

**FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE**  
**FACE AU REFROIDISSEMENT ÉCONOMIQUE**  
**FACE AU DÉRÈGLEMENT CITOYEN**



# La ville Liber'terre

Cahier d'étude N°3 le bâtiment actif : De la structure à l'environnement

Récupérer l'énergie dynamique pour diminuer la consommation d'énergies fossiles.

# Préliminaire

Le présent cahier, « le bâtiment actif : De la structure à l'environnement » a pour ambition de recenser et commenter succinctement nombre d'études développées ici et là, autour des actions innovantes de récupération de l'énergie dynamique induite par l'acte de construire.

Pour satisfaire aux exigences mondiales de « préservation des ressources de la planète », des équipes de recherche s'organisent pour aller en ce sens. En perpétuelle évolution, les connaissances scientifiques nous apportent des éléments de réponse et permettent déjà, dans certains cas, de voir s'industrialiser des produits répondant à des normes environnementales, lesquelles –chacun en convient- seront de plus en plus drastiques !

L'Homme doit ainsi montrer, encore et encore, sa capacité à fluidifier le passage de la science à la technologie, de la recherche fondamentale à la recherche appliquée, et ce, pour le plus grand bien des générations à venir.

Tous les exemples exposés ci-dessous, classés par thèmes d'étude distincts, font plus ou moins état des dernières avancées connues en la matière. Elles sont le fruit d'échanges dans des groupes d'analyses et de réflexions, ou de résultats obtenus dans les laboratoires dédiés ou bien tout simplement d'idées que le bon sens nous inspire.

Aussi, des travaux de recherche et d'études peuvent être entrepris grâce à ces ressources mises à disposition de tous les publics.

Éveiller la curiosité de chaque élève, de chaque étudiant, de chaque professeur, pour peu qu'ils puissent y trouver intérêt dans leurs formations -de quelque niveau qu'elles soient (par le biais, par exemples, de sujets de mémoire, projets de fin d'études, concours d'idées, thèses de doctorat, PFE d'architecture ect), permettra à l'intelligence collective qui en résultera, de valoriser idées, concepts, objets technologiques et autres, qui viendront à leur tour faire évoluer le cadre de vie des habitants de la planète.

## 1. La Terre : source d'énergie naturelle inépuisable par conduction

### 1.1 Introduction

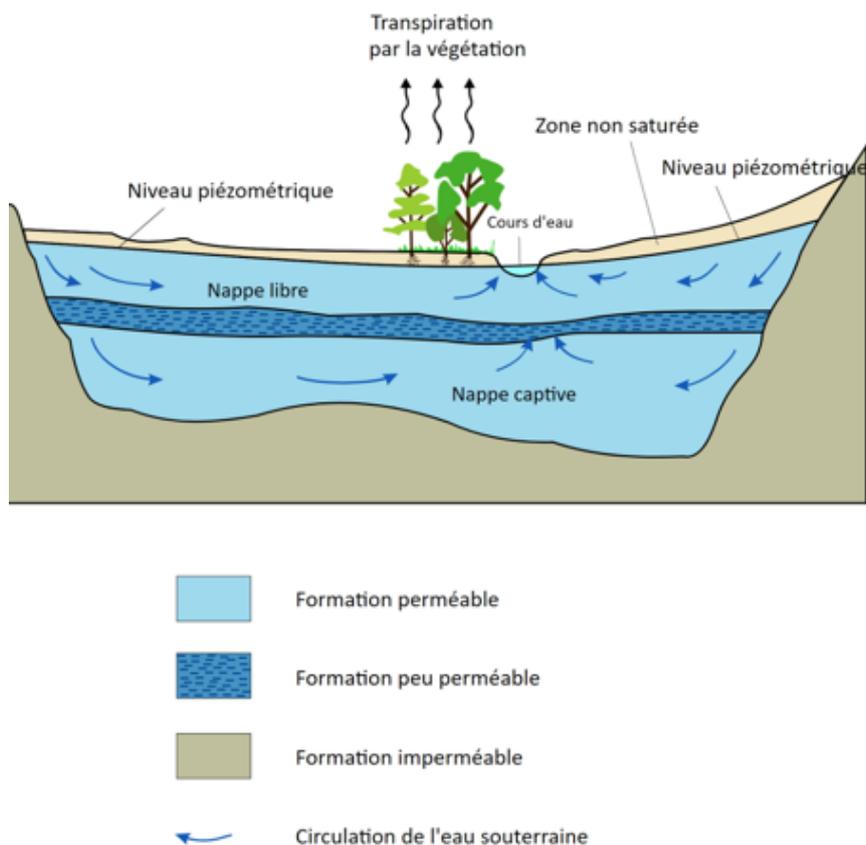
La géothermie (du grec géo : la terre et de thermos : la chaleur) est la science qui étudie l'énergie calorifique « interne » de la Terre. Par extension, elle désigne les systèmes de récupération de cette énergie.

NB : Dans une approche plus scientifique, on peut distinguer l'aquathermie captant la chaleur des eaux souterraines et la géothermie, qui puise la chaleur des roches de la croûte terrestre. Le plus souvent, les 2 termes sont confondus.

## 1.2 Généralités

Les nappes souterraines se situent à quelques centaines, voire parfois quelques milliers de mètres de

profondeur. Elles sont à l'origine de la géothermie de « basse » température, contrairement au magma en fusion, où la chaleur est très élevée (supérieure à 1000°C).



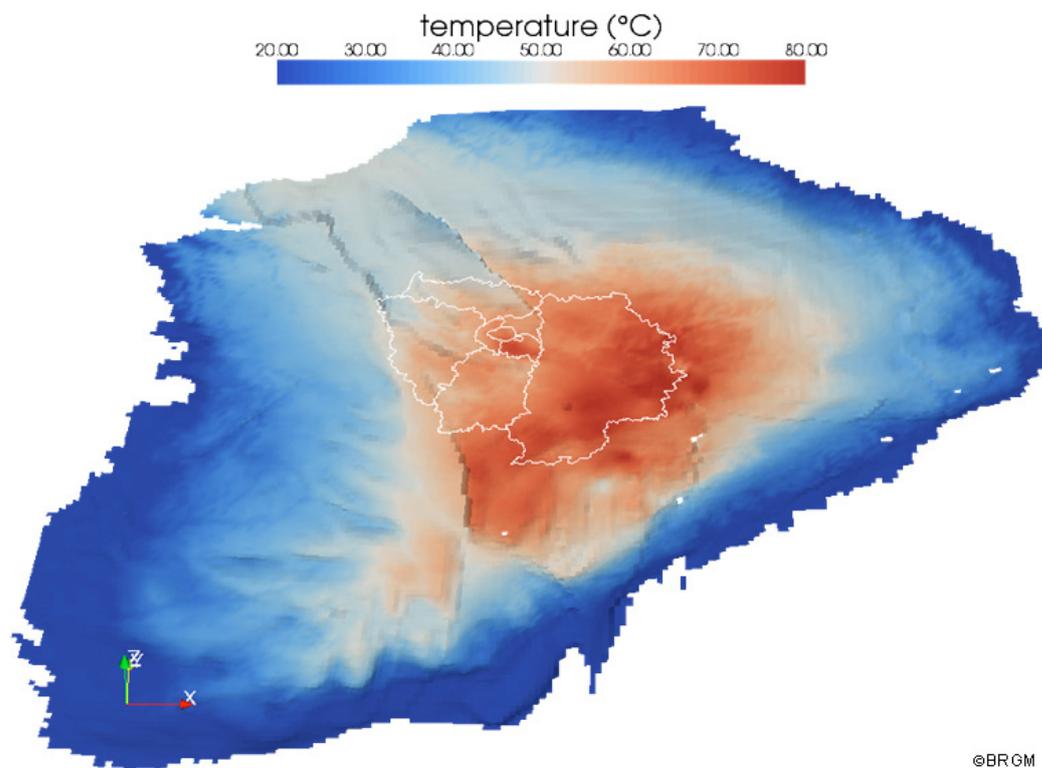
Source : Hans Hillewaert — en:Image:Schematic aquifer xsection usgs cir1186.png

On distingue deux types d'aquathermie :  
 - L'aquathermie profonde, profitant de la chaleur contenue dans l'eau géothermale des nappes perméables en contact avec la chaleur de la terre. L'eau souterraine, emmagasinée dans ces nappes

captives, est emprisonnée entre deux couches imperméables.

Selon la profondeur de ces nappes, les températures relevées sont différentes. A 2500 m, on a potentiellement des valeurs situées entre 80 et 100°C, alors qu'à 5000 m de profondeur, l'eau, encore liquide, peut atteindre 200 °C

## 1.3 Exemple d'étude et de réflexion «A» : Les nappes souterraines



La géothermie basse température (entre 30 et 100°C environ) est la mieux adaptée à la récupération d'énergie.

Les bassins aquifères (région où les sols contiennent une nappe d'eau souterraine suffisamment perméable pour que l'eau puisse y circuler librement) sont donc des territoires idéaux pour utiliser les technologies ad hoc.

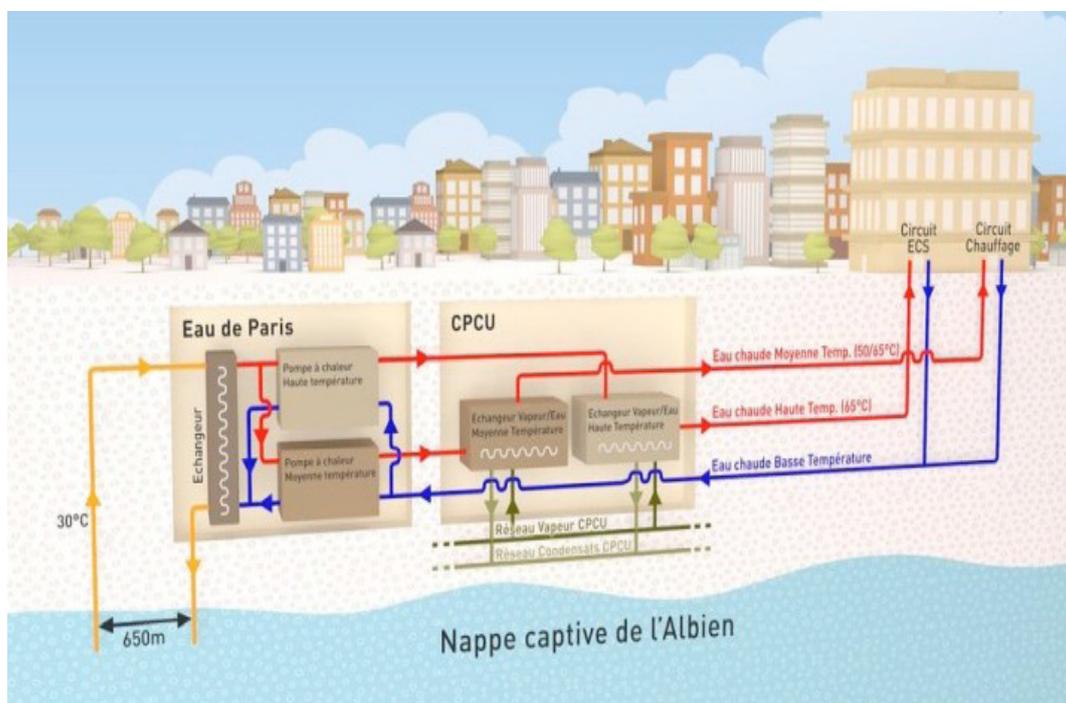
La France en est bien dotée, notamment dans le bassin parisien. La température de l'eau est assez élevée et permet de s'affranchir d'une pompe à chaleur, d'où la possibilité de chauffer directement les logements.

