

1  ***Production de l'énergie***

2  ***Consommation de l'énergie***

3  ***L'eau***

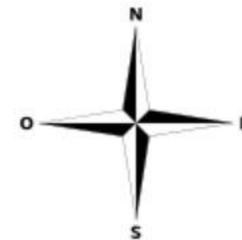
4  ***Les chiffres***

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

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

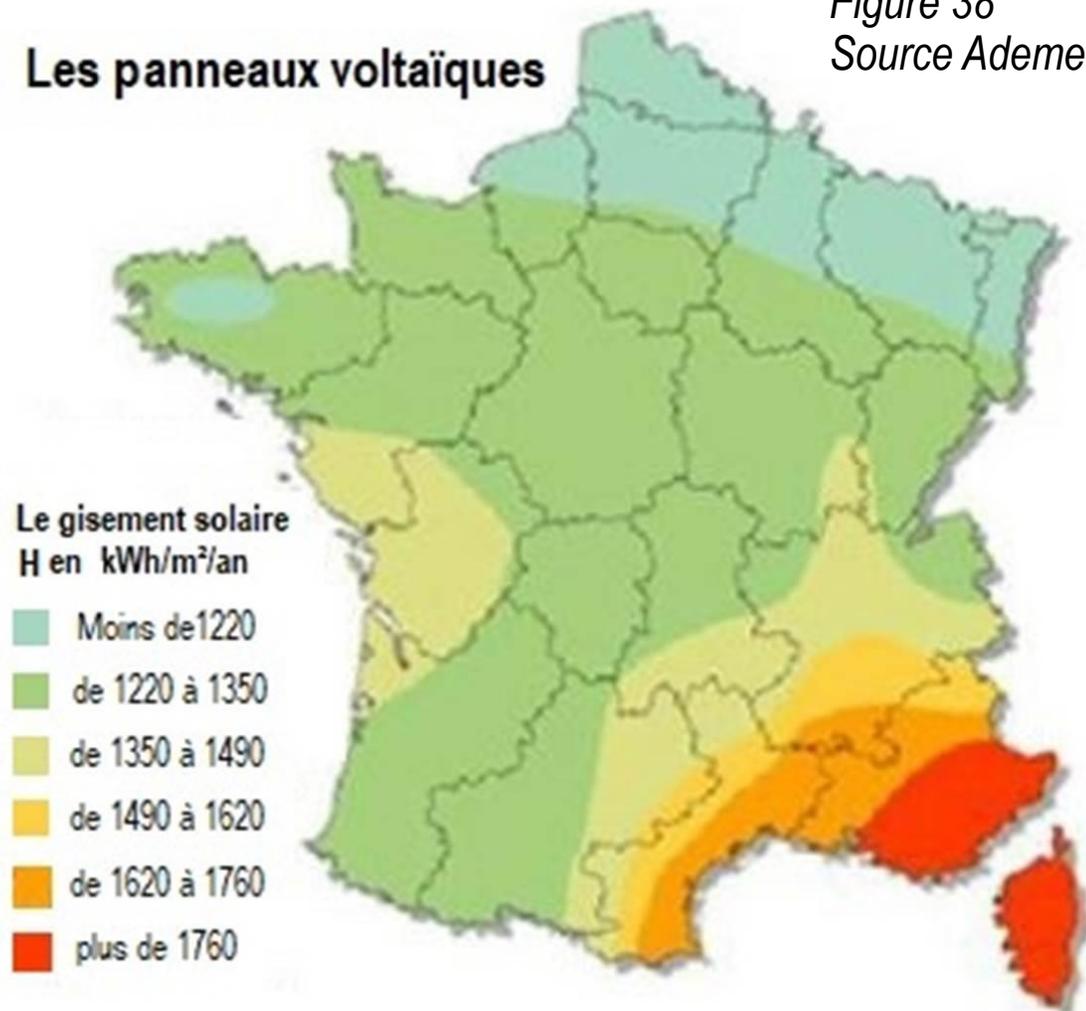
7  ***La synthèse***

Le soleil

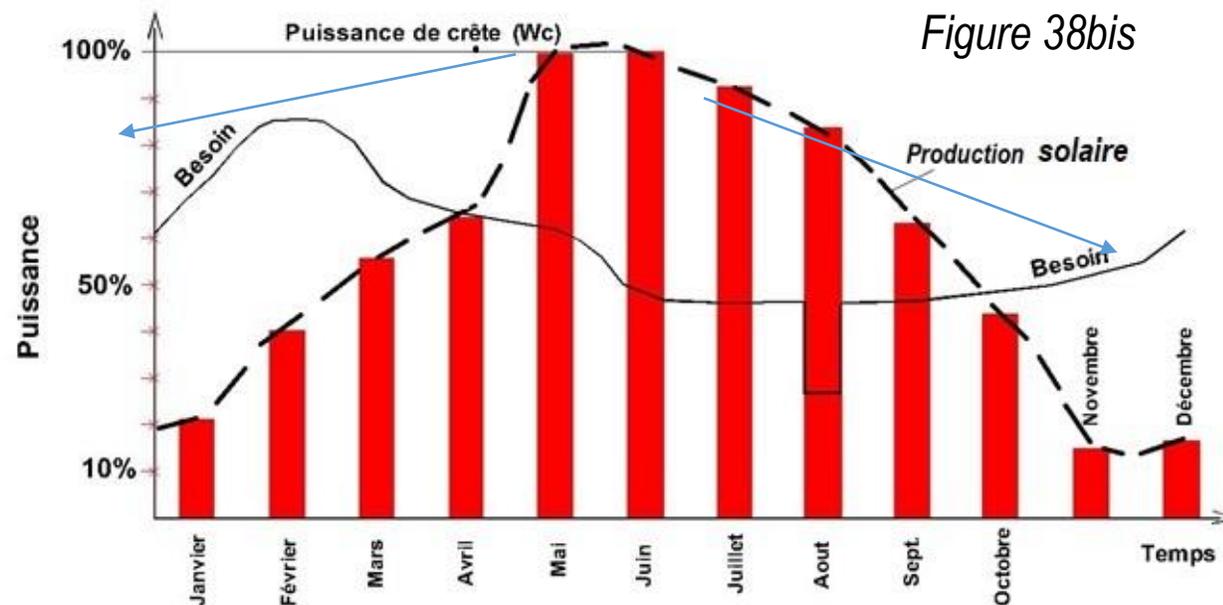


Les panneaux voltaïques

Figure 38
Source Ademe



Production et besoin électrique



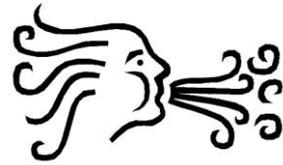
Production : [méthode calcul approximative](#)

Autoconsommation

On a du mal au travers d'internet à se faire une opinion de ce que peut nous apporter à l'année une surface de panneau voltaïque égale à 1 m² en terme d'énergie électrique exprimé en kWh. Je suis tout de même parvenu à me faire une opinion à ce sujet. Ceci en aidant une voisine ayant commandé un peu rapidement 3 kWc de panneaux solaires pour implantation sur le toit de sa maison située en Seine et Marne. Ce que l'on peut dire c'est qu'en divisant par 10 la valeur de H exprimée kWh/m²/an sur la *figure 38* de l'Ademe on obtient sensiblement la production électrique à l'année exprimée en kWh de ce m² de panneau. Ceci sachant que la nuit il n'y a pas de production, que l'inclinaison du panneau et son orientation par rapport au sud influe sur la production, qu'il faut tenir compte des performances de l'onduleur qui converti le courant continu fourni par le panneau en courant alternatif compatible avec le réseau.

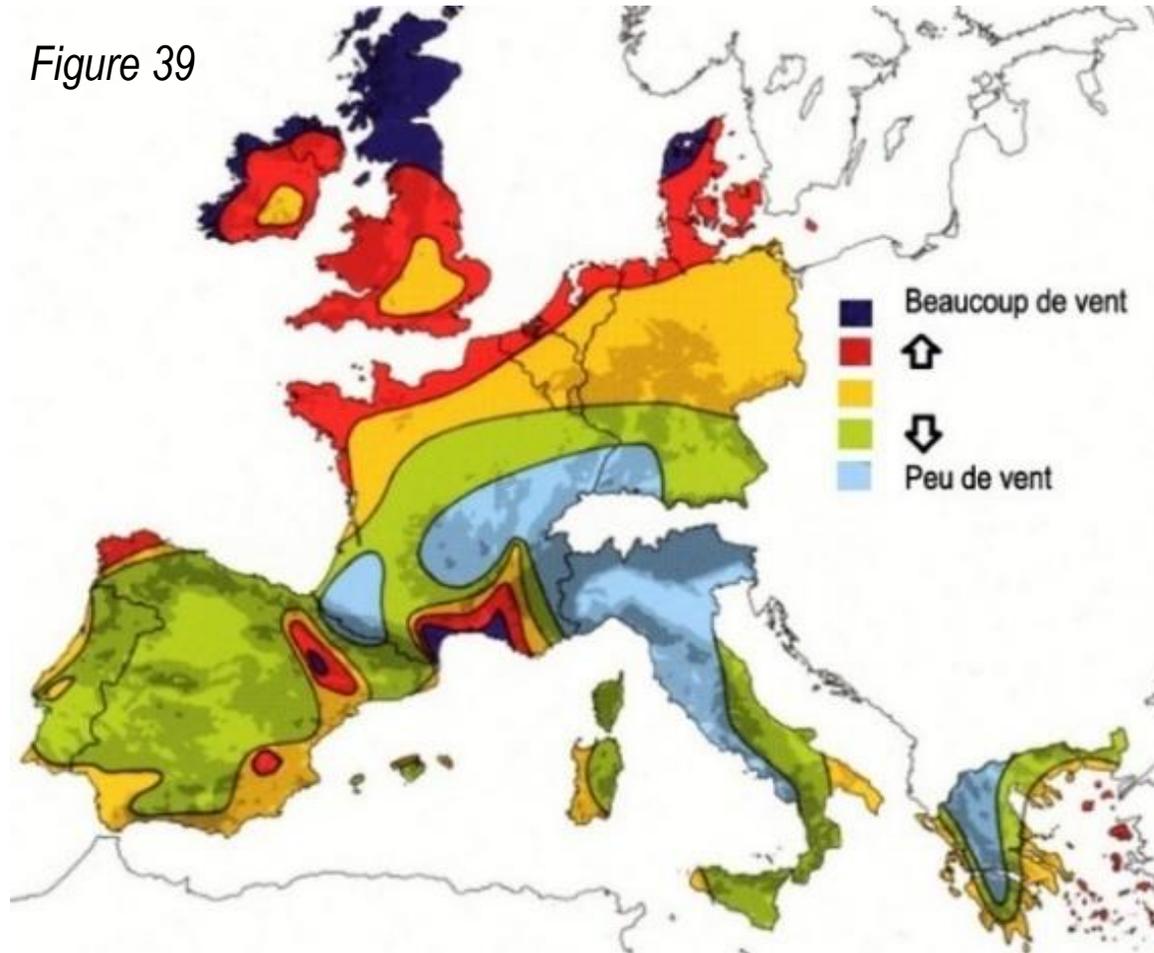
La *figure 38 bis* quant à elle permet de comprendre que la puissance fournie par la panneau (en rouge) varie de façon importante selon la saison. Elle permet aussi de comprendre que c'est plutôt lorsque le besoin est important à savoir pendant la saison hivernale que la production du panneau est la plus faible.

Le vent et l'air



Production collective

Figure 39



Ça souffle ou pas



Le gigantisme des éoliennes tri-pales

Figure 39

La production d'énergie électrique renouvelable obtenue grâce aux éoliennes est complémentaire de la production voltaïque.

On observe que le potentiel éolien européen est surtout en Angleterre et dans le nord de l'Europe.

