différence de 580 kWh étant prélevée dans l'environnement. Une fois installée, un tel dispositif de chauffage est capable d'assurer le besoin chauffage plus fourniture de l'eau chaude sanitaire dans les meilleures conditions sans faire appel au [solaire thermique](#).

* En fait 1,16 kWh

** Le besoin en électricité est nettement plus faible qu'avec la chaîne énergétiques existante du type effet joule. Ce qui réduit d'autant le besoin en stockage électrique. Un travail d'équipe guidé par la réflexion individuelle de quelques individus d'exception, des connaissances approfondies en électronique et en programmation vont être nécessaires pour assurer le besoin en période hivernale probablement au travers d'un compromis géothermie profonde, électrolyse de l'hydrogène

Ce sont les chiffres et non les mots qui m'ont convaincus (Voir page 121)

Le temps qui passe..... 5000h

L'énergie W est égale à la puissance P que multiplie le temps t : $W = P t$

Si l'on exprime la puissance P en kilowatt (kW) et le temps t en heures l'énergie W s'exprime en kilowattheure (kWh)

La période de chauffe (environ 5000h)

La puissance thermique disponible en kW avec un débit de la Seine proche de 400 m³/s ou 1 440 000 m³/h pour une différence de température de 10 degrés centigrade est égale à $1,16 \times 1\,440\,000 \times 10 = 16\,704\,000$ kW

Le potentiel thermique exprimé en kWh de la Seine entre mi octobre et mi avril correspondant à une période de chauffe voisine de 4500h et avec un débit moyen proche de 400 m³/s (voir page 46) à un volume d'eau égal à $1\,440\,000 \times 4500$ m³ et une énergie égal $1,16 \times 1\,440\,000 \times 4500 \times 10 = 7,5 \times 10^{10}$ kWh

Ou 7500 kWh pour chacun des 10 millions de parisiens un peu supérieur au besoin actuel sans isolation (Voir figure 1)
(30 m² de surface habitable par parisien sur la base d'une déperdition de 250 kWh /m² habitable)

$$\begin{array}{ccccc} P & = & 1,16 & \cdot & Q & \cdot & \Delta T \\ kW & & & & m^3/h & & ^\circ C \end{array}$$

$$\begin{array}{ccccccc} P \cdot \text{temps} & = & 1,16 & \cdot & \underbrace{Q \cdot \text{temps}}_{m^3} & \cdot & \Delta T \\ kW h & & & & m^3 & & ^\circ C \end{array}$$

Voir aussi le temps qui passe50 h et la [constante de temps thermique d'un immeuble et sa chaufferie](#)

Le temps qui passe

Il n'est pas possible de passer sous silence ces 2 pages sur *le temps qui passe*. Ceci en raison de leurs importances. Elles font en effet intervenir à la fois ce *temps qui passe* et la notion de [potential énergétique des corps](#).

La puissance et l'énergie sont deux notions proches l'une de l'autre . La deuxième, l'énergie, est dépendante de la première et d'un 3ème paramètre: le temps qui passe.

- La première formule associe la puissance, l'énergie et le temps qui passe
- Les deux formules de la page suivante également mais en y associant la notion de potentiel thermique de l'eau (1,16 kWh /m³ et ° C)