Cette source d'énergie est quasi continue avec une durée de vie de plusieurs dizaines d'années et peu de gaz à effets de serre.

En moyenne, la température augmente à partir de la surface du sol de 3°C environ tous les 100 m, ce qui correspond à un gradient géothermique normal.

Des mesures ont été effectuées plus ou moins en continu à 28m de profondeur, au dessus de la nappe indiquant une température moyenne de 12°C.

Dans la région parisienne, il y a 8 forages utilisés pour réinjecter de l'eau réchauffée entre 18° et 22°. En 1975, on a pu constater qu'après quelques années de fonctionnement, l'eau pompée avait été réchauffée de plusieurs degrés par l'eau réinjectée à 60m environ de distance. Les mesures effectuées en 1977 sur 87 forages ont indiqué des températures comprises entre 12,2° et 18,2°, avec une médiane de 14°.



Les eaux les plus chaudes proviennent des forages situés à proximité des puits de réinjection (8ème et 9ème arr de Paris.). La plupart des autres points chauds sont situés à proximité de la Seine à moins de 50m de profondeur. Au-dessous de 80m, les résultats sont relativement groupés entre 13,2° et 14,2°.

Il semble donc que la nappe, au fil des années, ait été réchauffée artificiellement par les réinjections d'eau chaude et par la Seine. Pour un chauffage on peut utiliser le principe

de pompe à chaleur géothermique. Les calories présentes dans le sol sont récupérées en utilisant une forme de capteurs souterrains puis transmises au logement via une pompe à chaleur.

Les logements individuels et groupe résidentiels ne nécessitent pas la même géothermie, il faut choisir entre une géothermie très basse énergie (température inférieure ou égale à 30°C) et une géothermie basse énergie (température comprise entre 30°C et 100°C).

## 1.4 Exemple d'étude et de réflexion «B» : Les fondations géothermiques

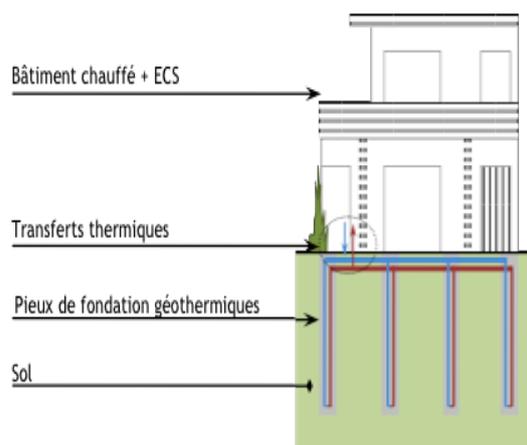


Figure 1 : Schéma du dispositif de soutirage de chaleur

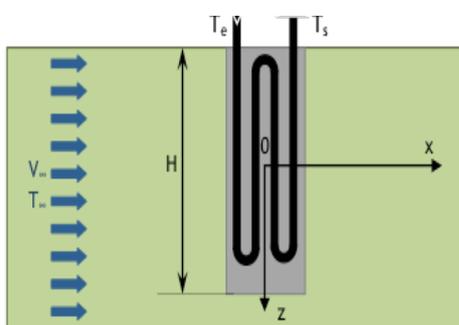


Figure 3 : Schématisation d'un pieu de fondation géothermique dans une nappe phréatique

Les pieux de fondation géothermiques, outre leur fonction structurelle assurant la stabilité des constructions, servent de support à une installation géothermique.

Un circuit d'eau installé à l'intérieur de ceux-ci va permettre de préchauffer l'air du bâtiment en hiver mais aussi d'assurer le chauffage, la production d'ECS (eau chaude sanitaire) ainsi que le rafraîchissement en été.

L'objectif avec ces pieux de fondation géothermiques est de construire des bâtiments à énergie positive dans un contexte d'énergie propre et renouvelable combinant les exigences structurelle et de confort thermique.

Concrètement, les pieux sont plongés dans la nappe phréatique. Un fluide caloporteur circule dans un tube en double U inséré dans le pieu géothermique. Le sol dans lequel sont implantés les pieux doit avoir des caractéristiques physiques précises (conductivité thermique, capacité calorifique ...) dépendantes des couches géologiques traversées par le pieu.

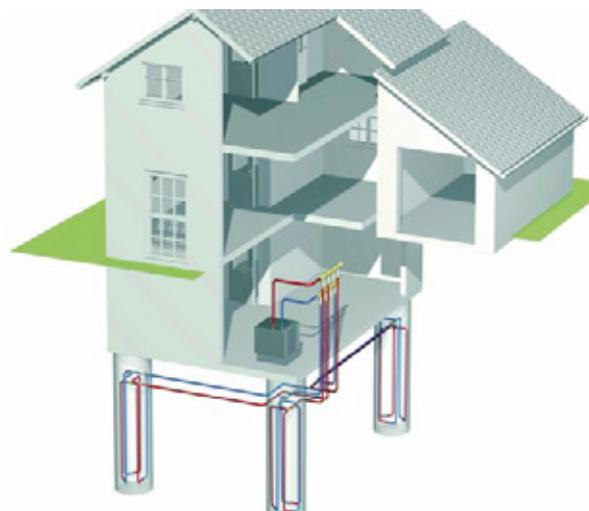
Le prélèvement de chaleur impacte le comportement thermique du sol qui influe directement sur la température de la nappe phréatique au sein du sol. Mais la condition initiale considère que sol et pieu sont à la même température qui correspond alors à la température moyenne annuelle extérieure du site.

On note donc que les hypothèses calculatoires ne prennent pas en compte les variations climatiques saisonnières et que la maîtrise des modèles de comportements thermodynamiques dans les phases solide (pieu)-liquide (eau de la nappe) est loin encore d'être aboutie.

Techniquement, le chauffage des bâtiments repose sur le principe de pompe à chaleur géothermique : captation et récupération des calories présentes dans le sol puis transfert, via une pompe à chaleur, vers les logements.

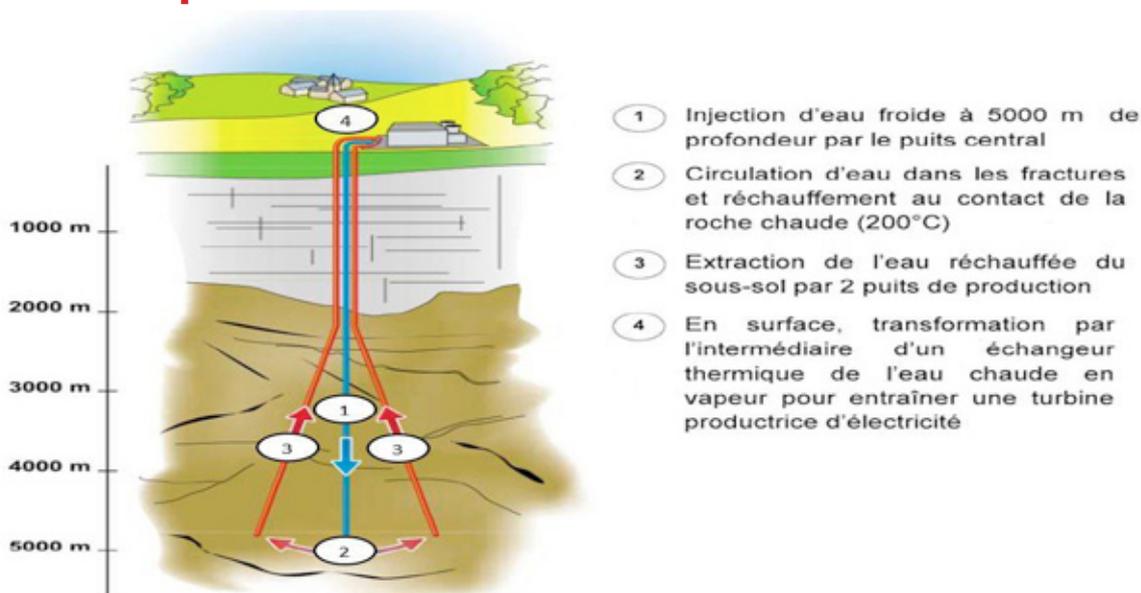
Le captage sur eau de nappe se fait grâce à l'insertion de capteurs dédiés dans un ou plusieurs puits forés à moins de 100m de profondeur. En principe, un seul forage suffit mais généralement, on réalise deux forages, l'un servant au pompage et l'autre au rejet ; ce qui permet, au plan écologique, une meilleure préservation de la qualité de la nappe.

On distinguera : la géothermie très basse énergie (température inférieure ou égale à 30°C), à privilégier et la géothermie basse énergie (température comprise entre 30°C et 100°C) utilisée presque exclusivement pour les groupes résidentiels, car trop onéreuse pour les logements individuels.



**PRIX FORAGE ANALOGUE -> pour un forage à 1700m pour une eau à 75° environ il faut compter 12M€ qui comprend la réalisation du forage, le réseau de distribution et la construction des bâtiments utiles.**

## 1.5 Exemple d'étude et de réflexion «C» : Les turbines géothermiques



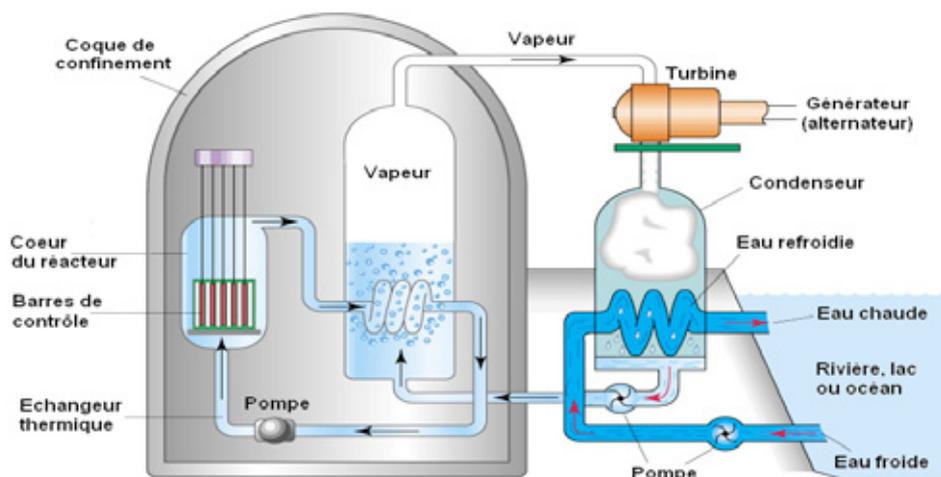
### Production de chauffage et d'électricité sans CO2

Ces turbines, alimentées en énergie par la chaleur des eaux souterraines, permettent la production de chauffage et d'électricité sans CO2

Pour les faire tourner, on peut utiliser la vapeur (la phase gazeuse de l'eau) sous différentes formes : Pendant sa remontée vers la surface et selon les lois établies en thermodynamique, l'eau chaude subit une baisse de pression et se transforme en vapeur. En tête de puits sort un mélange eau/vapeur dont on peut utiliser la phase gazeuse pour alimenter des turbines : Lorsque l'eau de gisement est partiellement vaporisée, elle est récupérée sous forme de vapeur sèche, directement utilisable pour faire tourner les turbines des centrales géothermiques. Malheureusement, les gisements sont rares.