Quant à l'évolution vers le gigantisme des éoliennes il est justifié par les effets de parois que nous avons évoqués précédemment

Soleil

Selon WIKI la puissance du rayonnement solaire reçu par les couches les plus élevées de l'atmosphère est d'environ 340 W/m² en moyenne soit une énergie reçue annuellement par m² égale à environ 3000 kWh (0,34x 8760). Compte tenu de la surface de la terre égale à 510 millions de km² et vu qu'un km² c'est un million de m², cela correspond à une quantité d'énergie par habitant égale à environ 200 millions de kWh . $(510\ 000\ 000 \times 1\ 000\ 000 \times 3000)/7\ 000\ 000\ 000 = 218\ 571\ 428\ \text{kWh}$. Cela est réconfortant vu que le problème le plus grave à venir sur terre n'est donc peut-être pas le réchauffement climatique mais la satisfaction de nos besoins lorsque les énergies non renouvelables seront épuisées. En effet la quantité d'énergie naturelle qui nous vient du soleil est sensiblement dix mille fois supérieure à celle qui serait dissipée dans l'atmosphère sur terre si l'on devait généraliser mondialement le nucléaire et la combustion des produits fossiles. Ceci vu la consommation énergétique moyenne mondiale par habitant sur terre sensiblement voisine de 15 000 kWh (Voir page 13)

On sait maintenant qu'en région parisienne 25 m² de panneaux solaire soit une surface sensiblement deux fois plus faible que la surface disponible au sol par parisien permettrait de générer annuellement une quantité d'énergie électrique proche de 2500 kWh proche du besoin global de 2800 kWh définit page 26 pour assurer les besoins confondus du chauffage urbain, de la voiture hybride rechargeable ainsi que de l'éclairage et de l'électroménager. Il ne serait donc pas nécessaire comme certain l'on envisagé de recouvrir Paris d'une grosse bulle voltaïque pour assurer son besoin en électricité. Ceci dit les toitures n'étant pas toujours disponibles et parfois orientées au nord, il sera pour des raisons pratiques nécessaire afin d'assurer le besoin en énergie de notre grande métropole d'adjoindre quelques centrales voltaïques en Beauce.

Vent

Bien que le potentiel en énergie électrique issu du voltaïque devance celui de l'éolien c'est paradoxalement [l'éolien qui remporte la palme en Europe](#) en assurant 17% du besoin avec une production de 240 TWh alors que celle du voltaïque n'est que de 130 TWh.

Il y a deux raisons qui expliquent ce résultat

- les effets de parois évoqués page 37 figure 21 qui font que les performances de l'éolienne s'améliorent lorsque sa taille augmente.
- [La diminution du niveau sonore](#) (environ 3 db en moins) résultant de pièces allongées en forme de « dents de scie », qui se fixent sur le bord de fuite des pales.

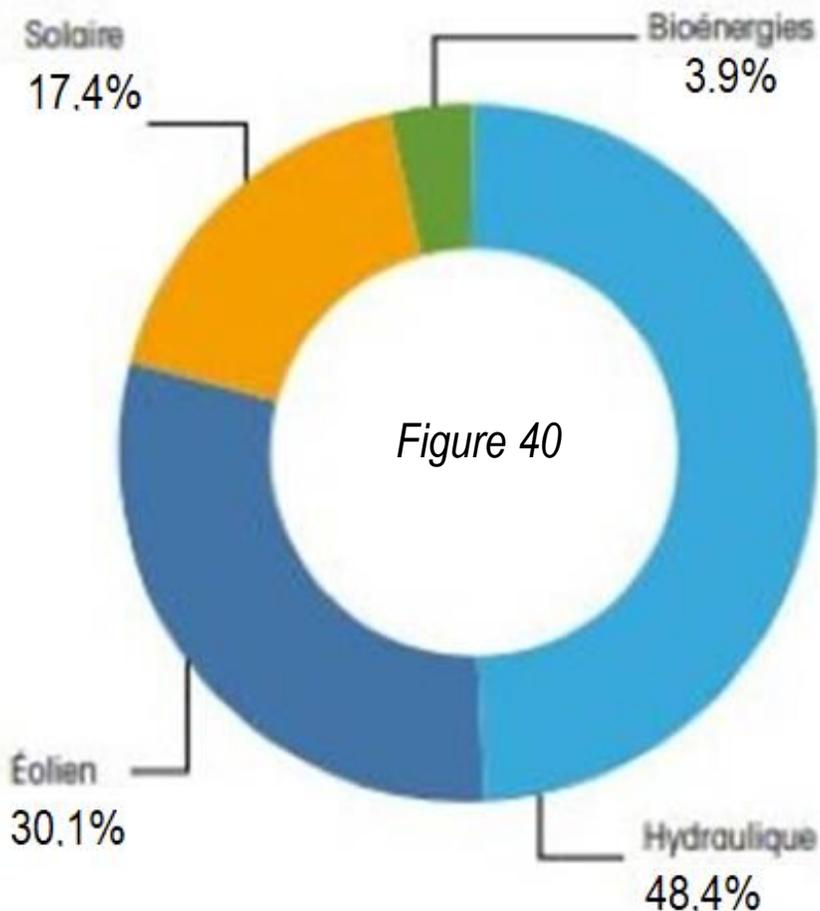
La production d'électricité verte en France

En raison de sa puissance industrielle et de son souhait de s'orienter vers les renouvelables, l'Allemagne s'est engagée résolument dans cette voie mais elle se rend maintenant compte au moment où l'éolien fournit sensiblement le cinquième de ses besoins en électricité qu'il lui faut regarder ailleurs.

Protéger nos paysages en éloignant la source de production électrique de nos habitations va à l'encontre de notre intérêt de rapprocher la source de production du lieu d'utilisation. Cette considération importante est moins contraignante avec le voltaïque qui présente peut-être l'inconvénient d'être intermittent mais qui en contrepartie est moins aléatoire que l'éolien. Une autre considération aussi importante est celle concernant le prix de revient du kWh électrique qui fait qu'avec l'éolien, celui-ci est supérieur à celui du voltaïque en raison de la complexité de la chaîne énergétique avec présence de boîtes mécaniques, d'alternateurs et de coûteuses pales en matériaux stratifiés. Ceci facteur aggravant avec un risque de casse en zone cyclonique

Le potentiel éolien « on shore » de l'Europe est peut-être comme le pense Mr Deboyser dans le blog "révolution énergétique" plus important que l'estimation qui en avait été faite jusqu'à présent mais prétendre que cette chaîne énergétique pourrait satisfaire à elle seule en mettant tout dans le même panier l'ensemble des besoins en électricité de l'Europe en ne faisant appel ni au nucléaire ni aux centrales thermiques avec la combustion des produits fossiles et en oubliant le Soleil n'est assurément pas la solution.

Le soleil ne brille pas tout le temps , le vent ne souffle pas toujours .
Jeremy Rifkin



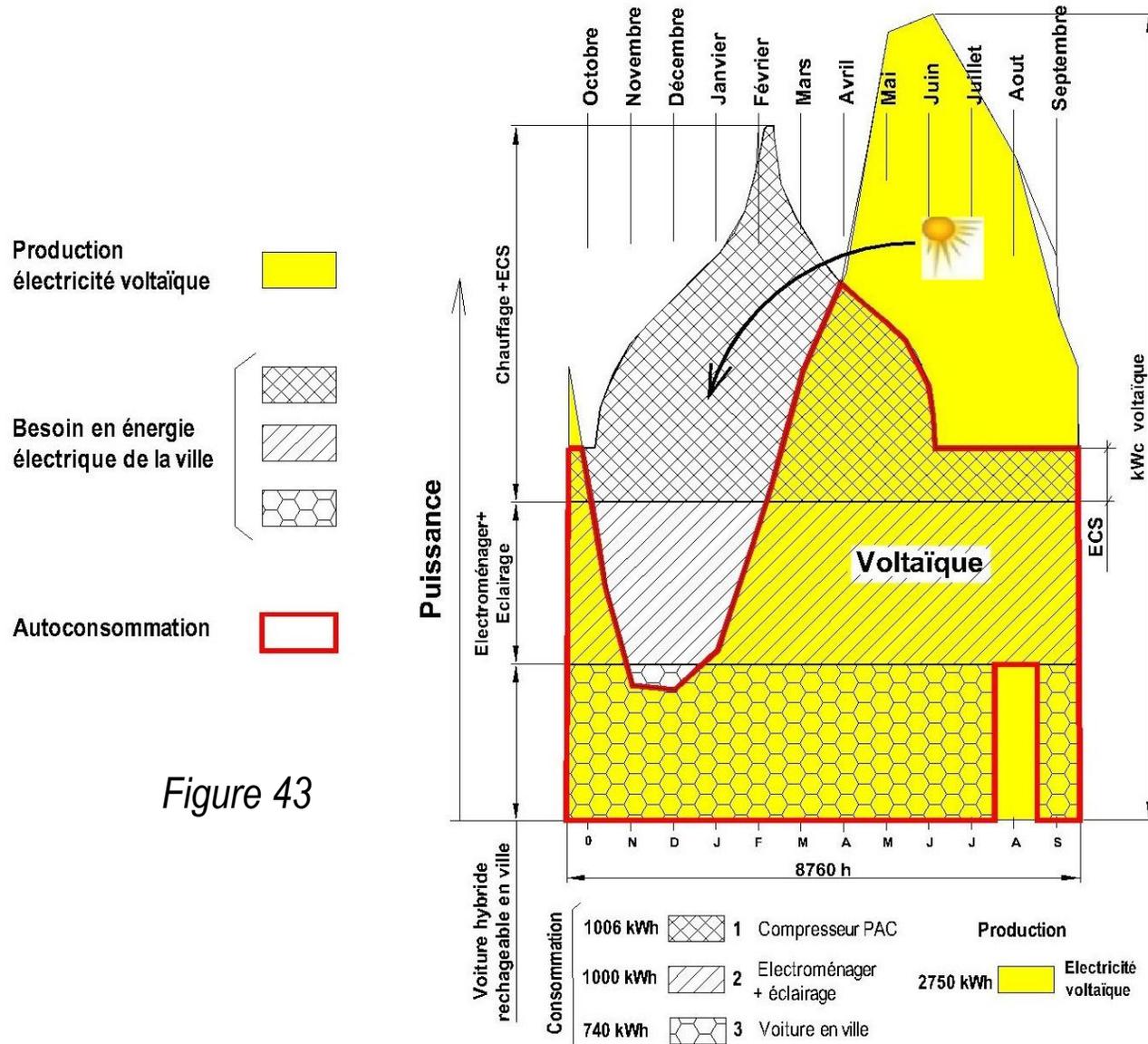
Electricité renouvelable en France en 2019

Figure 40

La part des énergies renouvelables en France est encore faible. Ceci si on la compare à la consommation globale d'énergie (fossile + nucléaire). Cette part, voisine de 15%, est éloignée de l'objectif européen de neutralité carbone.

Notre retard est surtout concentré sur le solaire, là où se situe, et de loin le plus gros potentiel.

Stockage électricité solaire (intermittence été-hiver)



La quantité d'énergie pour assurer un stockage de masse de l'électricité solaire à l'échelle de temps des saisons est extrêmement important.

Un stockage local est souhaitable !

