

1 L'eau

- 11 L'eau sur terre

L'eau (H₂O), composée d'hydrogène et d'oxygène, fait partie intégrante de notre vie. Bien que le volume d'eau douce sur terre ne représente qu'une infime partie du volume total de la terre, le [potentiel d'énergie thermique renouvelable](#) mis à la disposition de l'homme à l'intérieur des terres habitées par ses rivières, ses lacs et l'eau contenue dans le sous-sol est le plus souvent supérieur à ses besoins thermiques. On imagine le potentiel thermique naturel mis à notre disposition si l'on ajoute le potentiel de l'eau de mer qui gèle à seulement -2°C environ en raison de sa salinité moyenne de 35 grammes de sel par litre d'eau.

L'eau est en effet un formidable véhicule thermique et l'on va progressivement examiner comment des paramètres tels que sa conductivité, sa chaleur spécifique, sa chaleur latente de fusion (fonte de la glace) sont des [sources potentielles d'espoir](#) qui permettront à Homo sapiens de mieux comprendre le fragile équilibre des forces de la nature, de dominer le gâchis énergétique actuel et de passer le cap de la transition énergétique.

Des organismes de recherche basés à Las Vegas et en Suisse mettent actuellement au point des dispositifs capables de capter l'eau contenue dans l'air pour assurer notre besoin en eau douce. Facteur favorable, la quantité de vapeur d'eau douce résultant de l'évaporation dans l'atmosphère des étendues d'eau liquide à la surface de notre planète va encore augmenter en raison du réchauffement climatique ce qui va permettre d'assurer le besoin dans les régions mondiales en manque d'eau.

Les dimensions de la terre

- Les longueurs : Rayon $R = 6371 \text{ km}$ Circonférence (le tour de la terre) $2\pi R = 40\,075 \text{ km}$

- Les surfaces :

total terre + mer $S = 4\pi R^2 = 510 \text{ millions de km}^2$

 dont 357 millions de km² mer (70%)

 et 153 millions de km² terre (30%)

Une surface terre qui se répartit de la façon suivante :

- 30% forêt et 35% agriculture (partie dégradée incluse), le solde se répartissant entre les villes, les surfaces militaires et l'industrie.

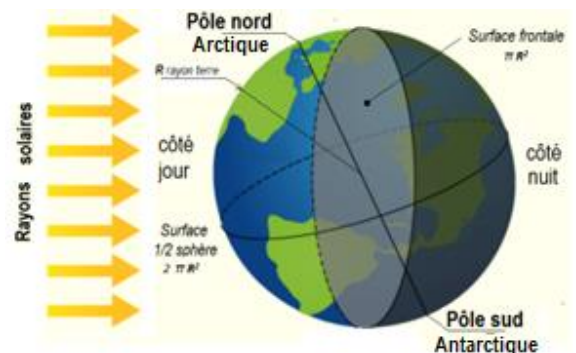
frontale $\pi R^2 = \pi \times 6371^2 = 127 \text{ millions de km}^2$

- Les volumes : total terre + mer $V = \frac{4}{3}\pi R^3 = 1083 \text{ milliards de km}^3$ dont "seulement" 1,4 milliard de km³ d'eau de mer. La teneur en uranium des océans est extrêmement faible mais compte tenu de leurs volumes considérables ils contiendraient près de mille fois plus d'uranium que les gisements conventionnels évoqués au chapitre nucléaire du paragraphe 3.

Comme tout corps physique, l'eau se dilate lorsque sa température augmente.

[Un océan pour la vie](#)

[Et si l'on s'enfonçait dans le sous-sol](#)



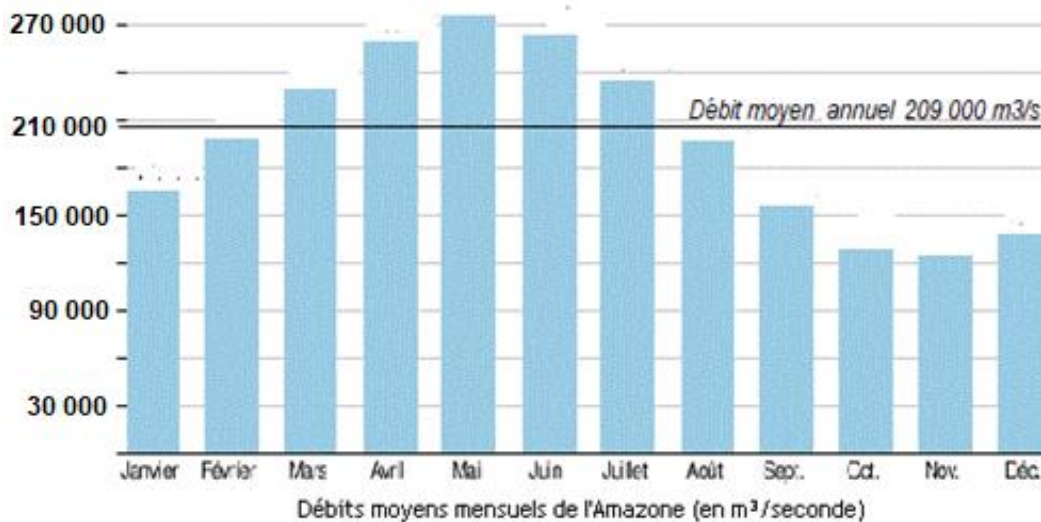
Le fleuve Amazone

Difficile d'évoquer l'eau douce sur terre sans mettre en lumière ce très grand fleuve

Avec ses 7 millions de km², l'immense bassin de l'Amazone a une surface sensiblement égale à 14 fois celle de la France métropolitaine. Ce fleuve qui prend sa source au Pérou dans la cordillère des Andes (Río Mantaro) est avec sa longueur de 6 992 km le plus long fleuve au monde. Il traverse la Colombie et le Brésil dans des zones pratiquement inhabitées ce qui explique en partie la raison pour laquelle il n'y a aucun pont. Il faut dire aussi que la largeur de ce fleuve, sa profondeur, sa puissance, la multitude d'îles et de bras fluviaux, les berges inondées plusieurs mois par an et remodelées à chaque crue constituent un véritable défi d'ingénierie.