On peut également utiliser la vapeur dans les roches fracturées : on récupère la chaleur de roches chaudes en profondeur dans des sous-sols composés de minéraux naturellement fracturés grâce à l'injection d'eau. Celle-ci circulant entre les roches chaudes est pompée par la centrale puis remonte en surface et, par l'intermédiaire d'un échangeur thermique se transforme en vapeur.

La vapeur entraîne alors une turbine et un alternateur qui va produire de l'électricité. L'eau est ensuite renvoyée dans les roches et ainsi de suite. Cette technique est encore sujette à expérimentations, analyses et interrogations. En effet, dans les territoires à sismicité avérée, le remaniement artificiel des sols aggrave potentiellement les risques de tremblements de terre



## 2. L'air ; source d'énergie naturelle inépuisable par transformation de l'énergie.

### 2.1 Introduction

L'air en mouvement à la surface du globe est une source remarquable de récupération d'énergie. Concrètement, c'est l'énergie cinétique de translation du vent (énergie éolienne) qui met en rotation les pales des éoliennes et qui, grâce à des générateurs électriques est convertie en énergie électrique.

Le trafic routier et plus encore autoroutier, génère beaucoup de turbulences que l'on peut assimiler à du « vent ». Hors les turbulences naturelles, l'impact de l'air déplacé par les voitures sur des éoliennes installées sur les bords de route ou entre deux voies à double sens, suffit a priori à les faire tourner.

### 2.2 Exemple d'étude et de réflexion «D» : Les turbines éoliennes horizontales et verticales

#### Les éoliennes verticales :

Ne dépassant pas environ 5 m de hauteur (contre 160 m pour certaines éoliennes classiques), les turbines de ces petites éoliennes sont très efficaces et permettraient de générer environ 1 kWh d'électricité par heure lorsque le trafic routier est fluide. On peut également envisager d'équiper ces éoliennes en partie supérieure de panneaux photovoltaïques.

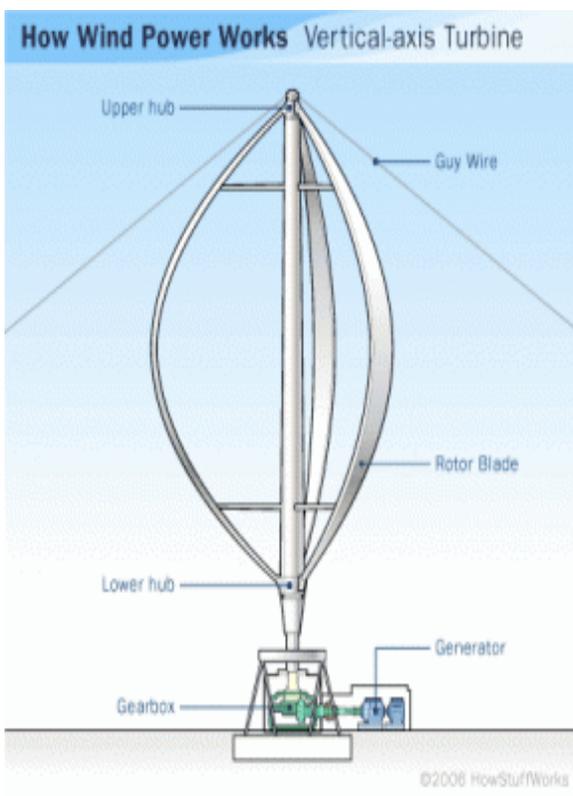
Un rapide calcul montre qu'une maison de 100m<sup>2</sup> consommant 48 kWh par jour, pourrait être « autonome » avec deux de ces turbines éoliennes.

Sans commune mesure de puissance avec les installations habituelles dans les champs des campagnes, on peut noter malgré tout que les nuisances sonores générées par les pales en mouvement sont noyées dans celles du trafic routier.

#### Les éoliennes horizontales :

Placer les éoliennes horizontalement sur autoroute peut être une alternative, mais avec des inconvénients. En effet, contrairement aux éoliennes verticales, elles sont placées beaucoup plus haut et le vent « produit » par le trafic routier ne permet pas de les faire tourner efficacement.

Par ailleurs, l'axe de l'éolienne étant horizontal, les pales ne captent le vent que de face ou de dos et sont donc loin d'atteindre le rendement idéal.



## 3 Les gaz ; source d'énergie par transformation thermodynamique ou chimique ou calorique ...

### 3.1 Introduction

Qu'ils soient issus d'une activité humaine (origine anthropique) ou des émissions naturelles, certains gaz sont susceptibles d'apporter leur contribution dans la récupération énergétique. Cependant, ils peuvent être nocifs et leur présence nécessite parfois, voire en permanence, d'être contrôlée quantitativement pour n'affecter ni l'Homme, ni son environnement.

### 3.2 Le gaz carbonique

Les travaux menés par la ville Liber'terre permettent dans leurs propositions de structures constructives (rapprocher et lier la verticalité, soit le bâtiment, de l'horizontalité, soit les infrastructures routières) de capter le dioxyde de carbone -CO<sub>2</sub> dans son appellation chimique- là où sa concentration est élevée (au-dessus des voies). Le CO<sub>2</sub> n'est pas un gaz néfaste en soi, au contraire. Le carbone est un élément essentiel pour toutes les formes de vie sur Terre.

Par ailleurs, avantage non négligeable complémentaire à cette solution, on peut filtrer les particules lourdes émises par les voitures et poids lourds. Grâce à certains matériels complémentaires adaptés à la purification de l'air (voir schéma), l'impact négatif sur la santé est diminué.

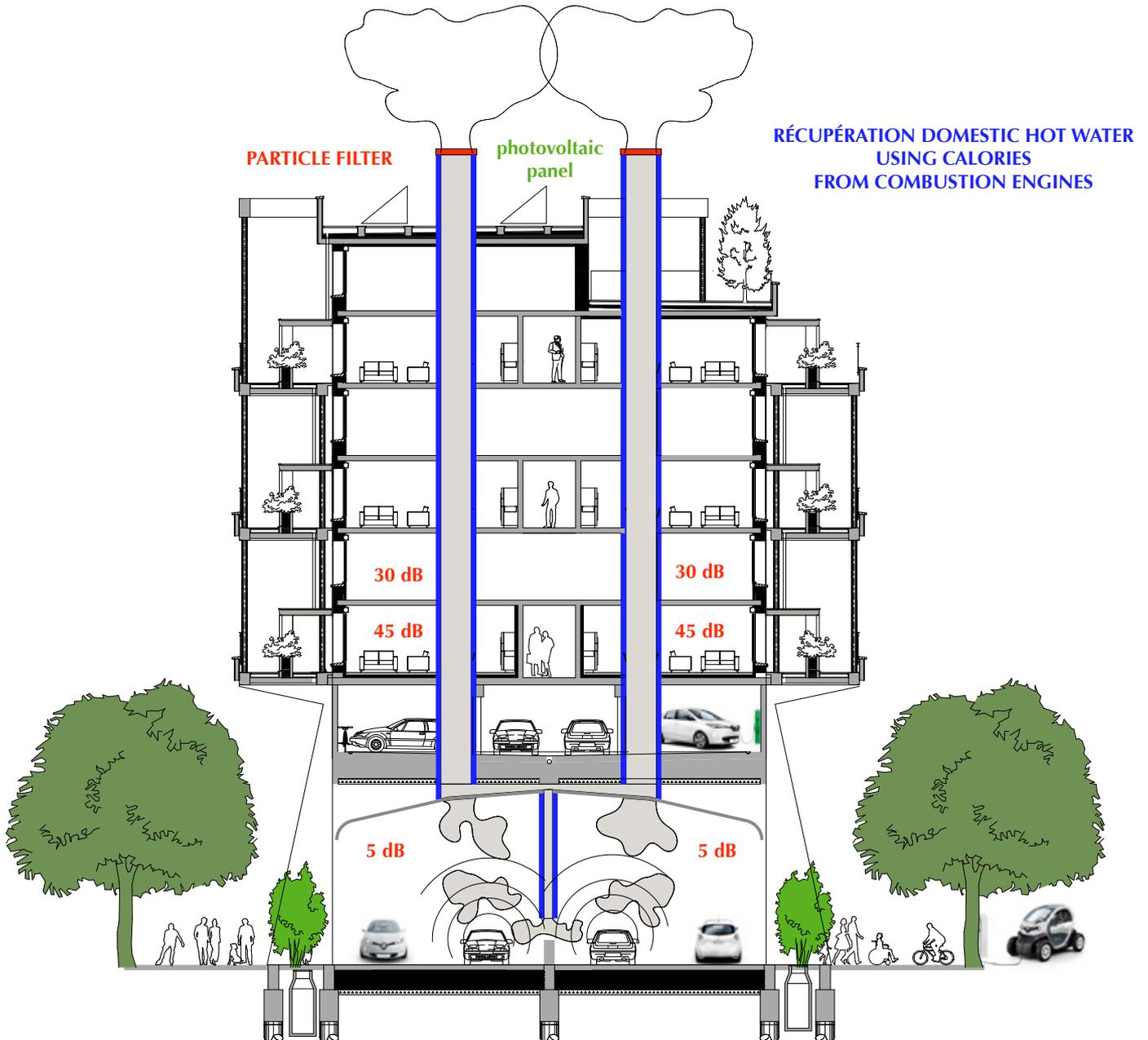
### 3.3 Les oxydes d'azote (NOx)

Les oxydes d'azote (ou vapeurs nitreuses) sont des composés chimiques formés d'oxygène et d'azote. « NOx » est le terme générique qui englobe un groupe de gaz hautement réactifs, tous contenant de l'azote et de l'oxygène dans des quantités différentes.

Les vapeurs nitreuses sont toxiques, et constituent une source croissante de la pollution de l'air : elles contribuent à l'effet de serre et au dérèglement climatique, et sont acidifiantes et eutrophisantes ; les NOx sont devenus la principale source des pluies acides et de l'acidification des eaux douces.

À la sortie des chaudières à biomasse, par exemple, on trouve une production de NOx.