Bio gaz ? Voir page 11

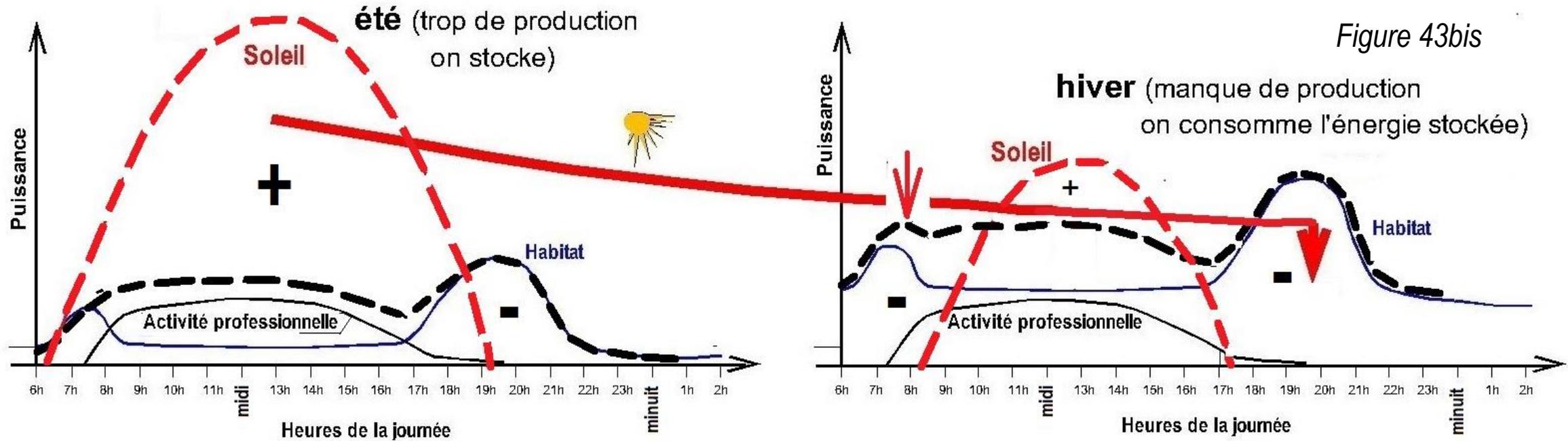
30 kg de paille = 10 kWh elec

Combustion bois et ordures

Figure 43

On observe sur cette figure qu'il devrait être possible grâce à l'autoconsommation (délimitée en rouge) de satisfaire à partir du soleil et pendant une bonne partie de l'année le besoin en énergie électrique de la ville. Et ceci pour les besoins confondus du chauffage thermodynamique, de l'éclairage + électroménager, avec en sus l'approvisionnement d'une voiture hybride rechargeable fonctionnant en mode électrique. On examinera par la suite toutes les solutions qui s'offrent à nous pour limiter les transferts d'énergie afin de satisfaire le besoin en hiver. On comprend en voyant ces courbes qu'il nous faudra imaginer des dispositifs de stockage de l'électricité pour satisfaire le besoin en hiver.

Production (voltaïque seule) et utilisation



Les dissipations thermiques sur 24h sont faibles. De ce fait l'énergie sous sa forme thermique se conserve un jour sans problème. De ce fait avec l'aide éventuel des piles, la variabilité dans le temps de l'électricité provenant des panneaux solaires ne devrait pas poser de problèmes graves d'approvisionnement en électricité. Ceci par le fait que les quantités d'énergie mis en jeu à l'échelle de la journée sont assez faibles et qu'il n'y a pas de soucis à se faire vu que la production voltaïque peut être assez facilement dimensionnée pour être excédentaire par rapport au besoin. Par contre si la satisfaction de nos besoins en électricité en hiver ne faisait appel ni au nucléaire ni à la combustion des produits fossiles le stockage de l'énergie solaire excédentaire produite en été pour pouvoir en disposer en hiver lorsque la production solaire est faible va poser un problème difficile à résoudre vu **l'énorme** quantité d'énergie électrique devant être stockée. L'échelle de temps des saisons ne se chiffre plus en effet en heures mais en une voir 2 centaines de jours.

Figure 43bis

Il est pris ici comme base de réflexion une base de temps 365 plus faible que la précédente : le cycle jour-nuit au lieu de été-hiver.

Comme précédemment, seule électricité solaire voltaïque a été à nouveau pris en considération pour la génération mais il a été rajouté au besoin de l'habitat celui de l'énergie associée à l'activité professionnelle (industrie + agriculture).

On remarque, sur la partie gauche de la figure, que pendant les journées d'été la génération solaire est pratiquement toujours supérieure au besoin

On remarque par contre sur la partie droite de la figure que la production solaire hivernale n'est que très peu de temps capable de satisfaire le besoin et que le déficit (le moins) est très supérieur à l'excédent (le plus)

On comprend en regardant cette figure que pour satisfaire le besoin, la quantité d'énergie devant être stockée en été pour récupération en hiver est extrêmement importante nécessitant un stockage de masse de l'électricité

Complémentarité vent – soleil ?

Vue idyllique du stockage (intermittence vent + soleil)

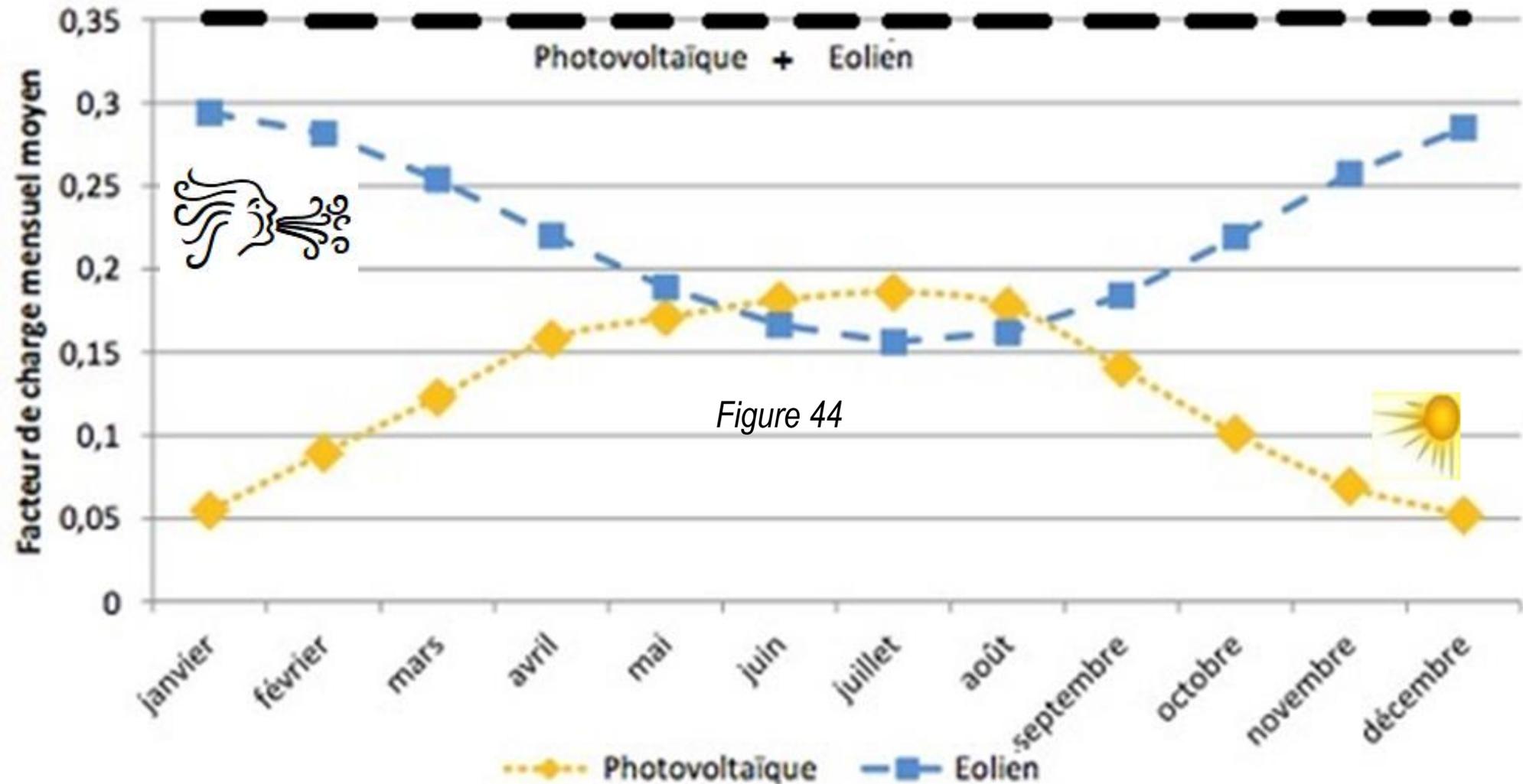


Figure 44

Cette figure, bien sûr idyllique, montre que si l'on adjoint à la génération solaire électrique la production électrique de l'éolien, ces deux techniques de production sont complémentaires les éoliennes aidant les panneaux voltaïques particulièrement en hiver lorsque le soleil fait défaut

Production (voltaïque + éolien) et utilisation

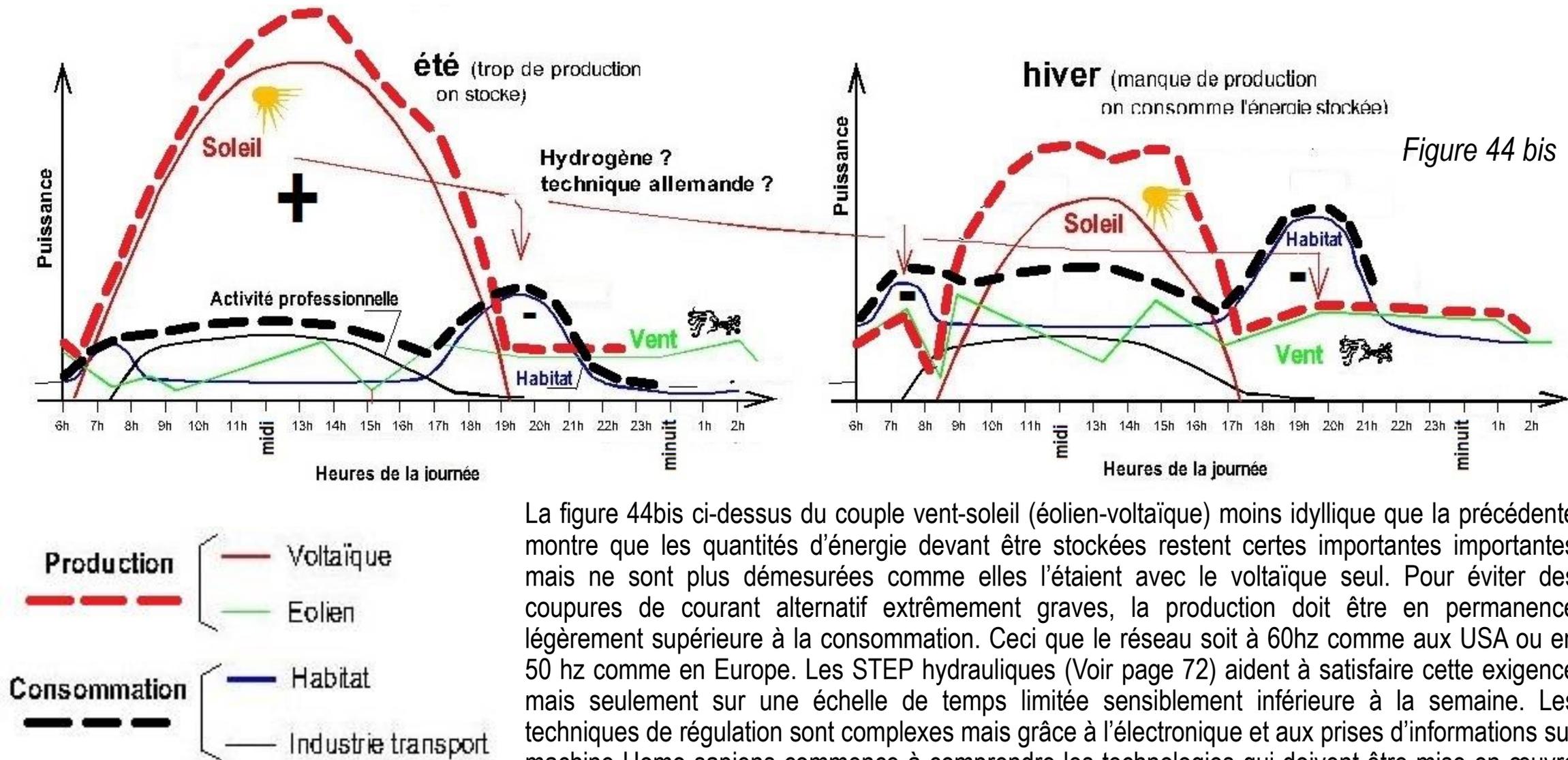


Figure 44 bis

La figure 44bis ci-dessus du couple vent-soleil (éolien-voltaïque) moins idyllique que la précédente montre que les quantités d'énergie devant être stockées restent certes importantes importantes mais ne sont plus démesurées comme elles l'étaient avec le voltaïque seul. Pour éviter des coupures de courant alternatif extrêmement graves, la production doit être en permanence légèrement supérieure à la consommation. Ceci que le réseau soit à 60hz comme aux USA ou en 50 hz comme en Europe. Les STEP hydrauliques (Voir page 72) aident à satisfaire cette exigence mais seulement sur une échelle de temps limitée sensiblement inférieure à la semaine. Les techniques de régulation sont complexes mais grâce à l'électronique et aux prises d'informations sur machine Homo sapiens commence à comprendre les technologies qui doivent être mise en œuvre pour assurer la régulation de tels systèmes de tel sorte qu'il fonctionne correctement.