Le fleuve Amazone est en effet sujet au fil des saisons à de grosses variations de profondeur et de largeur. Cette dernière, entre 3,2 et 9,7 km pendant la saison sèche (entre juin et novembre) peut passer à une cinquantaine de km pendant la saison des pluies (décembre à avril), et ceci avec un niveau de l'eau qui peut être 15 mètres plus haut qu'il ne l'est en saison sèche. On imagine dans ces conditions les difficultés techniques et logistiques ainsi que les investissements financiers qui seraient associées à la construction de ponts.



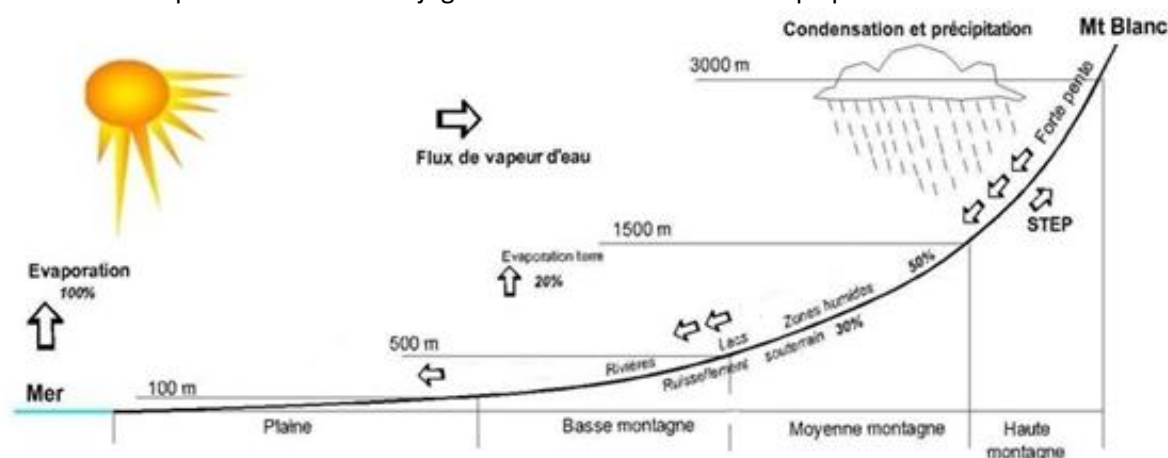
Il suffit d'observer la puissance thermique mise à disposition d'Homo sapiens par le fleuve Amazone à son embouchure pour se convaincre des puissances que la nature met à notre disposition. Ceci compte tenu de son débit moyen de 200 000 m³/s et le fait que l'on récupère environ 1 kWh en abaissant un mètre cube d'eau de 1 degré centigrade.

Ainsi, pour transporter les marchandises et les personnes, le bateau reste la meilleure solution dans le bassin du fleuve. Le fleuve Amazone est considéré à ce sujet comme l'une des voies navigables les plus importantes de la planète. Il faut dire aussi qu'il est, avec un débit moyen annuel proche de 209 000 m³/s le fleuve le plus puissant au monde. La vie de la population rurale qui s'abrite le long de ses berges est rythmée par la crue et la décrue annuelle du fleuve. Il se jette dans l'océan Atlantique au nord du Brésil.

*Il n'y aura pas de sécurité climatique dans le monde sans une Amazonie protégée
Lula (Nouveau président brésilien)*

- Le cycle évaporation-condensation de l'eau

Au moment du réchauffement climatique l'évaporation de l'eau à la surface du corps peut être source de bien-être. Le cycle naturel évaporation-condensation de l'eau de mer est lui extrêmement important pour le devenir de l'homme. Ce cycle naturel assure en effet son approvisionnement en eau douce potable et permet de comprendre pourquoi la température moyenne à la surface de la terre qui devrait être de -19°C , vu son éloignement par rapport au soleil, est beaucoup plus clémente. Le Français de l'hexagone qui dispose en moyenne d'une surface au sol d'environ 8500 m^2 et d'une hauteur de précipitation voisine de 800 mm bénéficie de cet approvisionnement naturel. La France métropolitaine est en effet avec ses 65 millions d'habitants et sa surface de $550\,000\text{ km}^2$ un des pays européens où la densité démographique est la plus faible. Le généreux cycle de l'eau met ainsi annuellement à la disposition de chacun d'entre nous sur cette surface de $8\,500\text{ m}^2$ environ 20 m^3 d'eau par jour. Le besoin en eau n'est cependant pas satisfait en permanence sur tout notre territoire en raison de l'irrégularité des précipitations et de la densité démographique comme on va bientôt le voir. Dans une métropole comme Paris avec une densité démographique de $20\,000$ citadins par km^2 , le parisien ne dispose que de 50 m^2 au sol. Ce sont alors les eaux souterraines potables ou non conjuguées avec celles de la Seine qui peuvent subvenir à ses besoins.



Il résulte du cycle naturel évaporation-condensation de l'eau que de la vapeur d'eau est contenue dans l'atmosphère. Cette vapeur d'eau se comporte comme un gaz naturel responsable des deux tiers de l'effet de serre. Cet effet de serre, qui retient l'énergie réfléchiée par la terre principalement sur sa face cachée du soleil, est la raison pour laquelle la température moyenne à la surface de la terre qui devrait être de -19°C est clémente et de l'ordre de $+15^{\circ}\text{C}$.

Avec un air bien sec qui favorise l'évaporation, la température ne devient dangereuse pour le corps humain qu'à partir de 45°C . Par contre, un air très humide qui empêche l'évaporation devient dangereux dès que la température ambiante se rapproche des 37°C du corps humain.