LE BÂTIMENT ACTIF CAPTE ET VALORISE LES GAZ  
par l'aspiration et la filtration des CO<sub>2</sub> & des PARTICULES  
Ils sont transformés en Oxygène et en énergie



## 3.4 Les déchets

Selon l'article L 541-1 du Code de l'Environnement, le déchet ultime est défini comme un déchet, résultant ou non du traitement d'un autre déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment :  
par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux.

Cette définition des déchets ultimes a été créée en 1992 par la loi-cadre déchets et a entraîné en France la construction des CSDU (Centres de Stockage des Déchets Ultimes), qui sont des décharges conçues pour ces déchets ultimes. Ces déchets sont considérés comme étant impossibles à recycler et sont donc voués à être stockés dans les CSDU. Différents organismes, dont le Cniid, ont cependant critiqué la loi de 1992 car beaucoup de déchets organiques sont considérés «ultimes» bien qu'en théorie leur

## 3.5 La photosynthèse.

La photosynthèse est le processus qui permet aux plantes de synthétiser de la matière organique à partir de trois éléments : la lumière, l'eau et le dioxyde de carbone. Ce processus serait apparu il y a plus de deux milliards d'années et tous les organismes vivant aujourd'hui captent entre 100 et 115 milliards de tonnes de carbone par an.

## 3.6 Incinérateurs et production de chaleur.

A ce jour, la France possède 121 incinérateurs dont 119 avec production énergétique.

L'incinération des déchets produit de la chaleur qui, après récupération, transforme l'eau circulant dans des circuits appropriés en vapeur sous pression. Ensuite, cette vapeur peut être détendue dans un turboalternateur pour produire de l'électricité ou utilisée directement pour alimenter un réseau de chaleur urbain ou des industriels avoisinants.

Issus des circuits ultimes de recyclage (refus de tri des déchets d'activités économiques, des refus de collectes sélectives, de déchets du bâtiment, des refus de compostage etc.) les déchets sont préparés afin de permettre une valorisation énergétique performante en chaleur, électricité ou gaz.

Cette chaleur est issue de la biomasse et est donc neutre en CO2. La production de chaleur renouvelable provenant des incinérateurs représente environ 1,6% de la production totale de chaleur en France.

### 3.7 Exemple d'étude et de réflexion «E» : les capteurs de gaz carbonique

Le dioxyde de carbone et d'autres gaz composés d'au moins deux atomes différents, tels la vapeur d'eau, le méthane et le monoxyde de carbone absorbent le rayonnement infrarouge (RI) de manière spécifique et unique. Leurs bandes d'absorption typiques sont présentées dans la figure ci-contre.

Ces gaz sont ainsi détectables à l'aide de techniques de mesures par capture du RI.

Actuellement, c'est la technologie la plus utilisée pour la détection du CO2.

Les capteurs à RI présentent plusieurs avantages en comparaison des capteurs électrochimiques. Ils sont stables et hautement sélectifs par rapport au gaz mesuré et également plus durants. En effet, dans le cas de ce type de capteurs, les gaz mesurés n'interagissent pas directement avec le capteur et peuvent donc supporter des niveaux élevés d'humidité, de poussière, d'encrassement et d'autres conditions exigeantes.

La mesure du CO2 dans l'air repose sur le fait que ce gaz absorbe le rayonnement infrarouge dans une plage donnée de longueurs d'onde.

L'importance de cette absorption (et donc la teneur en CO2) est mesurée, soit par un détecteur infrarouge pour le procédé photométrique, soit par l'intermédiaire d'un microphone pour le procédé acoustique. (Voir schémas ci-contre)

Pour ce dernier, un rayonnement infrarouge, modulé à quelques centaines de hertz, est émis. Son absorption par le CO2 chauffe l'air et les variations de température dans le volume fermé qui s'ensuivent, provoquent une variation de pression à la même fréquence. L'amplitude de cette variation de pression est alors mesurée par un microphone.

Les sondes de CO2 présentent généralement une plage de mesure de 0 à 2 000 ppm, (ppm = partie par million) satisfaisante pour la mesure des concentrations observées dans les bâtiments :

En effet, la teneur en CO2 de l'air extérieur est de l'ordre de 400 ppm et dès 800 ppm une diminution de la concentration et du confort s'observe déjà chez l'homme.

On note également que les réglementations limitent généralement à 1 000 ppm la teneur maximale dans les logements, voire 1 500 ppm dans les bâtiments tertiaires.

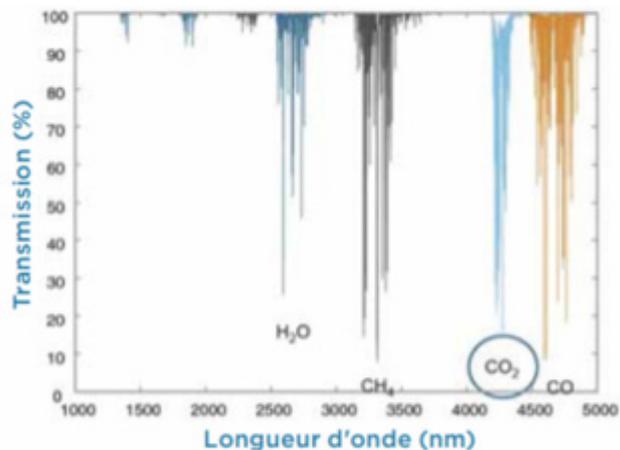
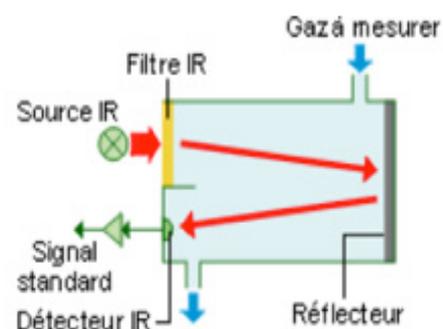
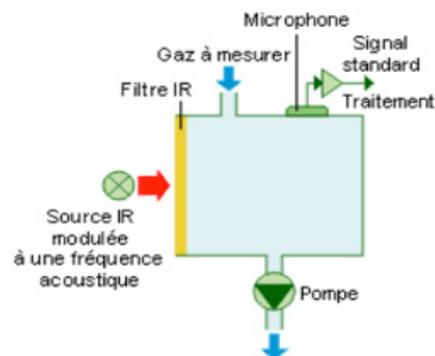


Figure 1. Absorption par RI du CO<sub>2</sub>, et d'autres gaz.



## 3.8 Exemple d'étude et de réflexion «F» : les capteurs thermiques ; Chaleurs fatales.

Il n'y a pas actuellement de capteur de NOx sur le marché qui fonctionne correctement, bien que plusieurs constructeurs et équipementiers automobiles ainsi que des laboratoires publics aient mis l'accent sur leur développement. La motivation du développement de capteur de NOx vient de la nécessité du respect de l'environnement et des contraintes de plus en plus drastiques quant aux émissions des moteurs tolérées par les autorités régulatrices.

Les moteurs Diesel produisent quatre à huit fois plus de NOx que les moteurs à essence ; cependant ils ne peuvent pas être traités à cause de l'excès d'oxygène et c'est ce qui a contraint les constructeurs automobiles à développer des systèmes pour détecter et réduire ces émissions de NOx.

A ce jour, le système le plus répandu consiste à faire recirculer les gaz. La recirculation des gaz d'échappement (RGE) entraîne la redirection d'une partie des gaz d'échappement des moteurs à combustion dans le collecteur d'admission. Cela permet une réduction des émissions d'oxydes d'azote (NOx)<sup>1</sup> et ce, sans trop augmenter la quantité de particules rejetées. Ainsi, les industriels peuvent répondre aux normes anti-pollution les plus récentes, sans avoir à modifier fondamentalement la structure du moteur.

Pour donner un ordre de grandeur, une particule fine est 6 à 20 fois plus petite que la section d'un cheveu et que la taille d'un proton est de l'ordre du femtomètre, c'est-à-dire environ 10<sup>9</sup> fois (1 000 000 000) plus petit qu'une particule fine.

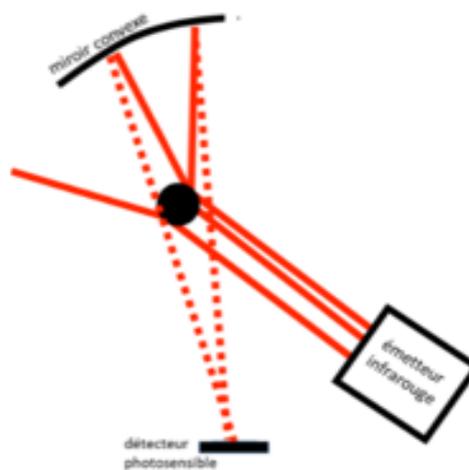
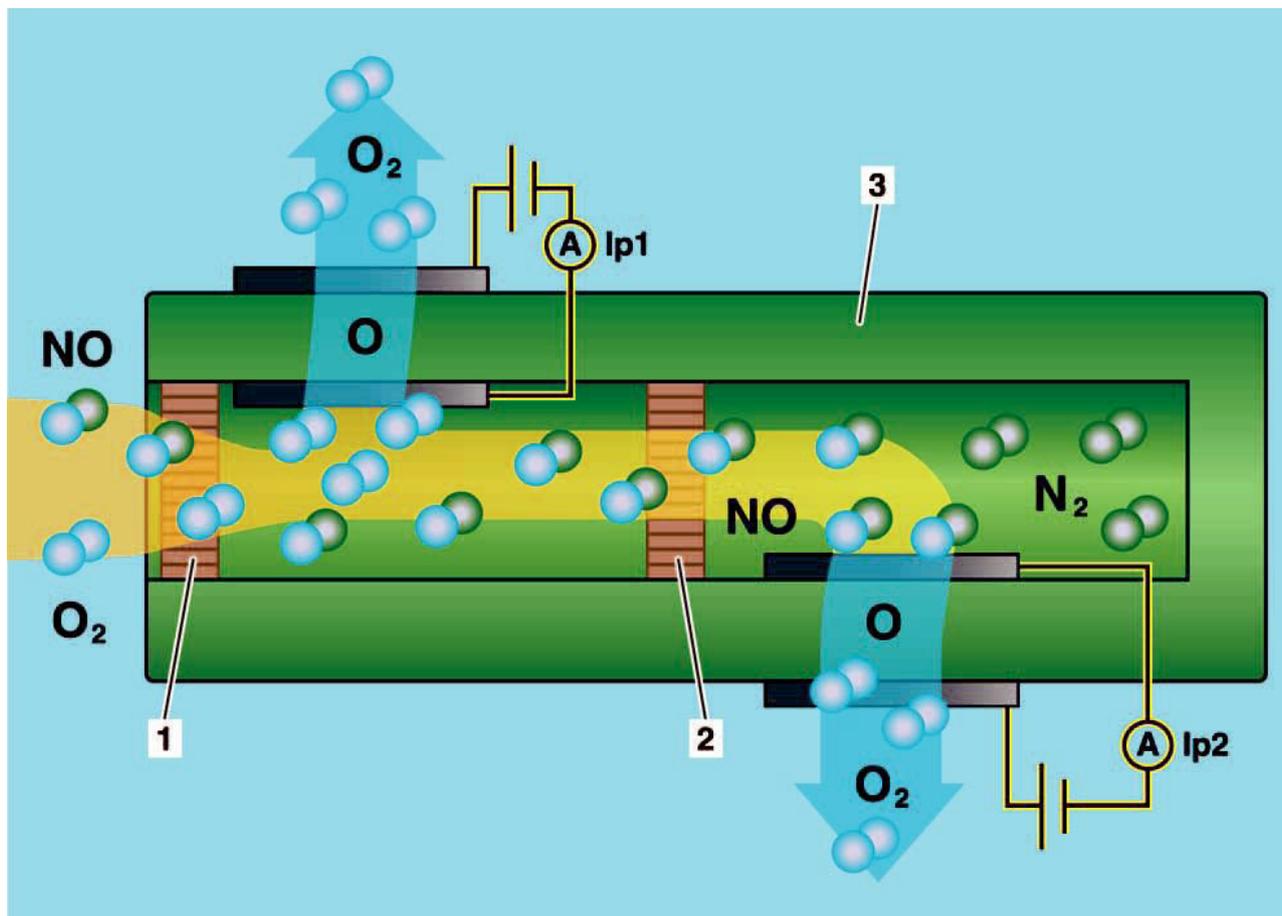
### Exemple du capteur de particules fines Alphasense :