Figure 44 bis

Si l'on rajoute la production de l'éolien au soleil en prenant à nouveau les heures de la journée comme base de temps la figure ci-dessus qui compare la production et le besoin journalier en été et en hiver permet de comprendre que les quantités d'électricité devant être stockées pour satisfaire le besoin sont maintenant beaucoup plus faibles.

Satisfaction du besoin électrique avec vent + soleil

Le solaire voltaïque produit presque 4 fois plus en été qu'en hiver

L'éolien produit environ 2 fois plus en hiver qu'en été

Stockage été-hiver environ 10% du besoin total, soit sensiblement 280 kWh / parisien (voir page 25)

[Notion positif négatif](#)

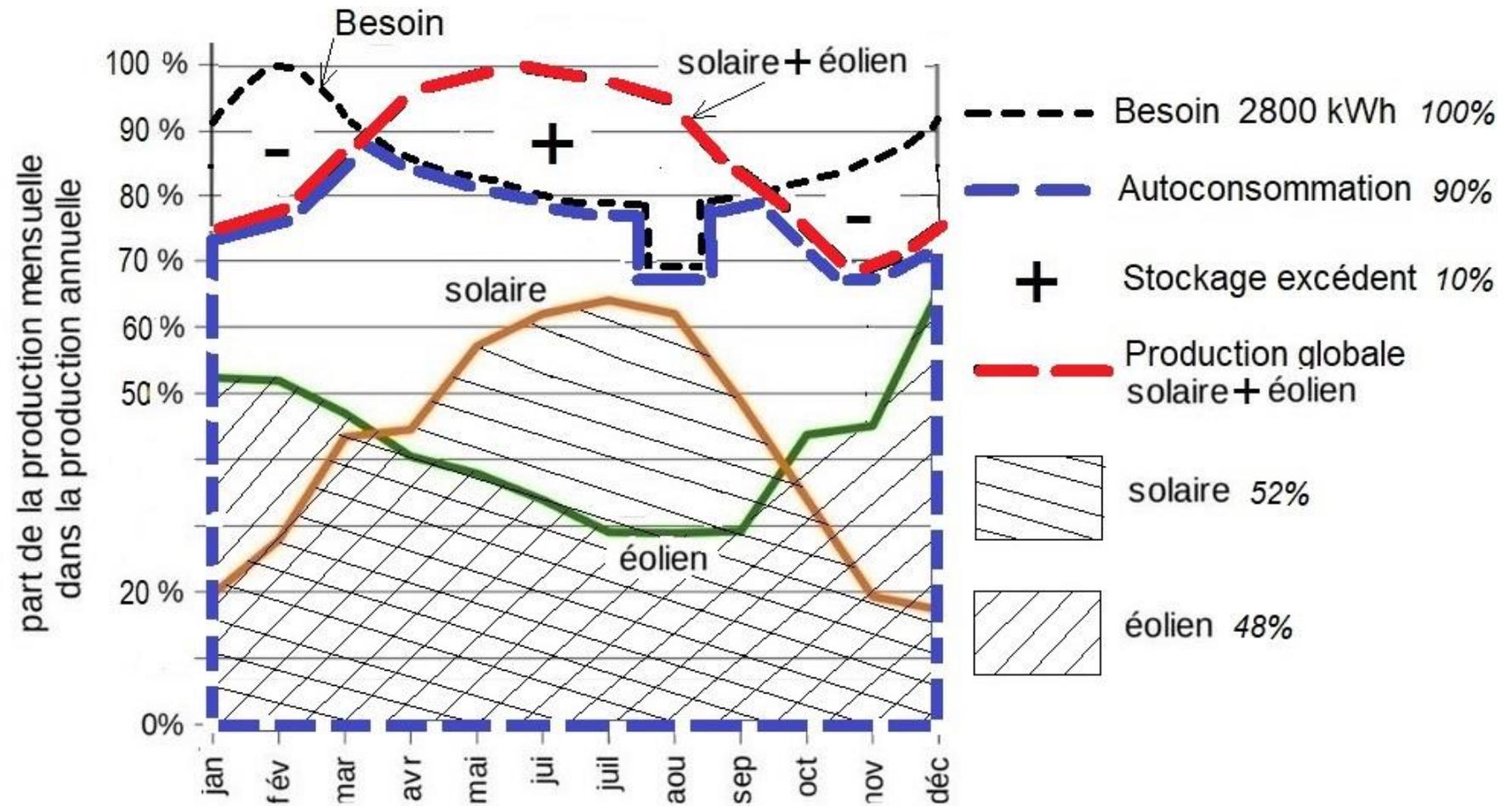
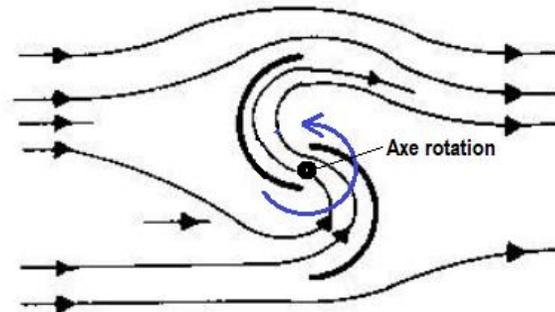
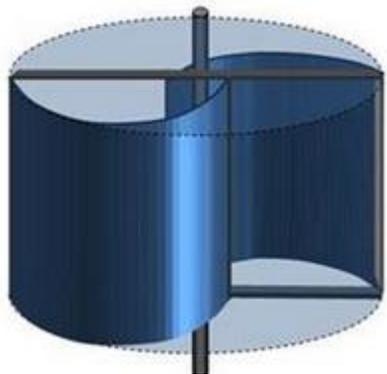


Figure 45



Eolien individuel?

Le soleil et le vent sont étroitement liés. Associer l'énergie du vent à celle du soleil comme envisage de le faire la start-up lilloise nommée *Unéole* avec ses éoliennes urbaines sera-t-elle une combinaison gagnante?. Elle a compris que pour être performante une éolienne urbaine doit être installée au minimum entre 15 et 20 m au-dessus du toit des immeubles pour éviter les turbulences et tenir compte des effets de parois (Voir page 33) Ces turbines *Unéole individuelle* de type Savonius à 3 étages à axe vertical de trois étages haute de 4 mètres et de 2 mètres de diamètre produirait environ 1.200 kWh par an pour un coût proche de 5.000 euros. Malgré les efforts du constructeur de simplification leur RSI risque bien d'être déraisonnable compte tenu du prix de revient du kWh des grosses *éoliennes tri-pale* Quoiqu'il en soit l'objectif du promoteur est de concevoir une machine urbaine plus silencieuse, moins encombrante, plus écologique que les classiques éoliennes tri-pales que l'on ne peut pas installer en milieu rural. Le résultat de ses recherches a débouché sur une turbine comportant plusieurs godets demi-cylindriques vrillés autour de l'axe de rotation. Le concept permettant ainsi une prise au vent continue. Va-t-on voir les éoliennes domestiques à axe vertical se multiplier sur les toits de nos habitations et des immeubles de bureaux ou d'appartements ? Vu les difficultés techniques en termes d'arrimage et de poids des fondations cela n'est pas pour autant garantie. Quant à la rentabilité le RSI de quelque avec le prix actuel de l'électricité à 15 centimes d'euro le kilowattheure semble bien long. L'idée du fabricant d'augmenter le rendement global en combinant l'éolienne à des panneaux photovoltaïques semble être a priori judicieuse puisque l'installation produira de l'énergie tant en hiver lorsque le zéphyr souffle, qu'en été lorsque le soleil darde ses rayons.



On peut imaginer et même concevoir un dispositif réalisé à titre individuel utilisant conjointement le soleil et le vent. Reste à démontrer qu'un tel système est recevable économiquement et utilisable simplement

Stockage de masse de l'électricité

Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP)
(Exemple [Grandmaison](#))

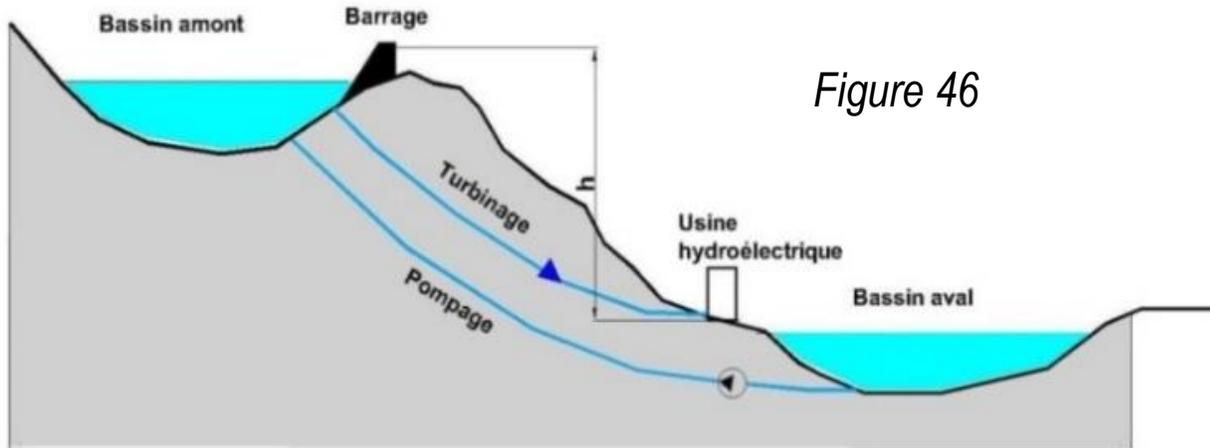


Figure 46

Voir STEP marine page 120

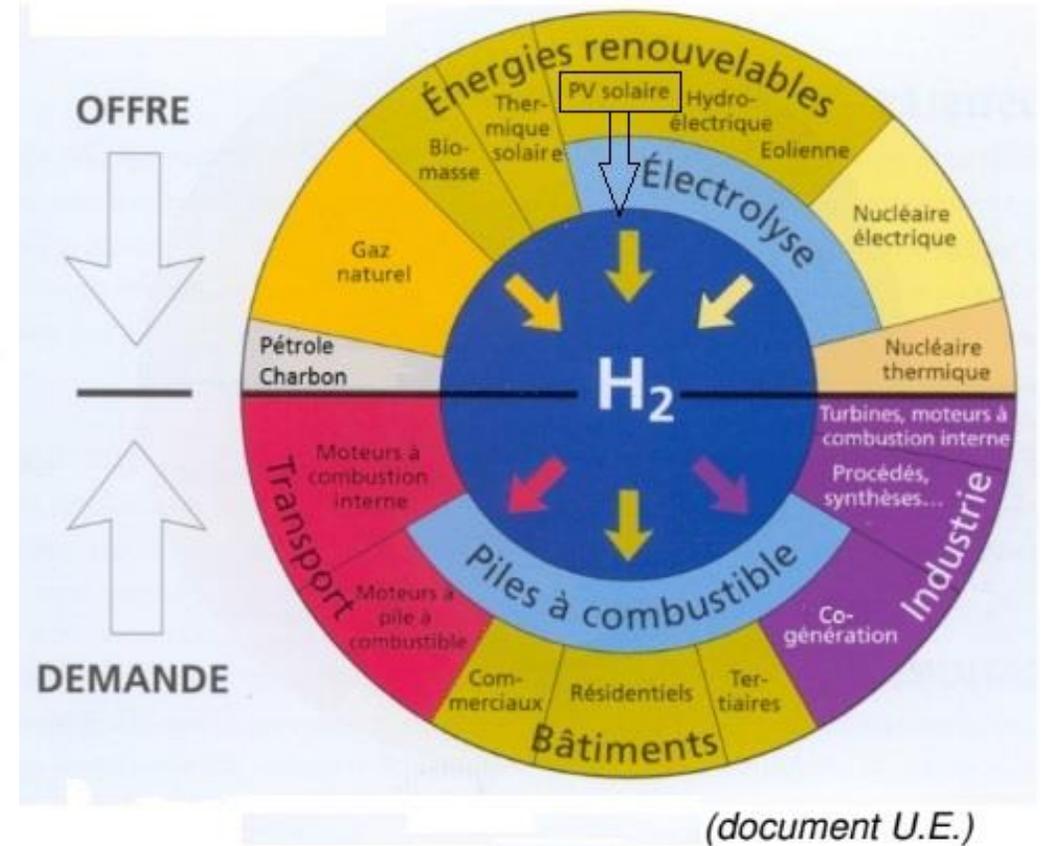


[Bio gaz](#) ? 30 kg de paille = 10 kWh elec



Batteries 10 kWh ?