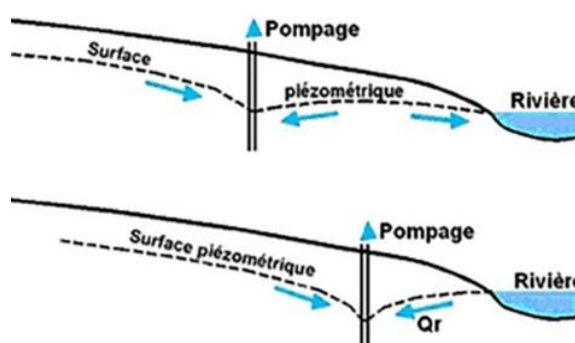
- Les nappes libres et captives

Le cycle naturel de l'eau ce n'est pas seulement les ruissellements de surface et l'eau contenue dans le lit des rivières et des fleuves. C'est aussi l'eau qui s'infiltré dans le proche sous-sol en restant en communication avec la rivière. Cette nappe d'eau, dite libre, s'écoule elle aussi comme la rivière vers la mer mais beaucoup plus lentement qu'elle comme cela a été expliqué par [Darcy](#). Mais il n'y a pas sur terre que ces eaux superficielles. L'eau s'infiltré ou s'est infiltrée il y a longtemps dans notre sous-sol profond. On parle alors de nappes captives qui sont parfois emprisonnées entre deux couches de terrain imperméable. Cette eau géothermale, emprisonnée dans les couches profondes de l'écorce

terrestre, bénéficie de la chaleur interne du sous-sol due à la radioactivité du magma en fusion sous la croûte terrestre. Elle est l'occasion d'évoquer les différentes [formes d'énergie](#) disponible sur notre planète. Les quantités d'énergie thermique contenues dans l'eau chaude géothermale des nappes captives profondes telles que le dogger parisien n'émergent pas en surface comme celle de *Chaudes-Aigues*. Leur potentiel énergétique, inférieur à celui des eaux superficielles de ruissellement est cependant loin d'être négligeable à l'échelle de nos besoins en chaleur. Elles pourraient être du même ordre de grandeur que celles issues des réseaux de chaleur basés sur la combustion des ordures actuellement en exploitation en Allemagne, en Suisse et à moindre échelle en France.

- Le ruissellement de surface

La figure ci-contre permet de comprendre la notion de surface piézométrique qui donne une idée de la profondeur de forage nécessaire pour exploiter par pompage les eaux contenues dans [les nappes libres](#) en communication avec la rivière et qui s'écoulent comme elle vers la mer mais beaucoup plus lentement. Ces nappes peuvent assurer les besoins en arrosage de l'agriculture ou être exploitées pour la chaleur spécifique de l'eau et permettre la climatisation de l'habitat. Dans ce dernier cas il est prévu un rejet qui doit être situé en aval.



- L'eau douce en France métropolitaine

Un Français boit en moyenne 1,5 litre d'eau et consomme environ 150 litres d'eau sanitaire par jour, ce dernier volume comprenant environ 50 litres d'eau chaude. Son besoin en eau non potable pour assurer le chauffage de son habitat avec un chauffage thermodynamique aquathermique et une chute de température de 10°C à la source froide est quant à lui nettement plus important. On verra par la suite qu'il est en effet de l'ordre de 2 m³ par jour. Ceci avec un potentiel naturel voisin de 3 m³ par jour en région parisienne compte tenu du débit moyen de la Seine et des 12 millions d'habitants qui peuplent la région IDF. Compte tenu de la chaleur spécifique de l'eau, on verra que l'énergie thermique journalière moyenne de 30 kWh qui en résulte pour un différentiel de 10 degrés, c'est environ 10 300 kWh disponibles annuellement s'il n'y avait la variation de température dans le fleuve au cours de l'année calendaire.

Quant au généreux cycle de l'eau de l'hexagone français, il met annuellement en moyenne à la disposition de chacun d'entre nous un volume d'eau heureusement beaucoup plus important. Ceci compte tenu :

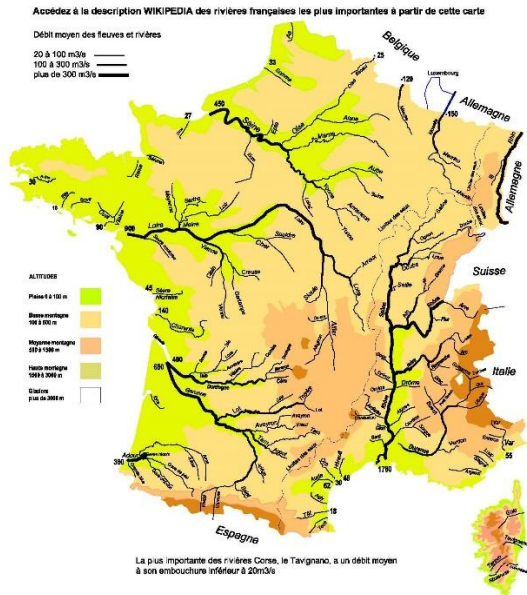
- de la démographie en France qui fait que sur une France métropolitaine d'environ 600 000 km² pour 60 millions d'habitants chaque français dispose sensiblement de 1 ha de terrain où 10 000 m².
- du fait qu'à raison d'une hauteur de précipitation annuelle sur l'hexagone français voisine de 800 mm, il tombe sur cette surface un volume d'eau égale à $0,8 \times 10\,000 = 8\,000 \text{ m}^3$ (22 m³/jour).