Le capteur de particules fines Alphasense aspire l'air dans le boîtier de manière régulière. Lorsque le rayon laser rencontre les particules dans l'air, il est éparpillé et la lumière ainsi diffractée rebondit sur un miroir convexe, est ensuite captée par un détecteur photosensible et enfin convertie en un signal électrique.

Cette information électrique est interprétée par un algorithme qui transforme les données de lumière diffusée en une information de taille des particules. En fonction du nombre de particules captées par catégorie de taille, on en déduit la masse des particules en microgrammes par mètre cube d'air.

L'infrarouge est utilisé pour éviter toute interférence avec la lumière du jour entrant dans la chambre de mesure (l'intérieur du capteur) et comme les particules sont en micromètre, la longueur d'onde de l'infrarouge est adaptée, car elle est dans la même échelle micrométrique.

Mais le processus de classification de la taille considère que les particules captées sont sphériques, ce qui n'est pas du tout avéré. Il y a donc toujours des incertitudes sur la taille des particules.



## 3.9 Exemple d'étude et de réflexion «G» : la valorisation des gaz

Les gaz à effet de serre (NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>) sont considérés comme étant les «déchets ultimes» de la combustion des hydrocarbures, comme le pétrole. Cependant malgré le rôle du CO<sub>2</sub> dans le dérèglement climatique, ce n'est pas un déchet sans intérêt et il est possible de valoriser ce gaz à effet de serre.

Le problème majeur concernant les gaz à effet de serre n'est pas leur nocivité mais surtout le fait qu'ils s'échappent librement dans l'atmosphère. La première problématique est la captation des gaz et la filtration des particules. Comme nous le montre le Centre d'Etudes des Tunnels (Ministère de l'Environnement), captation et filtration des gaz d'échappement sont déjà opérationnels dans les tunnels routiers : ils sont tous équipés d'un système de ventilation

Dans les années 1990, se sont développés dispositifs de traitement plus complexes pour les tunnels plus longs. L'idée était alors de nettoyer l'air de ces grands tunnels pour les rendre plus respirables et améliorer la visibilité.

Ainsi, par exemple, le tunnel du Mont-Blanc s'est équipé de filtres à particules afin d'améliorer la qualité de l'air dans la vallée de Chamonix.

L'Ineris (expert public pour la maîtrise des risques) a des réponses pour la captation et le traitement des gaz dans un milieu semi-fermé. Une fois capté se pose la question de la valorisation du CO<sub>2</sub> : que faire de ce gaz a priori nuisible ?

La séquestration du dioxyde de carbone est une réponse qui comprend trois principaux procédés :

- les procédés physiques (séquestration industrielle ou valorisation du CO<sub>2</sub> sans transformation),
- les procédés chimiques et,
- les procédés biologiques (phytoséquestration ou séquestration biologique).

### Les procédés physiques.

Ce procédé a beaucoup d'applications comme celles qui consistent à réinjecter le CO<sub>2</sub> capté dans des produits qui l'utilisent, comme les boissons gazéifiées, la neige carbonique, les liquides réfrigérants etc.

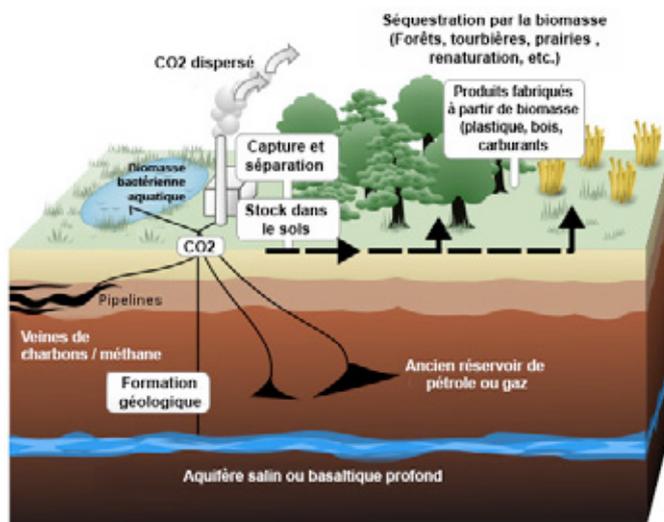
Un autre exemple est la récupération assistée des hydrocarbures : le gaz est réinjecté dans les puits de pétrole ce qui facilite l'extraction des hydrocarbures. Ces opérations utilisent environ 50 Mt de CO<sub>2</sub> par an dans le monde.

Dans ce cas cependant, enterrer le CO<sub>2</sub> ne permet pas de créer de plus-value grâce à la transformation de ce déchet, d'autant plus qu'apparaît illusoire l'exploitation industrielle à terme du produit. En effet, à l'heure actuelle, la séquestration géologique ou océanique ne prévoit pas la réutilisation du CO<sub>2</sub>.

Par ailleurs, toutes les techniques actuelles consistant à enterrer le «déchet» comportent encore des incertitudes liées à de possibles risques.

Dans le cas de l'enfouissement géologique, le CO<sub>2</sub> est comprimé jusqu'à 100 atmosphères pour atteindre un état fluide supercritique, puis il est enterré à environ 1km de profondeur. Les conséquences d'une telle opération sont inconnues sur le long-terme.

Quant à la La séquestration océanique, elle n'est même pas sérieusement envisagée tant l'impact sur la vie océanique est potentiellement destructeur.



*Diagramme représentant la séquestration industrielle (sous-terrain) ainsi que la phytoséquestration*



## les procédés chimiques.

Cette solution permet la valorisation chimique. Le CO<sub>2</sub> est transformé en un produit différent grâce à une réaction chimique. Cette technique consiste à faire réagir le dioxyde de carbone avec des oxydes alcalins afin de minéraliser le gaz à effet de serre (c'est la carbonatation minérale) : on transforme et on stocke le gaz sous la forme de calcaire. Cependant cette technique est très coûteuse et encore en voie de développement.

Par ailleurs, environ 100 Mt de CO<sub>2</sub> par an sont utilisés pour produire de l'urée, qui est ensuite exploitée dans l'agriculture. La recherche se concentre aussi autour de la production de biocarburants comme l'isobutanol.

Ces procédés sont réalisés à partir de plusieurs composants chimiques et nécessitent différentes étapes avant d'obtenir un résultat (hydrogénation, reformage, électrolyse, photo-électro-catalyse, thermochimie etc.).

L'intégration de cette valorisation du CO<sub>2</sub> est complexe et requiert l'industrialisation de plusieurs réactions chimiques à grande échelle.

## les procédés biologiques.

Il existe plusieurs approches pour utiliser la photosynthèse. La première technique consiste simplement à cultiver des fruits et légumes dans une serre enrichie en dioxyde de carbone. Si la concentration de CO<sub>2</sub> double dans un environnement, le rendement des plantes augmente de 33% (B. A. Kimball, Carbon Dioxide and Agricultural Yield: An Assemblage and Analysis of 430 Prior Observations).

D'autres travaux ont montré que des arbres placés dans une concentration de CO<sub>2</sub> doublée grandissent presque 3 fois plus rapidement que dans l'air ambiant, quelle que soit l'espèce de l'arbre (Sherwood B. Idso, Bruce A. Kimball, Tree growth in carbon dioxide enriched air and its implications for global carbon cycling and maximum levels of atmospheric CO<sub>2</sub>). Cette accélération de la croissance végétale permettrait d'introduire des arbres adultes plus rapidement dans des projets d'urbanisme.

De nombreuses études ont été menées depuis plusieurs décennies et par exemple, la startup

Climeworks a conçu un dispositif qui capte l'air ambiant et réinjecte le CO<sub>2</sub> dans des serres, afin d'augmenter de 20% sa concentration en CO<sub>2</sub>

Cependant, leurs machines captent l'atmosphère ambiante tandis que l'idéal est de capter une atmosphère polluée, comme celle que l'on trouve à la sortie des pots d'échappement. La culture de microalgues est un autre moyen de valoriser le CO<sub>2</sub>. Elles poussent plus rapidement dans un environnement riche en CO<sub>2</sub> et peuvent aujourd'hui être converties en biocarburant.

Enfin, les sols sont les plus grands réservoirs de dioxyde de carbone dans le monde, stockant en tout plus de 8500 gigatonnes de carbone organique soit 10 fois plus que dans l'atmosphère. Mais on a vu précédemment que le stockage du CO<sub>2</sub> en profondeur n'est pas une réponse pour le long-terme étant donné les conséquences inconnues sur l'environnement.

Cependant à la surface de la terre et de l'eau, l'injection de CO<sub>2</sub> permet d'améliorer considérablement la biodiversité d'un milieu en accélérant le processus de photosynthèse. La culture de phytoplanctons (les plus grands producteurs de dioxygène sur Terre) existe déjà et constitue un puits de carbone important, ainsi qu'une source intéressante de renouvellement de l'air.

## Commentaires

Parmi les 3 principaux procédés, la ville Liber'terre propose préférentiellement la solution de séquestration biologique qui, en même temps, valorise le déchet.

Celle-ci visant à concentrer et capter ces gaz plutôt que de les disperser en mettant en avant des dispositifs permettant de filtrer les gaz avant rejet dans l'atmosphère dans un souci de protection environnementale.

Le tunnel du Mont-Blanc, est équipé de filtres à particules afin d'améliorer la qualité de l'air dans la vallée de Chamonix. en est un bon exemple.

Cependant, l'architecture structurelle des bâtiments de la ville Liber'terre est ouverte, et non fermée comme les tunnels ; aussi, les solutions diffèrent, d'où l'idée de séquestration du dioxyde de carbone comme réponse à cette problématique.