Pile à combustible avec l'hydrogène
Un exemple : les taxis *Hype* conçus par Toyota



(document U.E.)

Figure 47

Figures 46 et 47

Dans l'état actuel des réalisations sur le plan mondial, les dispositifs de stockage de l'électricité pouvant emmagasiner les plus grosses quantités d'énergie sont les STEP (station de transfert d'énergie par pompage)

Il y a bien sûr les batteries pour les petites quantités d'énergie.

Une nouvelle chaîne énergétique utilisant la pile à combustible avec l'hydrogène pourrait bien se mettre en place dans les 2 décennies qui viennent pour solutionner le problème du stockage de masse de l'électricité.

Stockage thermal de l'énergie électrique ? ([Technique allemande](#))



Figure 48

Il n'est toutefois pas impossible qu'en complément de la pile à combustible se mette en place grâce aux technologies allemandes une voie consistant à utiliser le couple éolien-voltaïque pour réchauffer le sous-sol en été afin d'y récupérer de la chaleur en hiver

Et le nucléaire ?

Le nucléaire ce n'est pas seulement :

Les réacteurs nucléaires électrogène qui produisent de la chaleur pour produire de l'électricité. En France ce sont des réacteurs à eau pressurisée PWR d'origine USA . Le CEA a proposé des modifications en fonction des incidents. L'EPR est l'aboutissement de ce processus. L'ASN surveille la réalisation .

Les réacteurs à neutrons rapides à sel fondus sont des solutions voir CNRS Grenoble .

En France 80% de notre électricité est produite par des réacteurs pilotables de +/-30% en une ½ heure en adéquation avec la demande du réseau. Le principal combustible est l'uranium. Les ENR ne sont pas pilotables .

Accidents :la liste des accidents par niveaux de gravité voir Wikipédia et UNSCAR .

Le réacteur de Tchernobyl (MBK) est une machine soviétique difficile à piloter et l'accident a été traité à la soviétique . Un film l'explique . Les réacteurs de Fukushima a eau bouillante BWR . Une vidéo de l'ASN explique le déroulement de l'accident, les difficultés, les erreurs et les conséquences .

C'est aussi :

Le scientifique : c'est l'étude des composants du noyau des atomes: CERN,CEA, CNRS

Le militaire: « Si vous nous mettez en péril vous le paierez cher et vous serez en péril »

La datation par la mesure de la décroissance de la désintégration des noyaux : Carbone 14

Médical : radiothérapie, traçage, stérilisation, indicateur SIVERS, ...

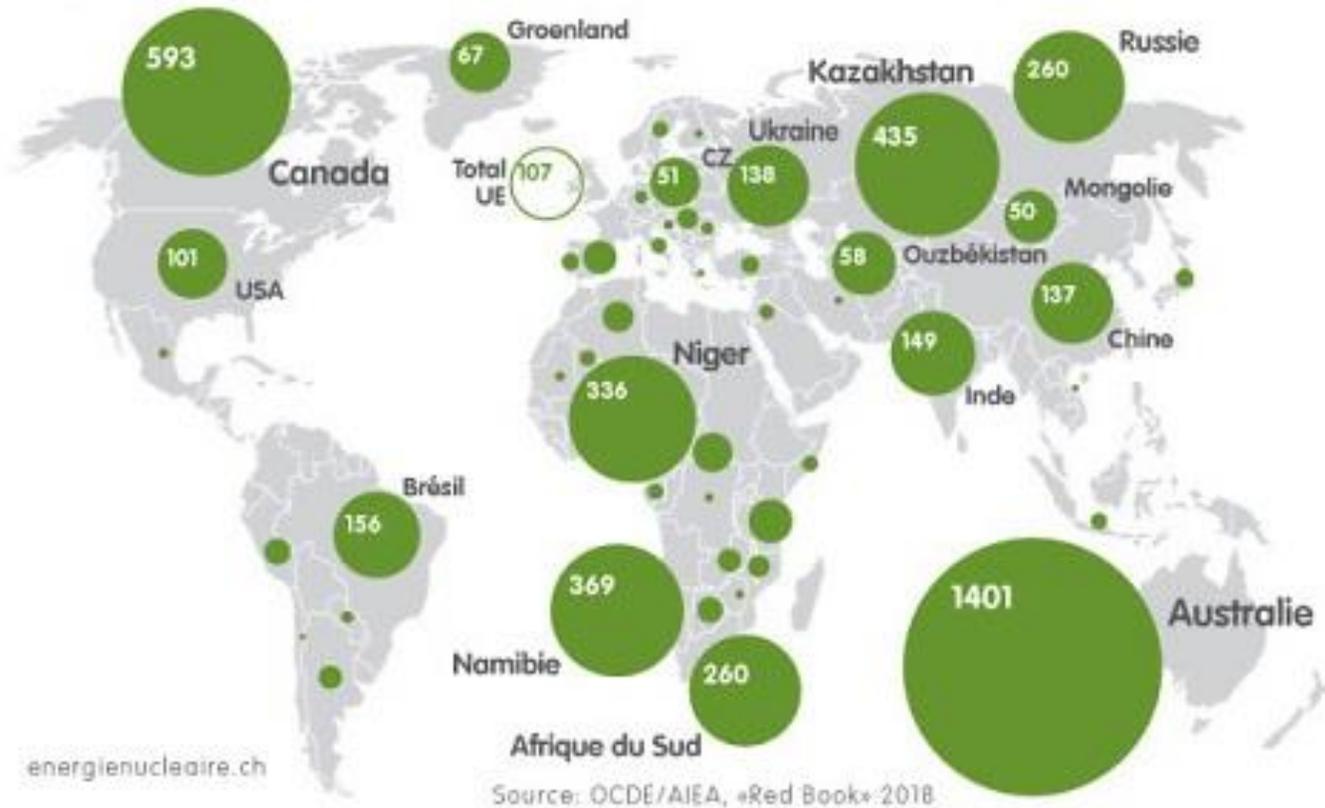
Le contrôle non destructif : voir à l'intérieur de la matière

La radioprotection : détecte les anomalies des rayonnements ionisants: ASN et IRSN

Heureusement pour l'emploi vu [les inconvénients des réacteurs nucléaires](#) pour produire l'électricité

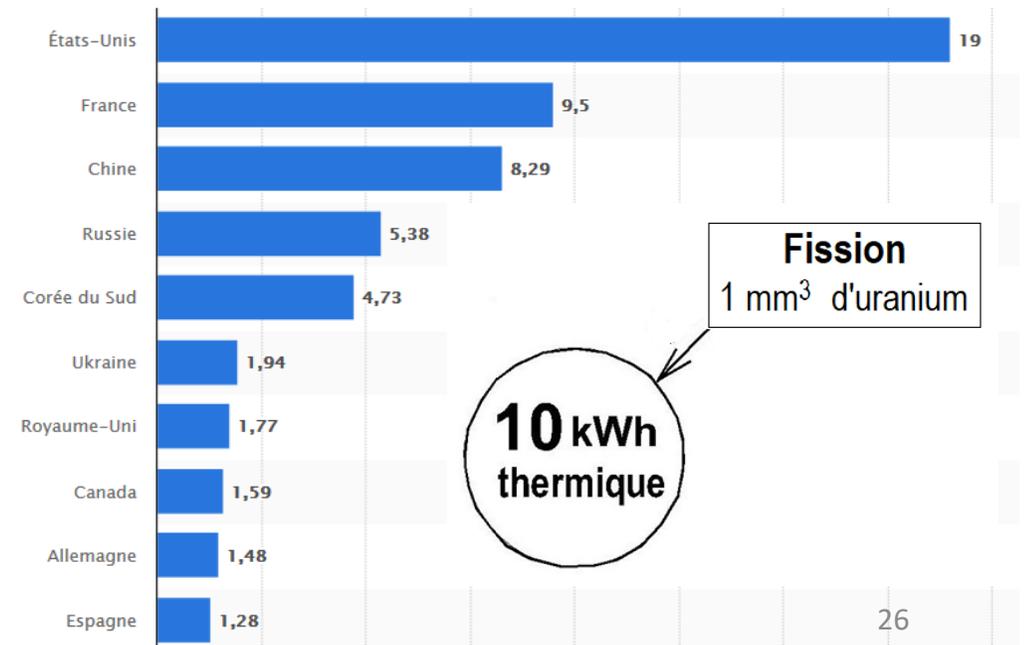
Et l'uranium ?

Réerves mondiales d'uranium en 2017
(en milliers de tonnes d'uranium)



	A	B	C	D	E	F	G	
1		Consommation			Réerves			
2		USA	19000		Australie	1400000		
3		France	9500		Canada	593000		
4		Chine	8290		Kazakhstan	435000		
5		Russie	5380		Namibie	369000		
6		Corée du sud	4730		Niger	336000		
7		Ukraine	1940		Russie	260000		
8		Royaume-Uni	1770		Afrique du sud	260000		
9		Canada	1590		Brésil	156000		
10		Allemagne	1480		Indes	149000		
11		Espagne	1280		Chine	137000		
12			54960 tonnes			4095000 tonnes		
13								
14		En durée si généralisation à la française						
15		France 9500 tonnes pour 60 millions d'habitants						
16		pour 7 milliards	1108333 tonnes :			3.7 ans		
17								

Classement des dix pays consommant le plus d'uranium dans le monde en 2017
(en milliers de tonnes)



Cette page visualise la consommation et les réserves mondiales d'uranium. Les réserves semblent importantes, un peu comme le charbon. L'uranium toutefois comme les produits fossiles est loin d'être inépuisable. Si tous les pays du monde consommaient par habitant autant d'uranium que la France, il y en a pour..... moins de 4 ans.

Densité de l'uranium 0,019 gramme par mm³

Pour éviter le « black-out » ou en d'autre terme une coupure de courant un réseau électrique doit toujours être en équilibre entre l'offre et la demande, c'est-à-dire entre la production et la consommation d'électricité. Pour garantir cet équilibre, y compris lors des pointes de consommation journalières et saisonnières, plusieurs solutions sont possibles :

- la plus coûteuse est celle qui consiste à accroître les moyens de production en construisant par exemple de nouvelles centrales dites "modulables" qui ne fonctionneront qu'un nombre limité d'heures par jour ou même par an lors des pics de consommation.

- la troisième alternative consiste, en cas de déséquilibre entre l'offre et la demande d'électricité, à réduire temporairement la consommation d'un site industriel par exemple ou d'un groupe de consommateurs. C'est ce qu'on appelle *l'effacement*. Également appelé « *gestion active de la consommation* », l'effacement permet donc de piloter à distance la consommation pour maintenir l'équilibre du réseau et garantir ainsi une tension constante, sans devoir recourir à des centrales "modulables" qui sont la plupart du temps alimentées par des combustibles fossiles. Centrales qui sont non seulement fortement émettrices de CO2, mais plus coûteuses pour l'utilisateur dans la mesure où elles sont sollicitées au moment où les prix du mégawattheure sont les plus élevés. Des marchés se mettent ainsi petit à petit en place principalement avec l'industrie. Il ne s'agit pas ici de se priver mais d'arrêter la fabrication des produits finis sur les chaînes de production lors des pointes de consommation et de l'accroître en bénéficiant d'un prix du mégawattheure plus attractif lorsque la demande en électricité est plus faible.