C'est donc un volume d'eau douce environ 10 fois supérieur au besoin qui est mis à notre disposition en France métropolitaine pour assurer le chauffage thermodynamique. Si l'on parle actuellement de rationner l'eau potable dans notre pays cela est très probablement dû au fait que l'eau de pluie, par nature potable, est polluée dès qu'elle entre en contact avec notre environnement. Constatation qui n'est pas très réjouissante. Il y a toutefois 2 notions qui vont venir pondérer les chiffres ci-dessus :

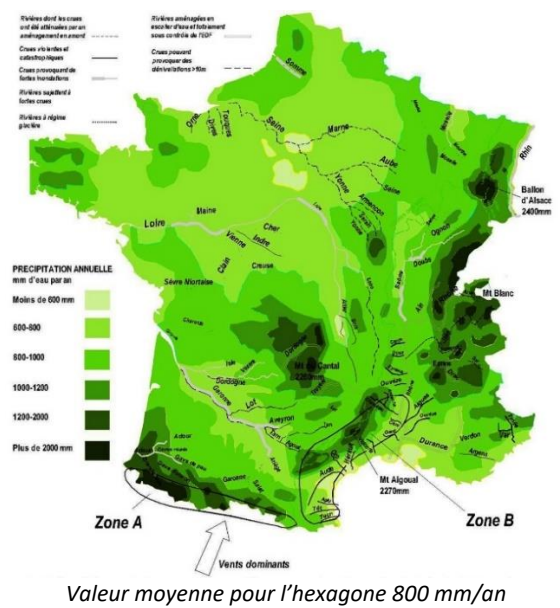
- une partie de cette eau s'évapore.
- les études réalisées au titre du projet "Explore 2070" qui sert de base de réflexion au Ministère de la Transition écologique et qui prévoit une baisse du débit des cours d'eau pouvant atteindre 40 % à l'horizon 2070 par rapport à ce qu'il est actuellement. On constate heureusement que dans le pire des cas le potentiel reste supérieur au besoin et c'est seulement dans les grandes métropoles, comme Paris, que le potentiel naturel thermique de l'eau risque d'être à l'avenir proche voire légèrement inférieur au besoin.

Cela ne doit pas condamner l'action vu que pour satisfaire notre besoin en énergie et en bien être nous allons maintenant devoir mettre en avant la forme thermique de l'énergie et associer la chaleur spécifique des eaux de surface avec celle des eaux souterraines en contact avec les composants géologiques tels que les roches les fossiles et les minéraux. Il y a sur notre planète et en France des régions plus exposées à la sécheresse que d'autres mais le principal problème de l'eau en termes de consommation est, à l'exemple du château de Versailles, qu'elle circule trop souvent dans des tuyauteries mal entretenues, fuyardes et construites dans des matériaux inadaptes.

Les plus grosses rivières



La pluviométrie moyenne



Les zones humides

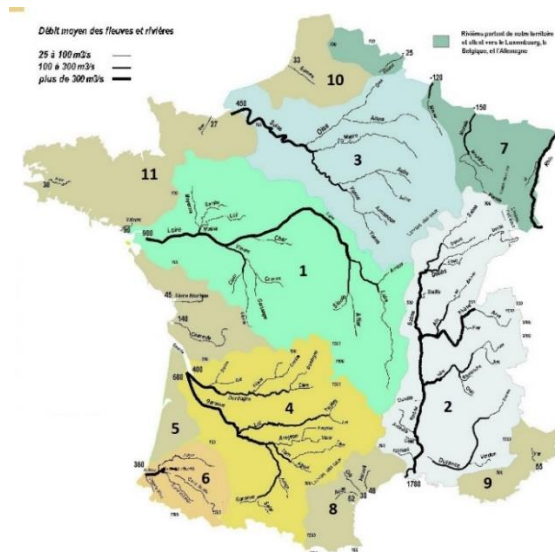
De nombreuses organisations reconnaissent les zones humides comme source de vie pour la faune.

Parfois polluées, ces zones assez souvent situées en bordure des rivières, s'écoulent comme les nappes libres vers la mer mais beaucoup plus lentement.

Leur importance est telle qu'elles ont fait l'objet d'un accord international (Ramsar) et il faut rendre hommage aux intentions du nouveau président américain d'assurer leur protection aux USA.



Les bassins versants



- 1 Bassin de la Loire et de la Charente
- 2 Bassin du Rhône et de la Saône
- 3 Bassin de la Seine et de la Marne
- 4 Bassin de la Gironde
- 5 Bassin de la Leyre
- 6 Bassin de l'Adour
- 7 Bassin du Rhin (côté français)
- 8 Bassin méditerranéen ouest
- 9 Bassin méditerranéen est
- 10 Nord
- 11 Bassin Normandie Bretagne

Grâce à la clé USB on peut accéder aux cartes détaillées de ces régions en cliquant sur le numéro de la région

En ce qui concerne la pollution, celui qui est en amont a une lourde responsabilité vis-à-vis de ceux qui sont en aval

- Les aquifères superficiels et profonds

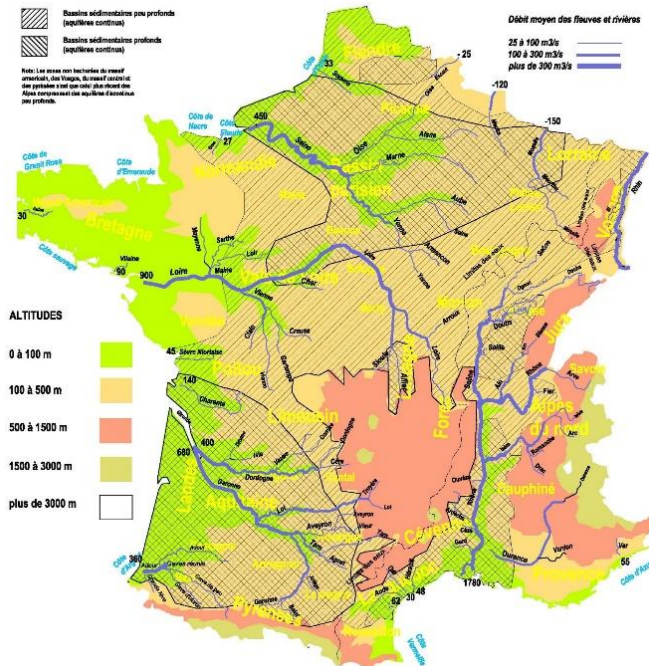
Les aquifères superficiels

On les qualifie aussi de "libres". Au plus bas depuis deux ans (voir cartographie page 16) Ils s'écoulent, on l'a vu, comme la rivière vers la mer mais beaucoup plus lentement.