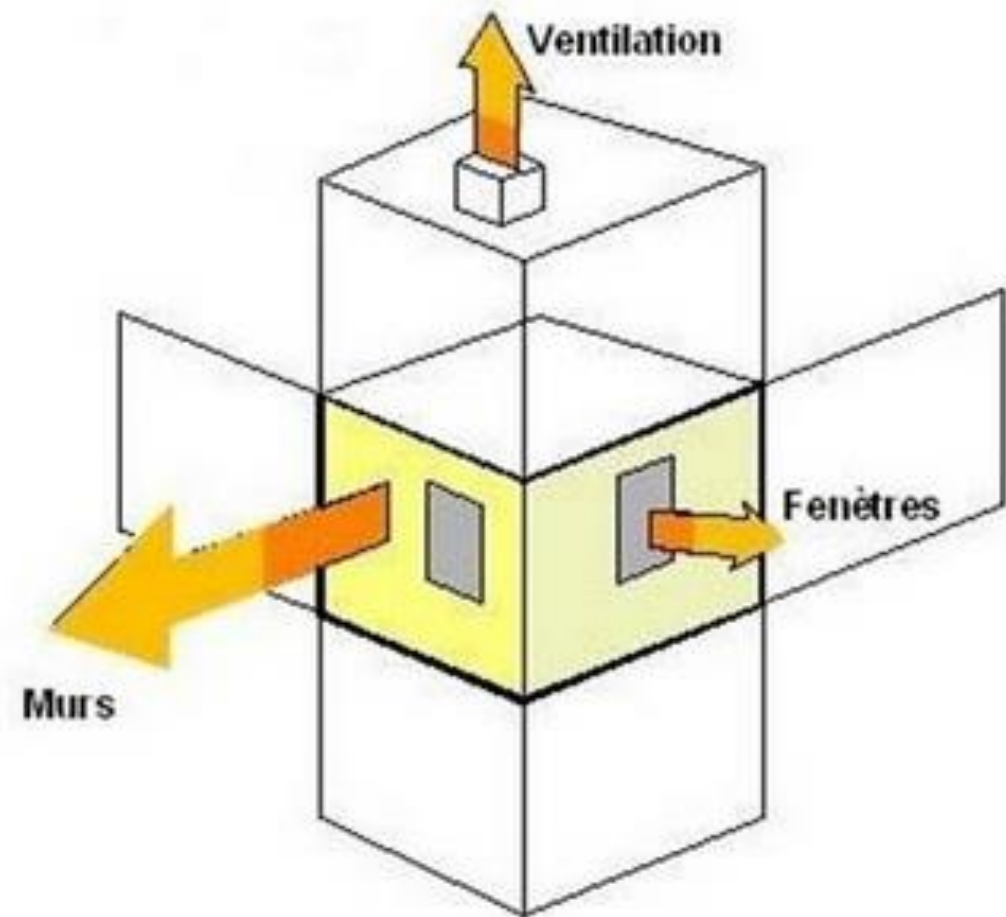
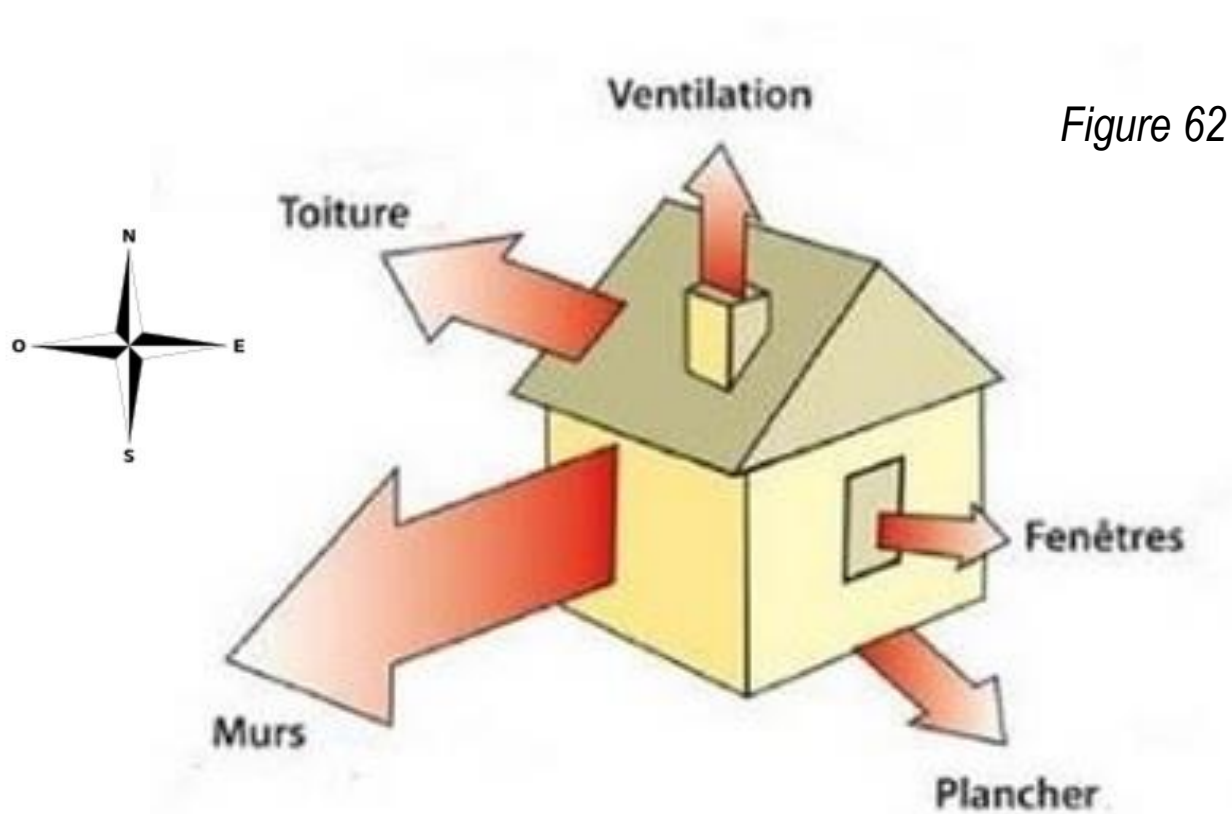
La climatisation