- Pour ce qui concerne notre continent l'Europe nous pouvons mettre en place des accords entre pays comme celui mis en place entre la Norvège et un pays plat comme le Danemark. Ceci pour assurer son approvisionnement en électricité lorsque le vent fait défaut. Où pour raisonner plus généralement approvisionner le pays en déficit d'énergie à partir d'un pays voisin qui produit plus que ses besoins propres



- multiplier les systèmes de stockage qui « emmagasinent » localement l'électricité lorsque la production excède la consommation et la restituer dans le cas contraire. C'est la solution que le bon sens nous recommande de mettre en place au sein de l'UE. L'Allemagne a annoncé mi 2020 son ambition de devenir le « fournisseur et producteur numéro 1 » d'hydrogène dans le monde. Quant à la France son ambition pourrait être de parvenir à concevoir en complément des trains à hydrogène (Alstom) des véhicules au sol type camion et cars ainsi que des avions neutres en carbone propulsés à l'hydrogène dès 2035 (Voir complément page 126).

La figure 47 représente ce vers quoi l'Europe à probablement intérêt à d'orienter pour solutionner le problème de stockage de masse de l'électricité. La pile à combustible qui peut générer à la fois chaleur et électricité grâce à l'hydrogène pourrait bien être un complément de chaîne énergétique au chauffage thermodynamique. Ceci pour aider les énergies renouvelables telles que le solaire voltaïque et l'éolien à assurer le chauffage de l'habitat au plus froid de l'hiver. Cette modification en profondeur de nos chaînes énergétiques actuelles serait bénéfique à notre environnement dans la mesure où elle rejette en effet de l'eau pour assurer son fonctionnement ce qui est nettement moins grave pour notre environnement que la combustion de l'essence du gazoil ou du kérosène qui rejette des gaz à effet de serre et des gaz brûlés dans l'atmosphère. Notre intérêt pour protéger nos écosystèmes est donc assurément de développer intensément la recherche afin d'améliorer ces technologies sur le long terme. La molécule de dihydrogène, composée de deux atomes d'hydrogène est en effet particulièrement énergétique : il faut savoir que la "combustion" d'un kg d'hydrogène libère environ 4 fois plus d'énergie qu'un kg d'essence, et ne produit que de l'eau en lieu et place des gaz brûlés. ...



Pour stocker un maximum d'hydrogène dans un volume restreint et à la pression atmosphérique l'hydrogène gazeux est transformé à l'état liquide en le refroidissant à très basse température (-253 degrés centigrade). Même à l'état liquide, l'hydrogène occupe cependant à masse égale un volume sensiblement 10 fois plus important que le kérosène. Cela pourrait inciter le secteur aéronautique à s'orienter vers la construction d'ailes volantes à profil épais pour pouvoir localiser le comburant (Voir page 115). Pour que ces nouvelles technologies puissent assurer les besoins en énergie de l'habitat et du transport il y a toutefois à cela au moins 3 conditions :

- obtenir un prix de l'hydrogène raisonnable et améliorer les technologies permettant de le stocker sous la forme la plus adaptée. Ceci sachant que le stockage de l'hydrogène est envisageable à l'état liquide et à la pression atmosphérique si on le maintient à très basse température ou à l'état gazeux et à la température ambiante en maintenant l'intérieur du réservoir sous pression (masse volumique 42 kg/m³ à 700 bar).
- ne pas se servir de la combustion des produits fossiles ²⁾ ([vaporeformage](#)) pour fabriquer cet hydrogène. Ceci en utilisant l'énergie solaire voltaïque pour assurer l'électrolyse de l'eau. Et ceci même si les performances de l'électrolyse ne sont pas très élevées. La fourniture de documents attestant l'origine de l'hydrogène achetée assurant qu'il s'agit bien d'hydrogène vert commence à se mettre en place. Le fait que la technique de production par électrolyse ne représente aujourd'hui en France que 1 % de l'hydrogène produit est la résultante d'une fiscalité inadaptée. Une fiscalité adaptée au besoin est à mettre en place qui fasse que l'hydrogène produit par vaporeformage du méthane soit plus onéreux que celui obtenu par électrolyse de l'eau.
- prendre conscience que pour être conservé à l'état liquide et à la pression atmosphérique, l'hydrogène doit être maintenu à une température de -250° C encore plus froide que celle du gaz naturel liquéfié (GNL) contenu dans les méthaniers qui est proche de -160° C. Cette température très basse impliquant que les citernes de stockage de l'hydrogène comportent un isolant thermique de grande qualité pour que l'hydrogène soit maintenue à l'état liquide dans de bonnes conditions

L'abandon du nucléaire et des produits fossiles vers ces nouvelles technologies est possible mais il faut prendre conscience que l'abandon des chaînes énergétiques actuelles ne se fera par la force des choses que progressivement. Cela va prendre du temps, une voir deux générations? Il faut se rendre à l'évidence que Paris ne s'est pas fait en un jour et qu'il y aura nécessairement une période transitoire pendant laquelle " l'hybride" à savoir l'association de l'électricité verte avec la combustion des produits fossiles va prendre place. Et ceci qu'il s'agisse du chauffage de l'habitat ou de la voiture individuelle. Il n'est pas irréaliste de penser pour les raisons évoquées ci-dessus que ces technologies se développent aussi dans l'aéronautique. Ceci étant donné qu'avec les long-courriers actuels la masse de kérosène étant équivalente à celle des passagers on peut imaginer tout l'intérêt qu'il y a de réduire la masse de combustible au profit du nombre de passagers. L'évolution de la chaîne énergétique utilisant les moteurs à hydrogène pourrait semble-t-il prendre 2 formes.

- soit un fonctionnement comme un moteur à combustion interne raccordé à un réservoir. Ceci en utilisant pour finir l'hydrogène comme combustible en lieu et place du kérosène, de l'essence ou du gasoil. Ce moteur devrait toutefois être revue et corrigée en diminuant son poids pour ce qui concerne l'aéronautique
- soit en passant par la pile à combustible qui présenterait pour le chauffage de l'habitat en hiver, l'avantage de générer non seulement de l'électricité mais aussi de l'énergie thermique.

- 1) *Il faut savoir que si la quantité d'énergie produite par la combustion d'un kg d'hydrogène liquéfié est presque 4 fois plus élevée que celle contenue dans un litre d'essence qui est proche de 10 kWh. Il faut aussi savoir que l'hydrogène étant un composant très léger le volume occupé par ce kg d'hydrogène liquide ayant une masse volumique proche de 70 kg/m³ est sensiblement 4 fois plus important que celui occupé par le kérosène*
- 2) *Cette solution pourrait toutefois être envisagée par les pouvoirs publics si la vaporisation est assurée avec capture du gaz carbonique.*

LIENS ET REALISATIONS dans les secteurs allant dans le sens du moteur à hydrogène

La première réalisation qui vient à l'esprit est associé à [l'histoire de la voiture individuelle](#) et à la 1^{ère} action résultant des accords de Paris sur le climat de fin novembre 2015: le taxi français hype construit avec l'aide des japonais. Il faut aussi citer dès à présent dans le secteur le plus en amont: celui de la FABRICATION d'HYDROGENE par électrolyse, la Vendée française qui va montrer l'exemple de l'hydrogène vert obtenue par électrolyse de l'eau. L'entreprise nantaise [L'hyphe](#) a annoncé mi janvier 2020 avoir levé 8 millions d'euros de fonds pour installer en Vendée un premier site industriel de production d'hydrogène vert, qui sera opérationnel dès le premier semestre 2021. Le site devrait produire à terme de plusieurs centaines de kilos d'hydrogène issue d'une électricité d'origine renouvelables (éolien, photovoltaïque, hydraulique ..) . Une première station à hydrogène installée à La Roche-sur-Yon alimentera une première ligne de bus et des véhicules de la collectivité (bennes à ordures ménagères).

[FONCTIONNEMENT](#), [PRIX](#) , BUS [à Pau, dans le nord de la France](#), VOITURE, [Renault \(hybride\)](#)., CHAUFFAGE BATIMENT à ma connaissance aucune réalisation sauf en Allemagne ([Viessmann](#)), TRAIN Alstom en Allemagne, [AVIATION](#)

B Géothermie

Tête de forage du doublet géothermique



```
DOSBox 0.74-2, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: LIN

<ENTREES>

diamètre intérieur de la tuyauterie= 200 mm
débit= 5000 l/mn
viscosité du fluide= .5 centistokes
longueur de la tuyauterie= 250 m
densité du fluide= 850 kg/m3
nombres de coudes à 90°...= 0
nombres de coudes arrondis= 2

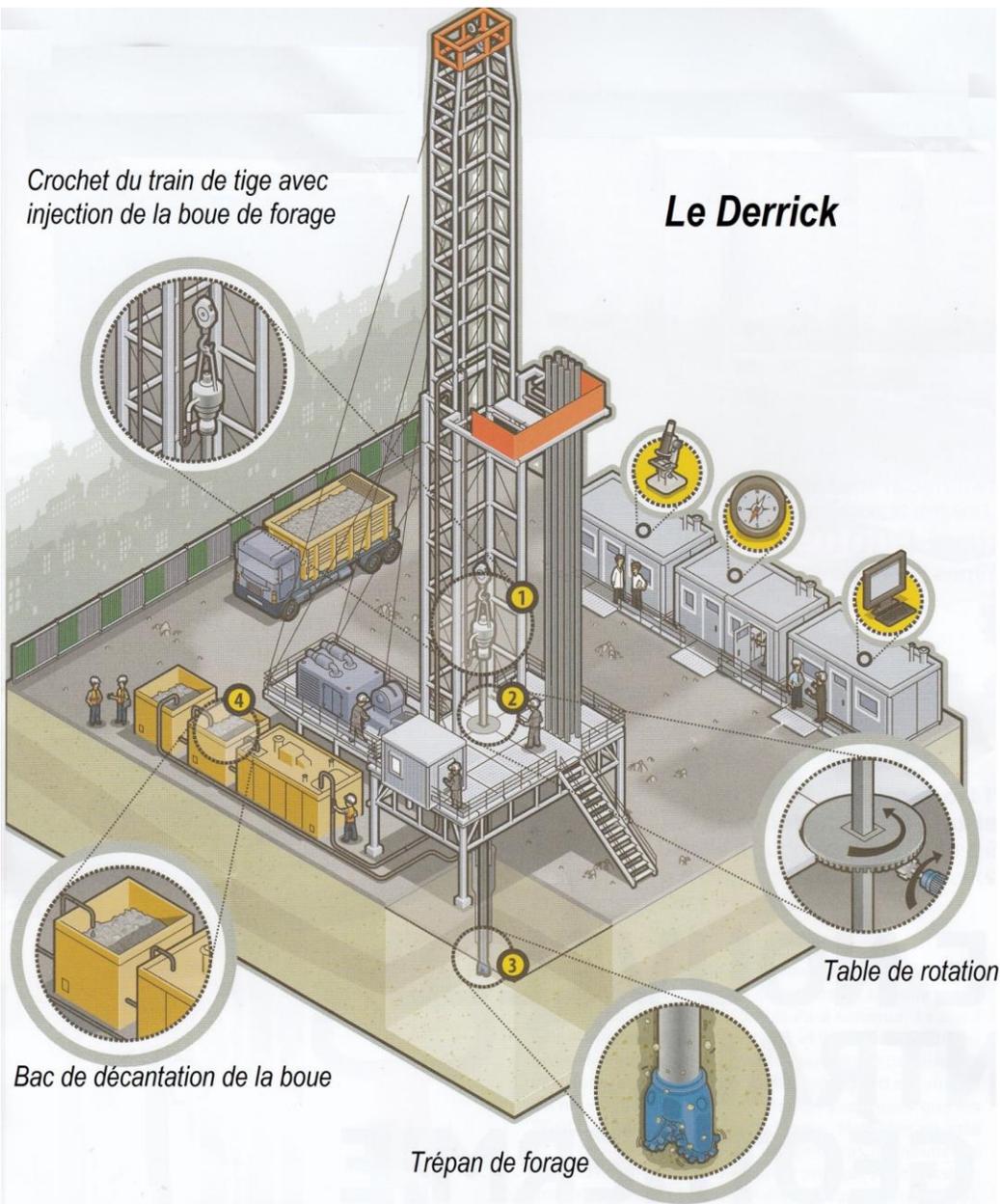
<SORTIES>

vitesse du fluide= 2.641966 m/s
écoulement turbulent
nombre de reynolds= 1056786
longueur équivalente totale= 258 mètres
perte de charge totale= .7543159 bar

puissance perdue= 6.166532 kw

voulez-vous imprimer le résultat sur votre imprimante?
```