Compte tenu du fait que le débit des nappes libres liées à la Seine est voisin selon le journal Nature à environ 10 % du débit du fleuve, et que chacun des 10 millions d'habitants qui peuplent Paris et sa proche banlieue boit environ 2 litres d'eau par jour, le débit circulant dans la nappe libre est, comparativement au débit associé à la boisson, qualitativement environ 170 fois plus important.

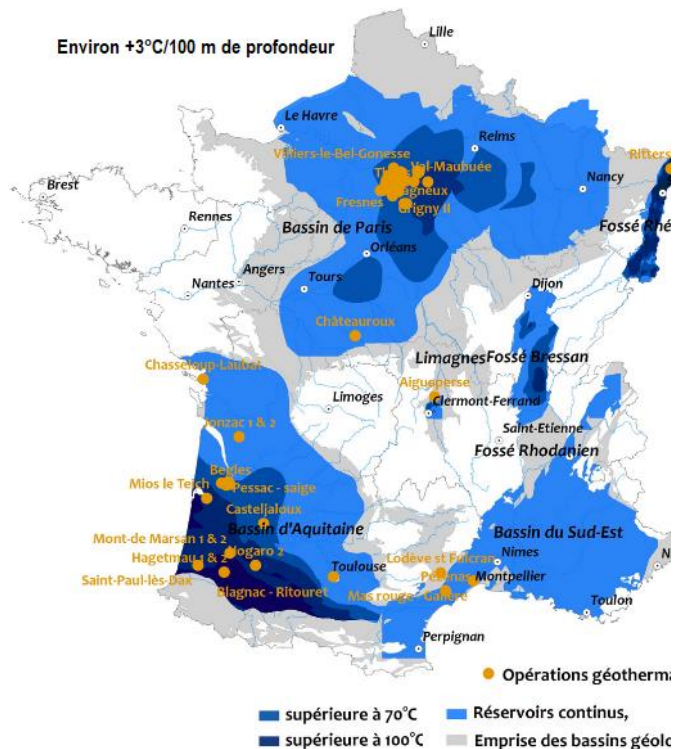
$$(400 \times 0,1 \times 1000 \times 24 \times 3600) / (10\,000\,000 \times 2) = 170$$

Grâce à la clé USB, on peut accéder à des informations sur les aquifères libres et le sous-sol de nos rivières



Les aquifères profonds

Lorsqu'il pleut, une partie de l'eau s'enfonce naturellement par gravité dans le sol perméable jusqu'à ce qu'elle rencontre une couche de terrain imperméable. Il se forme alors des aquifères profonds tels que le dogger parisien qui prennent la température du sous-sol. Ces eaux sous-terraines sont naturellement réchauffées par le fait que lorsqu'on s'enfonce dans le sol, la température s'accroît de 3°C environ par 100 m de profondeur en raison de l'énergie associée à l'interaction nucléaire faible (voir le lien au début de la page 10).



- Les risques de sécheresse

En France métropolitaine

Les idées de base associées à la « Solar Water Economy » ne sont pas seulement liées au chauffage de l'habitat et à des technologies relativement avancées comme celle des pompes à chaleur eau-eau à compresseur évoquées dans le deuxième chapitre. Concernant l'agriculture française, on commence par exemple à percevoir un manque d'eau dans certaines régions de l'hexagone et ceci particulièrement dans les départements suivants : 01 Ain, 03 Allier, 07 Ardèche, 38 Isère, 42 Loire, 43 Haute-Loire, 63 Puy de Dôme, 68 Haut Rhin, 69 Rhône, 70 Haute Saône, 71 Saône et Loire. Il va falloir trouver des solutions pour assurer le besoin en eau de ces régions.

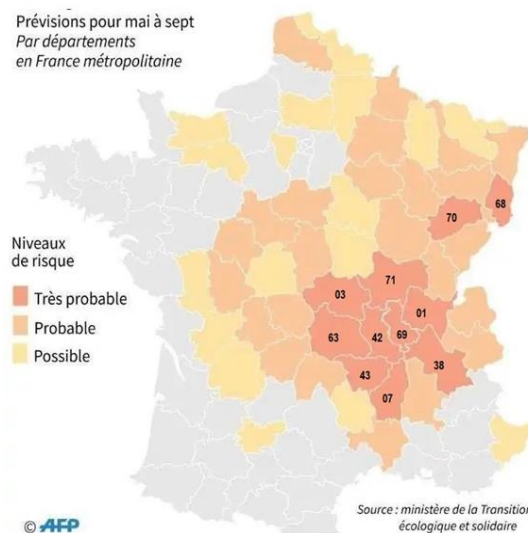
Dans le monde

Ce n'est pas pour l'essentiel un manque d'eau qu'il faut craindre avec le dérèglement climatique en cours mais le fait qu'il y a selon les endroits trop d'eau par moments et pas assez à d'autres. Irrégularités qui vont poser le problème du développement des infrastructures de stockage. Cette disponibilité irrégulière en eau douce préoccupe l'ONU à tel point qu'une réunion regroupant près de 200 pays et les membres du GIEC de ces pays s'est tenue en 2019 à Genève. Un volumineux rapport de plus de 1000 pages, établi à l'issue de cette réunion, a mis en évidence qu'un quart de l'humanité et particulièrement dans 17 pays listés par l'IESF va faire face à des problèmes d'approvisionnement en eau. Les Indiens vont devoir par exemple s'impliquer dans une réflexion prenant en compte l'excédent d'eau pendant la mousson et le fait que les glaciers de l'Himalaya sont progressivement en train de disparaître.

- L'eau non potable

Des niveaux inquiétants de chlorothalonil R471811, un fongicide suspecté d'être cancérigène et interdit en France depuis 2020 ont été constatés en France dans l'eau potable par l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire (ANSES). Quant à l'eau de la Seine, elle n'est plus potable mais ce fleuve, lorsqu'il traverse la région IDF à forte population, met à disposition de chaque habitant, un volume d'eau non potable proche de 2 m³/jour. Ceci compte tenu de son débit moyen à Paris de 300 m³/s et du nombre d'habitants en région IDF de quelque 12 millions.