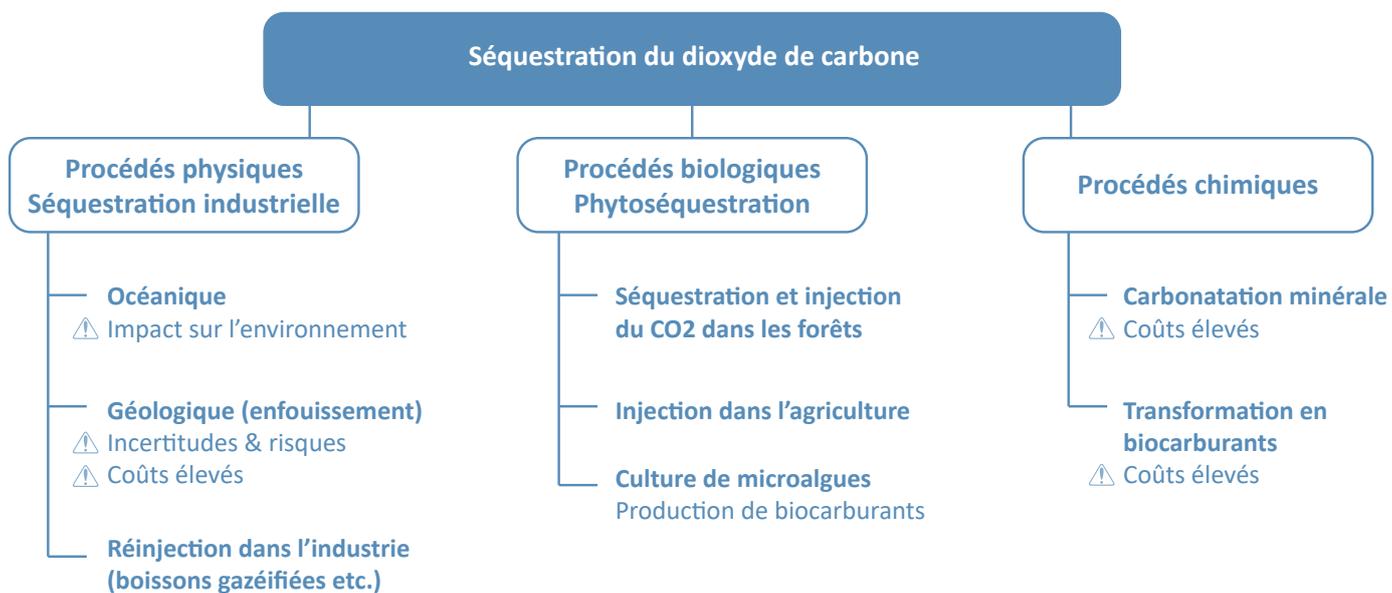


Diagramme des différents types de séquestration du carbone



Une unité de captage/filtrage développée par Climeworks

## 4. Les sols artificiels ; Les routes

### 4.1 Introduction

Les routes et autoroutes françaises forment un ruban bitumineux d'environ 1100 000 km. Les routes communales (700 000 km) et départementales (380 000 km) constituent le plus gros des tronçons. Mais les plus fréquentées restent néanmoins les routes nationales (bien que depuis les lois de décentralisation, certaines d'entre elles soient maintenant sous contrôle des conseils départementaux) et surtout les autoroutes (environ 12 000 km).

Cette artificialisation des sols, indispensables depuis toujours pour assurer communications, échanges et transports, occupe un espace foncier considérable et ne permet pas, malheureusement, l'infiltration des eaux de pluie nécessitant de fait, de gros travaux hydrauliques connexes.

Cependant, les couches de roulement sont constituées généralement de bétons bitumineux. Les bétons bitumineux utilisent un mélange d'hydrocarbures issus de la distillation du pétrole (le bitume) comme liant du squelette granulaire, contrairement au béton hydraulique où c'est le ciment qui agrège l'ensemble.

Il est donc tout à fait envisageable d'intégrer dans le béton, lors de sa phase liquide, toute une série d'appareillages qui valoriseront le sol.

### 4.2 Exemple d'étude et de réflexion «H» : Les capteurs routiers

Une Start-up israélienne (innowattech) propose une « autoroute piézoélectrique » grâce à des cristaux de matériaux piézoélectriques incorporés dans le bitume. Lorsque les voitures roulent sur la route, leurs roues exercent une force qui déforme les cristaux, ce qui permet de générer de l'électricité.

Un tronçon de 1Km produit 200 kilowattheures à raison de 500 voitures par heure. En Italie une portion d'autoroute Venise-Trieste utilise cette technologie pour alimenter l'éclairage des signalisations.

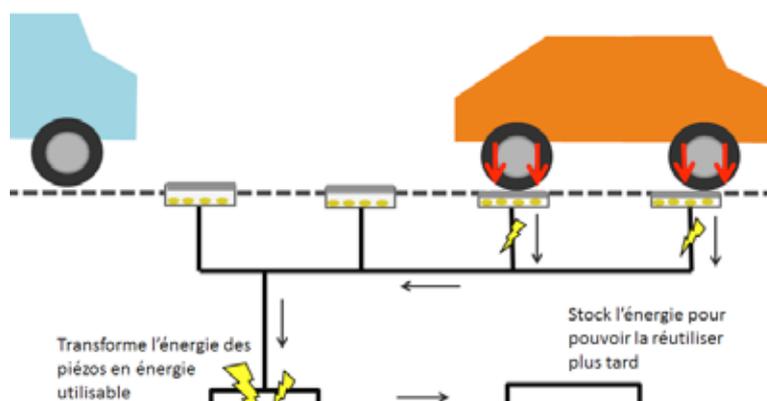


## AUTOROUTE PIÉZOÉLECTRIQUE



### C'est quoi ?

La piézoélectricité consiste à transformer un mouvement mécanique en électricité. L'idée est d'équiper les routes avec un revêtement constitué de plusieurs couches qui permettrait de produire de l'électricité à chaque passage d'un véhicule.



## 4.3 Exemple d'étude et de réflexion «I» : Les capteurs magnétiques

Le bâtiment actif produit de l'énergie électrique. Elle peut être stockée ou consommée en flux tendu. La charge électrique par induction permet de transférer cette énergie sur des véhicules statiques ou dynamiques sans avoir à brancher de câble électrique. Cette technologie tend à diminuer l'importance des batteries dans le développement de la mobilité décarbonnée. La consommation et le recyclage d'éléments chimiques s'en trouvent diminués.

À ce jour la technologie la plus mature pour charger les véhicules sans contact est la charge par induction. Cette technologie est déjà bien opérationnelle et a fait ses preuves (pour les téléphones par exemple), grâce à l'action d'un champ magnétique entre deux bobines.

Si l'on fait passer un courant dans une bobine il génère un champ magnétique qui redonne de l'électricité lorsqu'il passe dans une deuxième bobine. En plaçant chacune de ces boucles sur la voie et sur le véhicule, on transmet l'énergie nécessaire à la charge.

Mais il y a encore quelques obstacles. En effet, les véhicules doivent être équipés de bobines ce qui n'est pas encore le cas et aussi passer par une standardisation des technologies. Ce système ne semble pas pour l'instant très efficace sur autoroute et ne demeure adapté qu'aux voies à vitesse limitée, comme en ville. Le prix d'installation des bobines sous l'asphalte de route reste pour l'instant très élevé (de l'ordre de 700 k€ par km de route).



## 4.4 Exemple d'étude et de réflexion «J» : Charge par induction des véhicules électriques.

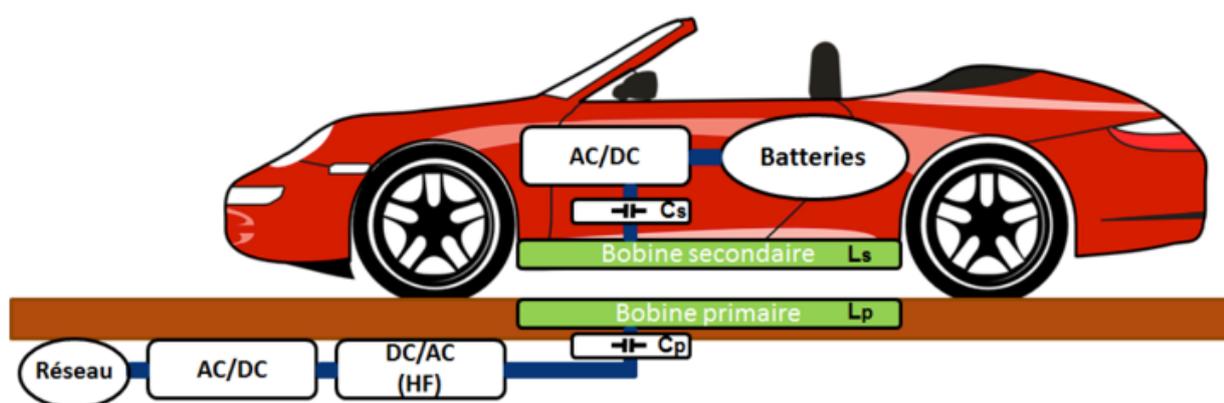
Cette technologie permet de transférer plusieurs dizaines de kilowatts sur des courtes distances (quelques dizaines de centimètres) avec un bon rendement et sans danger pour le corps humain, si un blindage magnétique correctement dimensionné est présent.

Deux plaques métalliques primaires sont placées en regard de deux plaques secondaires homologues, pour constituer deux condensateurs de liaisons à air. Ces condensateurs forment un quadripôle auquel on connecte les convertisseurs primaire et secondaire. C'est donc le champ électrique qui est le vecteur du transfert.

Actuellement, ce couplage capacitif est utilisé pour transférer des faibles puissances (quelques dizaines de watts) sur des petites dis-

tances (quelques millimètres). Cependant des travaux sont en cours pour améliorer cette technique et l'étendre à la recharge de véhicules électriques.

Par exemple, le prototype décrit permet de transférer 2kW par couplage capacitif sur une distance verticale de 15cm et avec un rendement de 85%.



## 4.5 Exemple d'étude et de réflexion «K» : Charge par induction des véhicules électriques et piles à combustion.

Pour les véhicules électriques, les pistes à induction dynamique sont une solution de recharge des batteries en roulant. Elles répondent à une volonté de rendre la mobilité électrique plus efficace. Il n'y aurait donc plus besoin de s'arrêter pour recharger d'où un gain de temps non négligeable.

La société Qualcomm a réalisé 3 prototypes de 3,3, 6,6 et 20kW. Ces prototypes ont été intégrés à des voitures et sont en phase de test. Le prototype 20kW développé en partenariat avec Renault permet de faire de la recharge dynamique, sur des véhicules roulant à 100km/h. Ce prototype a été testé en mai 2017 sur une piste d'essai de 100 mètres construite par VEDECOM à Versailles dans le cadre du projet FABRIC (Figure 2.2). Le primaire est constitué de segments de bobinages placés les uns à côté des autres, comme le montre la Figure 2.2. L'induit (placé dans la voiture) est constitué de 2 bobinages placés l'un à côté de l'autre de 10kW chacun.