Un débit Q de 300 m³/h avec une chute de température ΔT de 50°
c'est une puissance thermique P disponible pour votre région de
 $P = 1,16 \times Q \times \Delta T = 17400 \text{ kW}$



Construire une centrale géothermique un projet d'ampleur

La réalisation d'une centrale de géothermie passe par de nombreuses étapes. On analyse tout d'abord le contexte local, densité de logements, volonté des élus locaux puis on réalise les études techniques et économiques. Commence ensuite les démarches administratives demande de permis de forer, étude d'impact environnemental, enquête publique. Enfin on passe à la réalisation avec le forage depuis la construction de la centrale le déploiement du réseau et la création des sous-stations la réalisation d'un tel projet prend plusieurs années

Le principe du forage Rotary

Avant de construire la centrale de géothermie en surface il faut forer le puits de production qui permet de pomper l'eau chaude et le puits de réinjection qui renvoi l'eau refroidi dans la nappe d'origine: c'est le doublet géothermal. Les puits sont forés selon une technique éprouvée issue de l'industrie pétrolière: le forage Rotary. Le trépan fixé à l'extrémité d'un train de tige est suspendu à un derrick pendant que les tiges tournent sur elle-même. Les trois roues dentées du trépan sont entraînées par la pression de la boue de forage injectée par l'intérieur du train de tige. L'ensemble grignote ainsi la roche lentement la boue remonte les résidus de forage par la périphérie du train de tiges. Elle est ensuite filtrée puis réinjectée en circuit fermé. Le train de tige est allongée au fil de l'avancement plusieurs diamètre de forage sont utilisés successivement en allant du plus gros vers le plus petit (26" à 9"). A chaque changement de diamètre les tubes sont scellés dans le puit formant alors sa structure interne. Lors du forage les deux puits peuvent être déviés progressivement vers l'horizontal grâce à la technologie issue du gaz de schiste aux USA jusqu'à ce que chaque extrémité soit éloigné d'environ 1500 m de telle sorte que l'eau de rejet ne viennent pas tiédir l'eau géothermale

L'eau géothermale en Ile de France

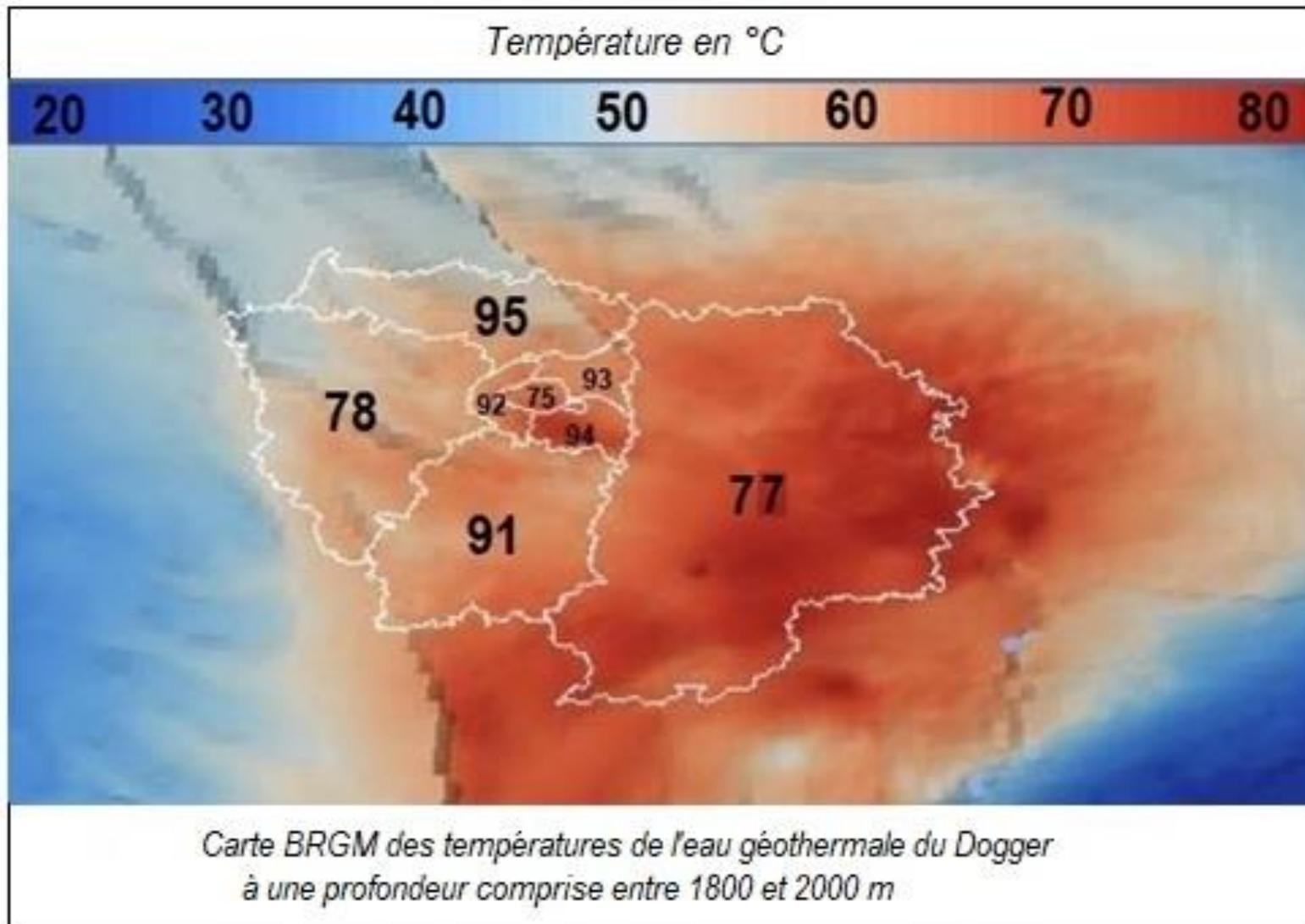
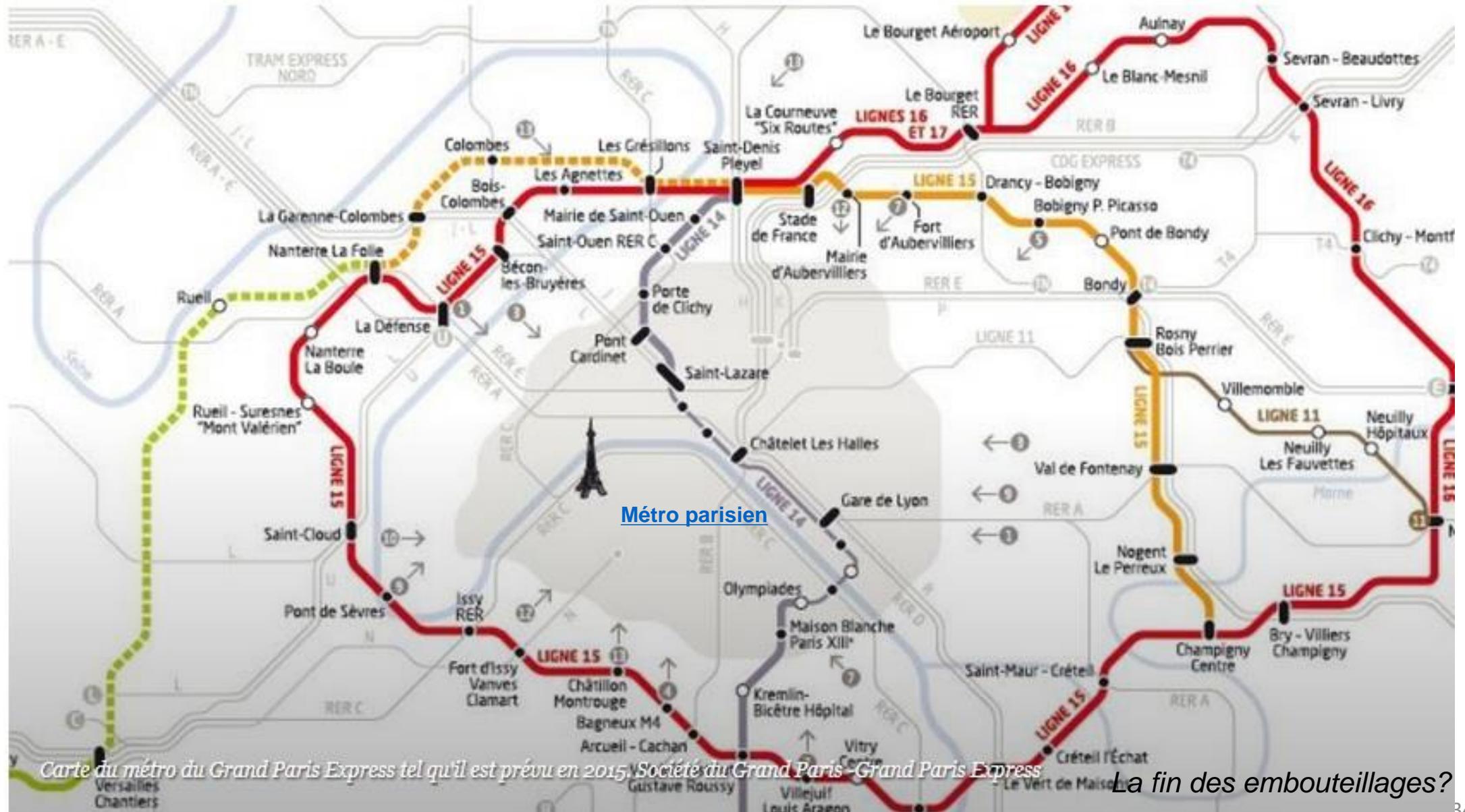


Figure 59

La région parisienne
commence à tirer profit de
l'eau géothermale

[Villejuif](#)

Le "Grand Paris" des transports



La fin des embouteillages?

Plan du réseau d'assainissement parisien



Historique des égouts de Paris

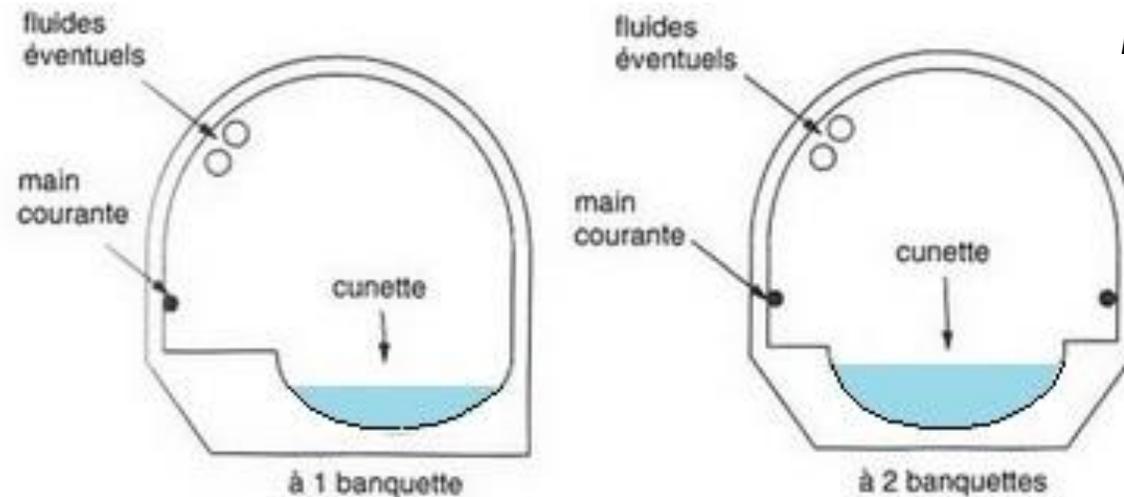
Les réseaux d'eau sous-terrain et les égouts de Paris Voir détails page 89

Le sous-sol Parisien abrite en plus du métro ancien et de celui du « grand Paris » à venir deux réseaux ambrionnaires de chauffage urbain. L'un associé à la combustion des ordures et l'autre de villejuif utilisant uniquement l'eau géothermale. A ces liaisons souterraines s'ajoute 3 réseaux d'eau distincts : 2 réseaux d'eau l'un d'eau potable, l'autre d'eau non potable avec un réseau d'assainissement et de drainage. Ce dernier, constituant les égouts de Paris est long de 2 500 km et a pour fonction de collecter et d'évacuer la pluviométrie ainsi que les eaux usées produites par les différentes activités humaines des parisiens. Souvent décrits comme un lieu obscur et nauséabond (notamment dans « Les Misérables » où Jean Valjean se perd en 1832), les égouts de Paris ont fortement évolués depuis les travaux entrepris par le préfet Haussmann et l'ingénieur Eugène Belgrand, tous deux à l'origine du réseau contemporain. Sous leur impulsion, toutes les rues de la capitale ont en effet été doublées d'une galerie en sous-sol, faisant alors de Paris l'une des villes les plus modernes au monde à ce sujet.