Prévisions pour mai à sept
Par départements
en France métropolitaine



Les agriculteurs français n'ont malheureusement pas pris encore conscience que les implantations photovoltaïques pourraient leur être favorables. Ceci particulièrement pour assurer l'irrigation dans les régions sèches. La solution retenue sur l'image ci-dessus, en évitant les infiltrations dans le sol et l'évaporation, permettrait d'associer le solaire voltaïque à la rétention de l'eau de pluie. Compte tenu de la pluviométrie moyenne en France voisine du mètre, il serait ainsi possible avec un panneau solaire compétitif de 25 m² de retenir à l'année sensiblement 20 m³ d'eau potable pour arroser localement en saison sèche.

Dégâts des eaux...



Cette constatation nous amène à développer deux chapitres très importants :

- L'eau et l'électricité

Homo sapiens a compris les avantages qu'il peut tirer des [turbines hydroélectriques](#) pour convertir l'énergie potentielle des écoulements de surface en énergie électrique. Il lui reste à mieux mesurer, vu ses piètres performances, la débauche d'énergie qu'entraîne le chauffage électrique par effet Joule comme on le verra au 2^{ème} chapitre et à réfléchir aux différentes [formes d'énergie](#) ainsi qu'à la mise en œuvre de nouvelles chaînes énergétiques qui sont à sa portée pour arrêter le gâchis énergétique actuel.

On va voir au chapitre 2 traitant de la consommation qu'il faut une énergie égale à 1,16 kWh pour élever 1 m³ d'eau de 1°C. On comprend inversement qu'en abaissant de 10°C un m³ d'eau, on récupère 11,6 kWh thermique. Ce même m³ d'eau dans un barrage hydroélectrique implanté en haute montagne et ayant une hauteur de chute de 200 m, permet de récupérer dans une turbine l'énergie électrique suivante :

$E = mgh = 1000 \times 9,81 \times 200 = 1\,962\,000$ joules correspondant à 0,55 kWh sensiblement 20 fois plus faible.

- L'eau et la pollution de l'air dans les villes

L'espérance de vie de l'homme est affectée par la pollution. Plutôt que d'utiliser de coûteux et éphémères filtres à air sur son visage, l'homme, pour améliorer la qualité de l'air qu'il respire, commence à développer une nouvelle technique consistant à arroser l'extérieur de l'habitat. Cette technique entraîne les particules très fines contenues dans l'air et voisine du micron nuisibles à ses poumons vers le sol en purifiant l'air qu'il respire. Les Indiens commencent à utiliser cette technique dans leur capitale New Delhi

- L'eau et l'aquathermie

Sans trop anticiper sur ce que seront ces nouvelles chaînes énergétiques, l'eau, en raison de sa chaleur spécifique particulièrement élevée, pourrait bien dans un avenir proche assurer le chauffage de l'habitat avec des performances supérieures à celles obtenues avec l'air et très supérieures à celles obtenues aujourd'hui avec l'effet Joule et la combustion. Ceci par le fait que mis à part les 20 % qui s'évaporent, l'homme va prendre conscience qu'il va pouvoir bénéficier de la chaleur interne de l'eau. Et ceci on l'a vu, grâce aux ruissellements de surface des rivières et des fleuves (50 %), à l'eau qui s'infiltre dans le sol en alimentant ce qu'on appelle les nappes libres qui s'écoulent elles aussi et comme la rivière lentement vers la mer (30 %) et enfin dans les aquifères captifs chauds et profonds généralement contenus entre des couches de terrains imperméables.



Les fuites sur les circuits d'eau potable représentent annuellement en France 1 milliard de m³. Vu que nous sommes environ 60 millions en France cela représente une perte journalière de l'ordre de 50 litres, le 1/3 de ce que nous consommons

- 12 L'eau formidable véhicule thermique

En raison de la capacité de l'eau à emmagasiner la chaleur ou le froid, on verra au 2^{ème} chapitre qu'il est possible principalement grâce à la Seine de généraliser le chauffage urbain en région IDF en utilisant l'électricité pour entraîner le compresseur des pompes à chaleur et en utilisant l'eau comme véhicule thermique. Cette orientation permettrait de cumuler deux potentiels : celui de l'eau géothermale de la nappe captive constituée par le dogger (Voir page 85) avec celui des eaux superficielles de la Seine. Elle serait une solution performante pour chauffer l'habitat moyennant la mise en place de tuyauteries. L'expérience acquise dans les technologies de forage pétrolier sera utile pour tirer profit du potentiel géothermal. Quant au réseau secondaire à 15°C avec retour à 5°C une fois la chaleur transmise à l'habitat, comme on va le voir dans les pages 36 à 38 ainsi que 65 du chapitre 2, il serait constitué de groupe de pompage et de tuyauteries basse pression.

	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	m ²	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

Une puissance thermique proche de 29 000 kW peut être transmise sur 2 km sans perte notable par un tuyau de 0,7 m de diamètre dans lequel circule un débit d'eau de 2500 m³/h

La capacité thermique de l'eau

Lors de la canicule de l'été 2003, qui a fait environ 70 000 morts en Europe, les températures enregistrées n'ont guère dépassé 40 degrés soit seulement 3 degrés au-dessus de la température intérieure naturelle du corps humain. Homo sapiens à l'évidence, craint plus le chaud que le froid. Lorsque la température extérieure est de 7 °C, soit une différence de 30 degrés, dix fois supérieure, il la supporte sans problème en se couvrant. Heureusement, quand il fait chaud, l'eau répandue sur la peau s'évapore dans l'air et apporte de la fraîcheur. L'air n'est pas le véhicule thermique adapté pour réguler la température en période estivale et nous n'allons pas pouvoir généraliser la climatisation à l'intérieur de l'habitat avec l'air en ville. En effet les évaporateurs qui fonctionnent alors comme le fait un réfrigérateur réchauffent dangereusement l'air ambiant. 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 en période estivale. 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, le potentiel thermique de la Seine est là pour nous aider. On mesure ici tout l'intérêt de la "Solar Water Economy" qui échange l'énergie thermique renouvelable dans l'eau et non dans l'air. Dans la mesure où il est possible, sans réchauffer encore l'environnement extérieur, de restituer en été dans l'eau géothermale des nappes captives profondes l'énergie thermique qu'on y a prélevé en hiver.