De plus en plus de constructeurs automobiles s'intéressent à la charge par induction des véhicules électriques. Des chargeurs destinés à des véhicules particuliers, d'une puissance allant jusqu'à 7kW, sont déjà commercialisés.

Les industriels et les laboratoires travaillent sur des chargeurs rapides par induction et des prototypes de plusieurs dizaines de kilowatts existent déjà. La norme J2954 en cours de préparation par la SAE (Society of Automotive Engineer) a pour but de standardiser la charge par induction des voitures électriques afin de rendre cette techno-

logie viable. Des bus électriques se chargeant par induction existent également. Ces bus se rechargent aux terminus, aux arrêts, voire pendant le déplacement, ce qui permet de réduire le coût et le poids de leurs batteries.

Enfin, il existe plusieurs géométries de bobinages pour transférer la puissance sans contact. Une combinaison de plusieurs bobinages au primaire ainsi qu'au secondaire permet d'améliorer le coefficient de couplage entre le primaire et le secondaire notamment en cas de désalignement.

Le développement de véritables systèmes industriels basés sur ce principe nécessitera de résoudre quelques problèmes d'ordre technologique (matériaux, isolement, refroidissement...) mais l'accès à des puissances de l'ordre de 50kW pour des véhicules de tourisme paraît tout à fait envisageable.

## 4.6a Exemple d'étude et de réflexion «L» : Les couches de roulement ; L'acoustique routière.

Les bruits occasionnés par le trafic routier font partie des nuisances sonores qu'il convient de limiter au maximum.

De façon générale, le revêtement routier doit comporter une structure de surface homogène et avoir le moins possible d'irrégularités de grande dimension afin d'éviter les phénomènes de vibrations des pneus.

A contrario, la couche de roulement ne doit pas être lisse mais au contraire présenter des aspérités de petite taille (inférieure à 1 cm) en quantités suffisantes.

La granularité du béton bitumineux doit être fine, si possible inférieure à 8 mm, l'idéal étant de 3 à 5 mm. Une texture ouverte, avec peu de sable, favorise la circulation de l'air et diminue ainsi l'effet de « pompage » d'air.

Le revêtement doit également avoir une bonne porosité (teneur en vides communicants élevée) afin de disposer d'une bonne capacité d'absorption acoustique et, qui plus est, augmentant avec l'épaisseur de l'enrobé. L'une des solutions est la pose d'un béton bitumineux drainant bi-couche (BBDr bi-couche) qui, en plus d'offrir un potentiel de réduction du bruit très important, réduit également les risques d'aquaplaning car permettant une meilleure évacuation des eaux de ruissellement grâce à la porosité ouverte.

Bien qu'agissant efficacement sur les bruits de roulement et de moteur, cette technique est encore à améliorer surtout en ce qui concerne l'adhérence correcte entre les deux couches

Par ailleurs, les revêtements routiers présentant une texture très ouverte, comme les BBDr,

perdent progressivement leurs bonnes qualités acoustiques initiales et ce, en raison principalement de l'obstruction des pores par la boue, les particules et autres matières huileuses d'une part, et du détachement d'agrégats de la couche supérieure d'autre part,

Sur voirie rapide ou autoroutière, la vitesse élevée des véhicules génère un auto-nettoyage des pores qui maintient relativement bien la performance acoustique de ce type de revêtement dans la durée.

Par contre, concernant la circulation urbaine, il faut procéder à des nettoyages réguliers (deux par an) à l'aide de machines spéciales pour éviter le risque de colmatage. Sans cet entretien régulier, les performances acoustiques se dégradent rapidement (environ 3 dBA après 4 ans).

## 4.6b Exemple d'étude et de réflexion «M» : Les couches de roulement ; L'acoustique routière.

Les revêtements routiers peuvent être réalisés en béton bitumineux mince ou très mince. Traditionnellement non poreux (ils peuvent servir à réparer un revêtement par exemple), existent des variantes dotées de qualités acoustiques spécifiques, comme le béton bitumineux mince discontinu.

Il s'agit d'une couche de 2 à 3 cm caractérisée par un pourcentage assez élevé de gravillons (autour de 70 %), posée à chaud et compactée au rouleau. On peut noter que les surfaces compactées au rouleau sont significativement moins bruyantes que les celles comportant un gravillonnage superficiel.

L'absence d'une classe de granularité permet de diminuer l'épaisseur du revêtement. Cela favorise la création d'interstices, améliorant la porosité du revêtement (qui reste toutefois moins drainant qu'un BBDr) et donc les performances en termes d'absorption acoustique. L'ajout dans le liant d'élastomères ou de fibres de cellulose permet de conserver de bonnes propriétés mécaniques, en dépit de la minceur de la couche.

Les bétons bitumineux minces sont moins résistants aux contraintes tangentielles qu'un revêtement classique : il est donc préférable de ne pas les utiliser aux carrefours, dans les ronds-points, les virages serrés. Le passage sur une chaussée existante classique à du revêtement en couche mince nécessite de réaliser une couche de liaison en plus de la couche de roulement.

Les revêtements poroélastiques sont encore en phase d'essais, mais montrent déjà un potentiel de réduction du bruit particulièrement prometteur, combinant comme leur nom l'indique efficacité acoustique des revêtements poreux et élasticité du matériau.

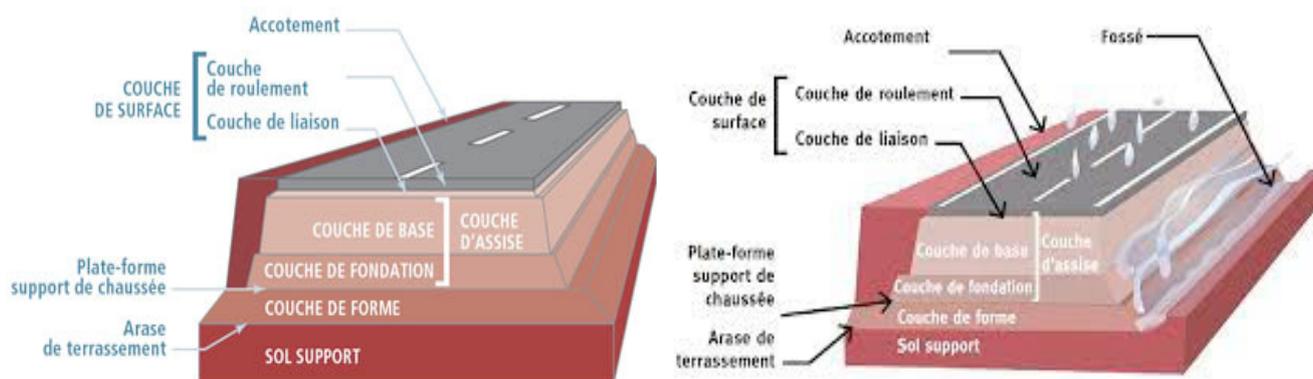
Il s'agit de revêtements à porosité ouverte, capables d'un bon drainage et dotés d'une grande élasticité grâce à une forte proportion de caoutchouc ou d'un autre matériau aux propriétés semblables. Le gain initial réalisé atteint de 7 à 10 dB(A) d'après les premières expériences réalisées au Japon et en Suède, ce qui les rapproche du domaine d'efficacité des écrans anti-bruit.

Par ailleurs, la mise en mouvement élastique des éléments superficiels du revêtement, provoquée par la circulation, empêche les salissures de s'incruster dans les pores, ce qui est un atout majeur pour la durabilité des performances acoustiques.

De nombreuses problématiques entravent les tests pratiques et l'installation de ce type de revêtements. Les problèmes mis en avant sont la qualité antidérapante sur chaussée humide, l'adhérence au support, la résistance au feu ou encore les coûts élevés. Toutefois, les revêtements poroélastiques développés à l'étranger semblent avoir

repoussé suffisamment loin les problèmes signalés initialement pour que des tests en conditions réelles soient à présent réalisés.

## 4.6c Exemple d'étude et de réflexion «N» : Les couches de roulement ; L'acoustique routière.



## 4.7 Exemple d'étude et de réflexion «O» : Coût d'un revêtement acoustique ; Équilibre des investissements routiers.

On constate une tendance marquée au développement de revêtements en couches de béton bitumineux mince ou très mince. La quantité restreinte de matériel nécessaire à leur réalisation rend ces revêtements à la fois financièrement attractifs et plus faciles à renouveler. En France, les BBM et BBTM sont en constant développement.

Pour évaluer correctement le coût d'un revêtement acoustique, Il faut tenir compte de trois facteurs:

- les coûts inhérents à la pose qui dépendent du type de revêtement, de l'épaisseur de la couche supérieure et de l'assise. La pose de revêtements acoustiques présente au final un surcoût qui peut aller de 25 % environ (cas du SMA, de certains enduits de résine synthétique) à 200% voire 300 % environ (cas de la pose de BBDr bi-couches).
- les coûts liés à la maintenance, ils sont liés à la main d'oeuvre et aux machines spécialement mobilisées pour le nettoyage périodique du BBDr par exemple.
- les coûts liés au grand entretien pour le remplacement de la couche supérieure d'un revêtement par exemple.

Une analyse coût-bénéfice s'avère alors nécessaire pour chaque contexte. Une étude danoise fournit des exemples de calculs comparatifs des coûts intégrés sur 30 ans des différentes mesures de lutte contre le bruit pour différents types de voiries. Le tableau ci-dessous en expose les principaux résultats.

		Rue en centre-ville	Bd urbain/ périphérique	Autoroute
Caractéristiques de la voirie (pour 1 km)	Vitesse (km/h)	50	70	110
	Nombre de voies	2X1	2X2	2X3
	Distance entre les fronts bâtis de part et d'autre de la rue (m)	15	32	30
	Nombre de véh./jrs	12000	30000	60000
	% de PL	10	10	10
	Niveau de bruit, 1er étage (dB(A))	68	73	77
	Type d'habitation	Blocs d'appartements accolés, 6 étages, avec des magasins au rdc	Blocs d'appartements accolés, 3 étages	Maisons individuelles
	Nombre d'habitation	665	399	435
Mise en place d'un revêtement type BBDr	Coût sur 30 ans (euros)	296000	360000	477000
	Réduction du bruit (dB(A))	5	6	7
	Coût (euros)/ dB(A)/ habitation	89	150	157
Pose d'écran anti-bruit	Coût sur 30 ans (euros)	Mesure non pertinente (espace insuffisant)	1335000	1590000
	Réduction du bruit (dB(A))	Mesure non pertinente	0-12 (moy. : 3.9)	4-13 (moy. : 8.5)
	Coût (euros)/ dB(A)/ hab.	Mesure non pertinente	851	430
Isolation acoustique des logements	Coût sur 30 ans (euros)	2 685 000	1 607 000	578 000
	Réduction du bruit (dB(A))	9	9	9
	Coût (euros)/ dB(A)/ hab.	449	448	148

## 5. Le soleil ; source d'énergie naturelle inépuisable par rayonnement

### 5.1 Introduction

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel se trouvent notamment les gamma, X, les UV, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnements électromagnétiques véhiculent de l'énergie.