Le réchauffement climatique est à nos portes et nous avons tout intérêt à prendre en compte qu'en cas de chaleur intense lors de la période estivale une peau humaine humidifiée soumise au flux d'air d'un ventilateur ressent, en raison du froid généré par l'eau qui s'évapore, une sensation de fraîcheur bien agréable.

Heureusement d'ailleurs vu que les dispositifs de climatisation assurant les échanges thermiques sur l'air sont irrecevables en ville. Ceci par le fait que ces climatiseurs air-air réversibles qui font du chaud lorsqu'il fait froid et du froid lorsqu'il fait chaud seraient de véritables bombes à retardement si l'on devait les généraliser dans les villes souvent surpeuplées pour assurer la climatisation de l'habitat en été. L'air n'est pas en effet le véhicule thermique adapté pour réguler la température à l'intérieur de l'habitat. Le bruit qu'ils génèrent et l'encombrement de ces [pompes à chaleur réversibles air-air](#) sont certes gênants mais pour l'essentiel, c'est une raison plus importante qui va condamner cette technologie en ville : pour créer du froid à l'intérieur de l'habitat au plus chaud de l'été, ces évaporateurs qui fonctionnent pour finir comme un réfrigérateur réchauffent dangereusement l'air ambiant des villes déjà très élevée. Avec 20 000 habitants au km² à l'intérieur de Paris intramuros et 50 m² au sol par habitant, la température deviendrait intenable en été si l'on devait généraliser ce type de régulation à l'ensemble de l'habitat et l'atmosphère surchauffée des villes le serait encore plus du fait de la climatisation.

Force est de constater que le retard pris en continuant à concentrer uniquement notre action sur le poste [isolation](#) en négligeant la génération est inquiétant. Certes les techniques d'isolation progressent. La [guerre entre les isolants minces et les isolant épais](#) semble heureusement terminée et le R de 6,2 m².K/W des isolants minces modernes reconnu. Toutefois cette situation à sens unique pourrait bien être dramatique vu que [dans une dizaine d'année](#), lorsque la demande va excéder l'offre et que le prix des produits fossiles va en conséquence flamber, nous n'aurons pas en 10 ans eu le temps d'assurer la transition vers la « *Solar Water Economy* » qui échange l'énergie thermique renouvelable dans l'eau et non dans l'air. Ceci avec l'avantage qu'au plus chaud de l'été, il sera possible avec cette technologie de restituer dans l'eau géothermale des nappes captives profondes l'énergie thermique que l'on y a prélevée en hiver sans affecter la température ambiante en ville. Il est clair que le gain moyen de 30% en consommation qui résulte selon l'Ademe de l'isolation de l'habitat n'est pas à l'échelle du besoin. Si nous continuons à ne prendre aucune action significative avec une génération thermique style « *Solar Water Economy* », la tendance vers l'élévation de la température dans les villes en raison de la densité urbaine et du réchauffement climatique pourrait devenir intenable nous obligeant à la climatisation pour assurer le confort à l'intérieur de l'habitat.

La maison et l'immeuble



Les deux figures parlent d'elle-même en ce qui concerne l'importance relative des déperdition de l'habitant. Quant à [l'individualisation des frais de chauffage](#) il n'est pas trop difficile de comprendre l'absurdité de cette mesure.