L'idée de puiser des millions de m³ dans les nappes d'eau souterraines en hiver pour irriguer les cultures et combattre la sécheresse en été pourrait utilement être associée à la climatisation thermodynamique de l'habitat dans la mesure où cela permettrait d'éviter le stockage de l'eau dans de coûteux réservoirs.

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

On constate sur le tableau ci-dessus 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. En zone urbaine, le potentiel thermique de l'eau géothermale profonde est pourtant inférieur au besoin important résultant de la densité urbaine. Il faut en effet 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)

Sa chaleur spécifique.

Pour augmenter la température de 1 gramme ou 1 cm³ d'eau de 1°C, il faut fournir une quantité de chaleur égale à 1 petite calorie. C'est l'anglais James Prescott qui 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* (Il y a 3600 kilojoules dans 1 kWh) Nous verrons au prochain chapitre comment il est possible grâce à l'eau de satisfaire le confort thermique dans l'habitat urbain parisien en transférant l'énergie thermique contenue dans un écosystème vers un deuxième écosystème sans les affecter, voire même en les améliorant.

$$\text{Débit d'eau} \times \text{temps} \times \text{chute de température} = \text{Energie} \quad (\text{m}^3/\text{h} \times \text{h} \times \Delta T = \text{énergie})$$

Le Newton, le Joule, le kilogramme masse, des unités parfois bien mystérieuses pour beaucoup d'entre nous sont essentielles pour comprendre les niveaux d'énergie et de puissance qui doivent être mise en jeu pour satisfaire nos besoins.

1/ La quantité d'énergie nécessaire pour augmenter la température de 1 m³ d'eau de 1 degré est sensiblement égale à 1 kWh (dans la pratique c'est même un peu plus : 1,16 kWh soit 4 176 000 Nm).

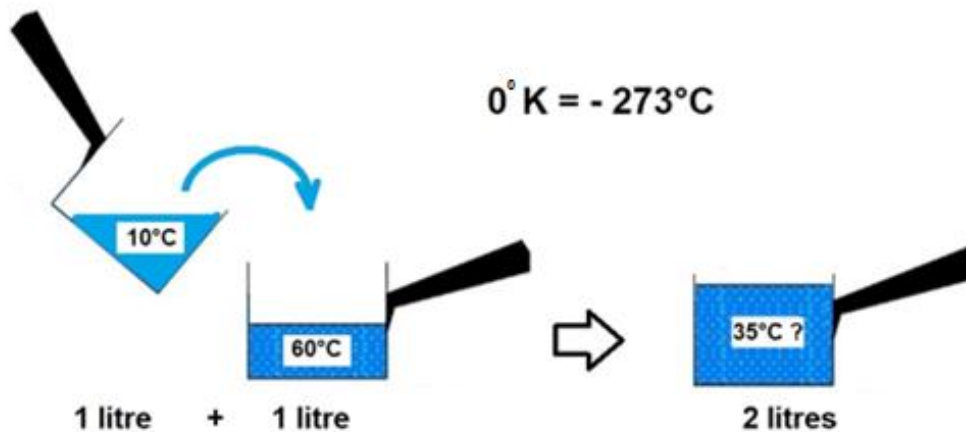
Ce qui correspond à la même quantité de joules vu que dans le système international d'unité 1 N.m correspond à 1 joule.

2/ Pour élever de h=1 m une voiture ayant une masse m de 1 tonne (ou 1000 kilogrammes masse) il faut une énergie égale à $W = m g h = 1000 \times 9,81 \times 1 = 9800 \text{ Nm}$ (Newton.mètre), g étant l'accélération de la pesanteur sur terre soit 9,81 m/s².

Ce qui précède en 1 et 2 revient à dire que pour augmenter la température de 1 mètre cube d'eau de 1 degré, il faut fournir autant d'énergie que pour monter de 1 mètre 430 voitures de 1 tonne (4 176 000 : 9800 = 430).

Mélange

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.



Conductivité thermique

Couramment utilisée dans les techniques d'isolation des bâtiments et dans la transmission de l'énergie thermique dans les échangeurs de température, la conductivité thermique des matériaux λ (lambda) est une grandeur physique associée à la matière qui permet de chiffrer sa capacité à transmettre l'énergie thermique. Cette capacité est d'autant plus élevée que λ est important.

λ est défini à partir du système international d'unités pour une épaisseur de matière égale au mètre et une surface de 1 m². A titre d'exemple :

- Si les 2 faces intérieures d'un double vitrage sont espacées de 2 cm, la puissance thermique traversant la couche d'air est de $0,024/0,02 = 1,2 \text{ watt par m}^2 \text{ et } ^\circ\text{K}$ (ou °C).

- Pour une même différence de température de 1 °K (ou 1°C) entre ses 2 faces, la puissance thermique traversant une paroi métallique en cuivre de 1 mm d'épaisseur est de $386/0,001 = 386\,000 \text{ watts par m}^2$

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

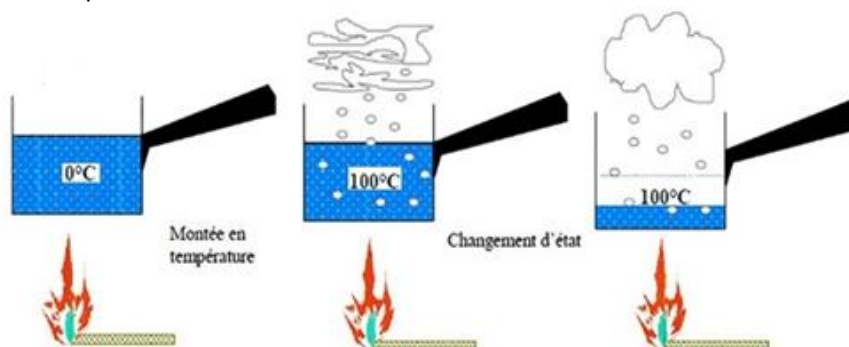
A épaisseur égale, le verre et l'air sont environ 8 fois moins déperditifs que le bois et 2 000 fois moins déperditifs que l'acier. Quant au cuivre, son coefficient de transmission thermique extrêmement élevé est bien utile pour transmettre la chaleur dans les ballons d'eau chaude sanitaire.