L'ensemble des égouts de Paris du type gravitaire permettent d'évacuer vers la Seine un débit important proche de 300 m³/s correspondant à la pluviométrie d'une violent orage. Ils sont interconnectés selon la hiérarchie suivante:

1. branchements particuliers de chaque immeuble,
2. égouts élémentaires de 1,30 m de large sous chaque rue,
3. collecteurs secondaires de 3 m de large avec cunette de 1,20 m
4. collecteurs principaux de 5 à 6 m de large avec cunette de 3,50 m, en général sous les boulevards ([photos](#))

Ceci sans compter les émissaires (égouts ronds de 2,50 à 6 m de diamètre, non visitables qui transportant les eaux usées vers les stations d'épuration)



Les 46 réalisations de géothermie sur l'IDF en 2017

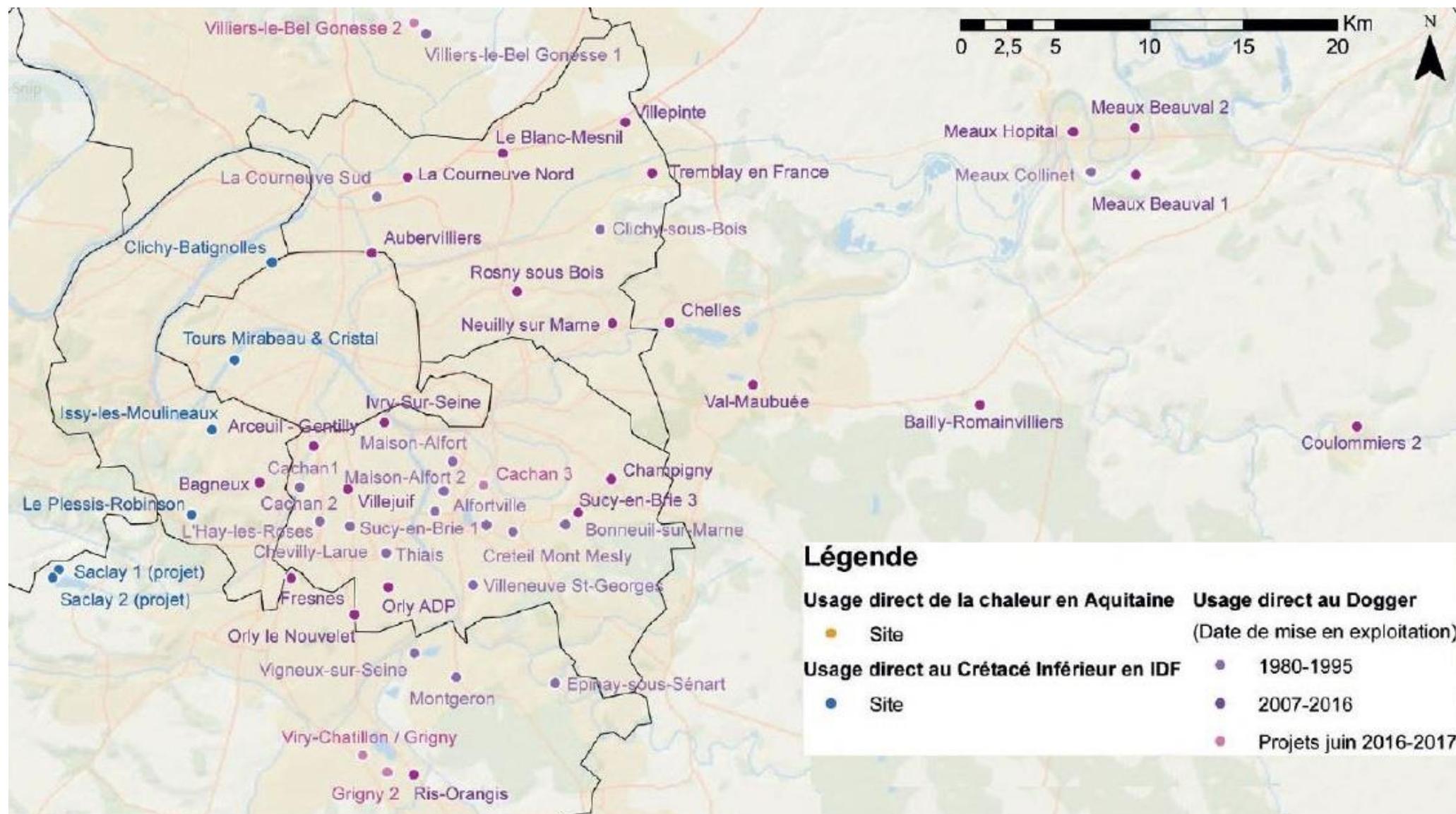




figure 60

Boulogne Billancourt 92100 point de départ de la SWE ?

La Seine qui entoure Boulogne Billancourt est une opportunité qu'il serait dommage de ne pas saisir. Il faut espérer que les boulonnais vont prendre conscience que 3 doublets géothermiques DG1 à 3 (petits cercles blancs) devraient être suffisants pour assurer le chauffage de leur commune moyennant l'apport thermique de la Seine. Ceci en implantant 3 stations de pompage SP1 à SP3 à l'emplacement de ces 3 doublets géothermiques pour assurer la distribution d'un réseau d'eau non potable à la température de 15° (gros points noirs). Cette commune pourrait ainsi disposer à moindre coût d'une énergie thermique annuelle voisine de $3 \times 14\,000 \times 8760 = 368\,000\,000$ kWh pour une température moyenne de la Seine variant entre 5 et 15°.

La population de cette commune étant selon l'INSEE de 117 282 habitants avec une densité de population proche de celle de Paris intramuros cela correspond sensiblement à 3 150 kWh thermique par habitant proche du nouveau besoin de 3600 kWh (voir figure 15 page 25). Ces travaux permettraient de généraliser le chauffage urbain pour l'habitat existant dans cette commune moyennant une amélioration (après accord du BRGM) du débit d'eau chaude géothermique qui a été limité par sécurité à 200 m³/h par doublet. Ceci sans desservir les habitants d'Issy les Moulineaux des avantages de leur centrale de combustion des ordures. De tels travaux aurait pu être mieux contrôlés que ne l'a fait jusqu'ici l'entreprise française IDEX qui a déjà réalisé à proximité d'Issy les Moulineaux un début de réseau ayant permis à quelques habitants de Boulogne situés coté Issy les Moulineaux de bénéficier des avantages du chauffage urbain. Il est clair que si cette commune de raisonne dans le sens de l'intérêt général elle a intérêt à s'équiper d'un réseau hydraulique conforme à celui décrit aux pages 43 et 44.

Pour mémoire Boulogne Billancourt c'est:

Population 117 282 habitants (source : INSEE) sur une surface de 6,2 km² (6 200 000 m²).
 Soit une densité de population de 17 662 habitants au km²
 Cela revient à dire que chaque boulonnais occupe une surface au sol voisine de 50m² comme celle de Paris intra muros .

La "Solar Water Economy" dans Paris et sa banlieue?

Les chiffres prouvent que le potentiel énergétique naturel du dogger et de la Seine confondues devraient nous permettre de réussir notre transition énergétique en région IDF. Ceci malgré une concentration urbaine particulièrement dense. Comme l'explique Jean-Marc Jancovici, il est exact que l'énergie thermique contenue à l'état latent dans un litre de pétrole, voisine de 10 kWh, est beaucoup plus importante que celle contenue dans un litre d'eau lorsque sa température varie de 10 degrés. (Dans la pratique mille fois plus importante). Ceci dans la mesure où il faut, compte tenu de la chaleur spécifique de l'eau une énergie sensiblement équivalente de 10 kWh pour élever un mètre cube d'eau de 10 degrés. Ce qu'il est important de réaliser c'est qu'avec un débit moyen de 300 m³/s un fleuve comme la Seine charrie en une heure environ un million de mètres cubes d'eau (3 600 x 300). Ceci de telle sorte que si l'on refroidit ce volume de 10 degrés en hiver on dispose en une heure d'une énergie thermique pour chauffer l'habitat égale à 10 millions de kWh ce qui correspond, vu la population de 10 millions d'habitants pour Paris et sa banlieue, à une puissance disponible de 1 kW pour chaque Parisien et une énergie thermique disponible annuellement de 8760 kWh ce qui est suffisant en terme de potentiel par rapport au besoin de 6800 évoqué à la page 15 de la page 25. Pour information une déperdition de 200 kWh par m² habitable qui correspond sensiblement à l'habitat parisien existant mal isolé, on arrive à une surface habitable par habitant supérieure à 40 m² ce qui n'est pas négligeable.

En mettant en place un chauffage thermodynamique échangeant sur l'eau avec un modeste COP de 5 et n'utilisant que 80% du potentiel naturel, la consommation annuelle en énergie finale électrique serait limitée à environ 1400 kWh/ habitant. Une consommation électrique sensiblement deux fois plus faible par rapport à ce qu'elle est actuellement en France (Voir figure 27 page 39 pour compréhension), et ceci sans faire appel à la combustion des produits fossiles. Une diminution de consommation en énergie électrique à ce point significative par rapport à ce qu'elle est actuellement qu'elle laisserait suffisamment d'électricité disponible pour alimenter la voiture hybride rechargeable. Les chiffres qui précèdent relèvent de l'essentiel étant donné que la Seine n'est pas toujours à 10 degrés comme l'est la nappe libre en communication avec elle. À l'heure des télérelevés, il est surprenant qu'aucune information sur internet sur la façon dont la température de la Seine varie actuellement au cours de l'année calendaire ne soit disponible. Quoiqu'il en soit lorsqu'elle est à 5 degrés ou un peu moins au plus froid d'un hiver rigoureux son potentiel ENR pour le chauffage thermodynamique est nul. On a vu heureusement (pages 44 et 45) que les deux potentiels *eau superficielle* / *eau géothermale* peuvent être ajoutés l'un à l'autre avec les échangeurs à plaques. Ceci avec le fait que et la chaufferie hybride peut aussi venir au secours du chauffage thermodynamique pour assurer le confort.

Nota Avec 20 000 habitants au km² chaque parisien ne dispose que de 50 m² au sol ce qui n'est pas grand-chose. On pourrait justement estimer qu'un doublet géothermique, qui nécessite une surface au sol voisine de 2 km² serait bien incapable d'assurer le besoin de 40 000 citoyens. Ceci par le fait qu'en fournissant un débit d'eau de 300 m³/h à 70 degrés cette dernière étant rejetée à 20 degrés dans le puits de rejet, la puissance disponible par parisien est limitée à 0,375 kW (300 x 50)/40 000). Il faudra bien sûr concevoir des échangeurs à plaques adaptés au besoin mais cela devrait être plus simple que de mettre l'EPR de Flamanville en production. La conservation de l'énergie nous apprend que si la Seine est à 5 degrés les pompes à chaleur situées en aval pourraient tout de même disposer d'un débit d'eau à 15 degrés de 1500 m³/h diminuant d'autant la consommation en gaz lorsque la chaufferie hybride fonctionne en mode combustion au plus froid de l'hiver. Paris ne s'est pas fait en un jour et l'on ne peut pas tout faire d'un coup mais probablement découvriront nous qu'il y a d'autres moyens d'élever la température sur le réseau d'alimentation des évaporateurs pour améliorer les performances des pompes à chaleur et la puissance disponible. Ceci par exemple en utilisant la combustion des ordures ou en tenant compte du fait que les piles à combustible génèrent aussi de la chaleur en complément de l'électricité.