Introduction à l'enthalpie

L'eau va venir à notre secours pour comprendre ce qu'est l'enthalpie. Notion importante vu que lorsque l'on parle de pompes à chaleur, on ne peut ignorer ce qu'est l'enthalpie, cette grandeur associée à l'agitation interne de la matière. La matière contient en effet en son sein de l'énergie thermique liée à l'agitation des molécules qui la constituent.

- Lorsque la température de la matière est à -273°C , l'agitation est nulle et la quantité d'énergie contenue dans celle-ci est également nulle

- Lorsque la température de la matière augmente, l'agitation des molécules augmente proportionnellement à la quantité d'énergie introduite dans cette dernière. On reviendra au chapitre 2 sur cette notion très importante.



Montée en température sans changement d'état
Chaleur spécifique 4180 Joules/kg et $^{\circ}\text{C}$
Soit pour 100°C 418 000 Joules/kg

Avec changement d'état à 100°C constant
Chaleur latente de vaporisation
2 250 000 000 Joules/kg

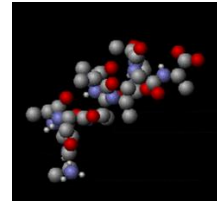
Si l'on ne modifie pas le réglage du gaz, on constate qu'il faut sensiblement 5 fois moins de temps pour élever la température de l'eau à 100°C que pour l'évaporer lorsqu'elle a atteint la température d'ébullition et que l'eau change d'état en passant de l'état liquide à l'état gazeux.

Mieux consommer et produire l'énergie.

Au lieu de réchauffer encore un peu plus l'air des villes pour climatiser l'intérieur des appartements en été comme cela se pratique malheureusement encore aujourd'hui avec les pompes à chaleur utilisant l'air, on ferait mieux, à l'heure du réchauffement climatique d'utiliser l'eau. Les performances étant améliorées avec l'eau comparativement à l'air comme on va le voir par la suite, cette orientation permettrait de diminuer notre consommation d'énergie électrique. Elle permettrait aussi de filtrer l'eau usée provenant de la rivière avec un filtre sur le circuit alimentant le bac de décantation (voir le circuit page 59) afin de régénérer l'eau de nos rivières et de pallier le manque d'eau propre qui nous guette. Concernant cette fois non pas la consommation, mais la *production* de l'énergie électrique, grâce à l'hydrogène contenue dans l'eau, il semble évident qu'une eau filtrée et propre permettra d'améliorer les performances de l'électrolyse de l'eau permettant de produire l'électricité à partir de l'hydrogène comme envisageait de le faire l'Allemagne en collaboration avec le Kazakhstan avant la guerre en Ukraine. Des Lutins Thermiques allemands (Viessmann) en s'associant aux Etats-Unis, ont pris conscience que l'on est plus fort à deux que tout seul pour se rapprocher de la vérité scientifique. La complémentarité des techniques sera bien utile pour améliorer les performances des chaînes énergétiques tirant profit de la chaleur spécifique de la matière. Espérons qu'ils amélioreront le confort thermique dans l'habitat et la qualité de l'air dans nos villes en échangeant sur l'eau et non sur l'air. Quoiqu'il en soit à ce sujet, ils ont pris conscience du gâchis actuel associé au confort thermique dans les logements de nos **grandes métropoles** et ils sont convaincus que l'on peut progresser et satisfaire les besoins thermiques de l'habitat différemment dans de bien meilleures conditions avec les pompes à chaleur. Plutôt que de s'orienter vers l'air le Lutin thermique que je suis estime qu'une cohabitation entre l'eau superficielle des fleuves et celle des nappes captives profondes va devenir nécessaire pour améliorer les performances déplorables des chaînes énergétiques assurant actuellement le confort thermique dans l'habitat.

Au cœur de la matière

On ne peut évoquer les systèmes type pompe à chaleur sans évoquer 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. Par contre si la température augmente la désorganisation de la matière augmente en proportion.



Il y a de nombreux paramètres qui caractérisent la qualité du fluide circulant dans le cœur d'une pompe à chaleur mais la caractéristique principale de ce fluide dit caloporteur est sa capacité à générer du froid dans l'évaporateur à la sortie du détenteur 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.

La quantité d'énergie contenue dans la matière est 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 prouvent 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 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 signifie 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 sûr des limites physiques à cela mais on verra au chapitre 2 que cette limite physique semble être actuellement un COP voisin de 6.

La température constatée dans l'eau à la surface des océans en ce début d'année 2023 est comparable voire même un peu supérieure à ce qu'elle était en 2021, une année pourtant exceptionnellement chaude.

Deux raisons à cela :

- véhiculée vers la mer par nos rivières en raison de la chaleur spécifique de l'eau, c'est environ 90 % de la chaleur générée par l'activité humaine qui se retrouve dans la mer.
- le cycle naturel de refroidissement El Nina, puis de réchauffement El Nino, des océans est rentré dans cette 2^{ème} phase de réchauffement qui se prolonge dangereusement.

Ces 2 constats pourraient bien être les signes avant-coureurs d'une fin d'année climatique 2023 très difficile sur notre planète pouvant encore aller en s'aggravant les années suivantes.

Ceci dit, l'eau c'est aussi [son potentiel nutritionnel](#). mais on va maintenant évoquer une modification de nos chaînes énergétiques qui nous permettrait, grâce à l'eau, de satisfaire notre confort thermique en consommant moins d'énergie.

Un partage équitable de l'eau pour chacun d'entre nous et sa gratuité sont des facteurs de paix et de prospérité.



*Quand tout sera privatisé on sera privé de tout.
Danielle Mitterrand*