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées.

Une partie de ce rayonnement est filtrée par la couche d'ozone avant d'atteindre la troposphère. Via la photosynthèse il est nécessaire à la plupart des espèces qui vivent sur la Terre. Cette source d'énergie est inépuisable.

### 5.2 Exemple d'étude et de réflexion «P» : Les capteurs solaires

Un panneau solaire est un dispositif convertissant une partie du rayonnement solaire en énergie thermique ou électrique, grâce à des capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques.

On distingue trois types de panneaux solaires :

- les panneaux solaires thermiques, appelés « capteurs solaires thermiques », « collecteurs solaires » ou improprement « capteurs solaires », qui piègent la chaleur du rayonnement solaire et la transfèrent à un fluide caloporteur. La version la plus puissante est dénommée centrale solaire thermodynamique.

- les panneaux solaires photovoltaïques, appelés « modules photovoltaïques », ou improprement « panneaux solaires », conver-

tissent une partie du rayonnement solaire en électricité. Le regroupement de nombreux panneaux solaires à un même endroit est dénommée centrale solaire photovoltaïque.

- les panneaux photovoltaïques hybrides qui combinent les deux technologies précédentes et produisent à la fois de l'électricité et de la chaleur tout en améliorant le rendement des panneaux solaires photovoltaïques en évitant la surchauffe des modules. Cette combinaison peut être considérée comme de la cogénération<sup>1</sup>.

Dans les trois cas, les panneaux sont habituellement plats, d'une surface d'environ 1 m<sup>2</sup> pour faciliter et optimiser la pose. Les panneaux solaires sont les composants de base



### Panneaux photovoltaïques classiques :

Il existe des kits à installer soi-même pour 4500€ à 2,4kWc et des installations de 9kWc posées par des professionnels à 17500€. Au niveau de la rentabilité on estime qu'un panneau solaire classique met environ 3 ans pour pouvoir être rentable. Le rendement de ces panneaux solaires photovoltaïques varie entre 7 et 24%.

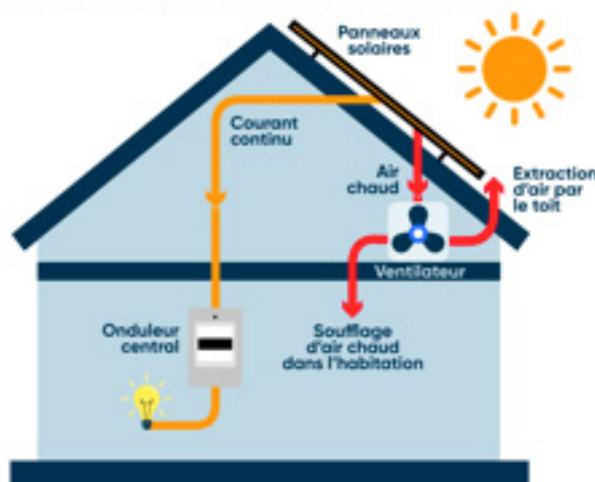
### Panneaux solaires hybrides : le mixte photovoltaïque/thermique

Ils s'alimentent à la fois de la lumière et de la chaleur solaire : panneau hybride ou capteur solaire mixte. Cette solution se révèle être aussi écologique qu'efficace. Ces panneaux permettent d'utiliser intégralement l'énergie collectée grâce à un système ambivalent. Cette technologie permet de gérer simultanément de l'électricité et de l'eau chaude et ainsi parvenir à l'indépendance énergétique.

Il est constitué de capteurs thermiques à haut rendement sur lesquels reposent des cellules photovoltaïques. Ces dernières transforment le rayonnement solaire en électricité, tandis que les capteurs thermiques récupèrent la chaleur émise par le soleil grâce à un fluide caloporteur injecté par un échangeur ou grâce à un collecteur d'eau.

Il peut générer une hausse du rendement à hauteur de 40%. S'agissant d'une solution nouvelle le prix d'achat reste élevé environ 15 k€ pour 12 panneaux pour une production de 3-9kWc ; mais ce coût est vite amorti par les gains de production énergétique.

Fonctionnement des panneaux solaires aérovoltaiques





### **Panneaux solaires photovoltaïques silicium et perovskite**

On sait que les cellules à base de silicium offrent le meilleur rapport efficacité, fiabilité, prix, mais ont des limites. L'idée, déjà exploitée avec les cellules solaires tandem est d'associer silicium et perovskite afin d'obtenir une cellule solaire photovoltaïque tandem efficace et stable.

A ce jour, des chercheurs ont obtenu des résultats où les cellules se sont montrées stables et résistantes à des températures allant jusqu'à 85°C pendant plus de 400h. Elles ont atteint une efficacité de l'ordre de 25% sachant qu'un panneau solaire standard est autour d'un rendement de 15 à 20%.

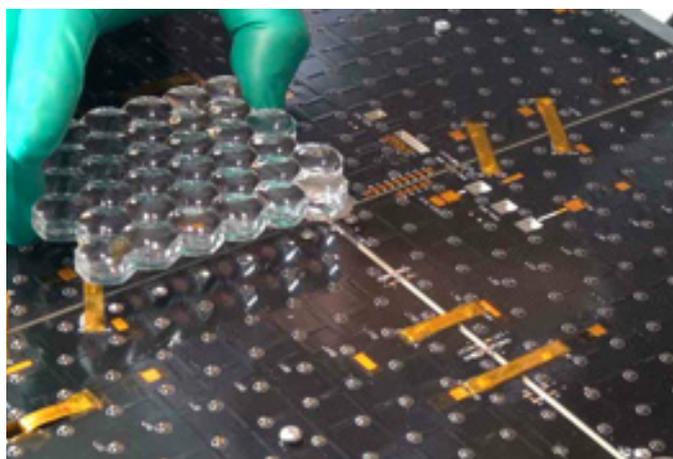
Cependant cette nouvelle technologie traîne encore un surcoût très conséquent.

### **Panneaux solaires photovoltaïques ; Nouvelle approche**

Les chercheurs de La start up suisse INSOLIGHT issue de l'école polytechnique fédérale de Lausanne ont imaginé une nouvelle approche qui permettrait aux cellules solaires de capter la lumière du soleil avec un rendement de 37% au lieu des 15% obtenus avec les panneaux solaires classiques.

C'est un concentré de petites cellules à très haut rendement, disposées sur une grille au dessus de laquelle est placé un réseau de lentilles en nid d'abeille qui prend la lumière et la plie en un faisceau étroit concentré uniquement sur les cellules minuscules.

Leur production de masse et leur commercialisation sont prévues en 2022.



## 5.3 Exemple d'étude et de réflexion «Q» : Lieux de pose des capteurs solaires



En Allemagne, l'idée de « L'Autobahn solaire » est prometteuse. Il ne s'agit pas d'utiliser la route (voir § 4.2) pour transformer une énergie mécanique en électricité mais d'utiliser des panneaux solaires implantés au-dessus de la chaussée.

Les avantages sont multiples : agissant comme un « toit », la protection de la chaussée contre les intempéries en hiver et contre la surchauffe en été est assurée, mais également la récupération des eaux de pluie pour, par exemple, une utilisation agricole.

De plus, l'entretien de la chaussée et la récupération des métaux lourds est simplifiée et, de fait, L'Autobahn solaire réduit le bruit du trafic routier.

Avec ce projet Allemand représentant quelques 337 km<sup>2</sup> de surface de panneaux solaires, une production électrique de 47 TWh est visée. Elle pourrait couvrir le tiers de la consommation de tous les ménages du pays qui compte 83 millions d'habitants. Cependant, le coût total de l'investissement initial est estimé à 100 milliards d'euros, soit proche de 300 euros par m<sup>2</sup>

## 6. Éléments de réponse apportés par la structure de la ville Liber'terre.

### 6.1 Introduction

la ville Liber'terre se positionne clairement dans une perspective d'évolution douce.

En reprenant quelques commentaires et autres analyses développées dans les paragraphes précédents, il est facile de remarquer que s'approcher au plus près de ce qu'a permis l'évolution de la planète, est un exemple à suivre.

Par exemple, Quel « technologie » formidable qu'est (§3.5) la photosynthèse : ce système a été perfectionné sur Terre pendant des milliards d'années, il est donc logique de tenter de s'en inspirer, ou bien encore, la conservation des terres arables, qui sont le meilleur capteur et recycleur de carbone (§3.9) qui soit avec la végétation, ainsi qu'avec l'eau riche en microalgues.

D'autres études, décrites ci-dessous, mettent en avant l'adaptation au plus près des contraintes constructives avec celles de développement durable.



## 6.2 Exemple d'étude et de réflexion «R» : Stockage de l'énergie

Les énergies renouvelables peuvent a priori rendre les logements autosuffisants en terme d'énergie.

Cependant la production d'énergie renouvelable n'est pas constante tout au long de la journée. Qu'il s'agisse d'énergie solaire ou éolienne, il existe des pics et des creux de production. De plus, la consommation est, elle aussi, irrégulière (cf. graphique ci-contre).

L'idée est donc de contrôler l'énergie électrique de manière intelligente : le surplus d'énergie en journée doit être stocké afin d'alimenter les logements lors des périodes où l'énergie solaire n'est plus active. Le stockage de l'énergie en surplus est vraiment un enjeu majeur pour l'avenir des énergies renouvelables !

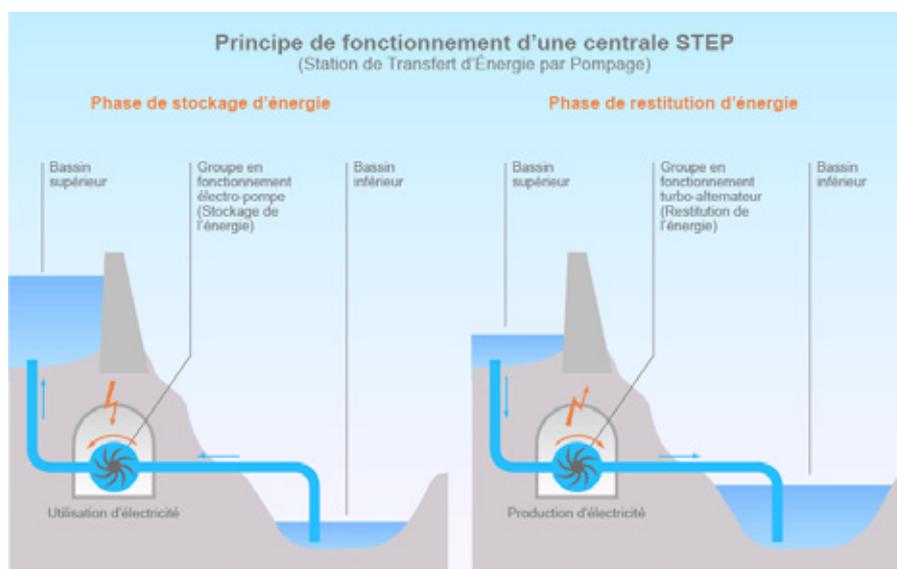
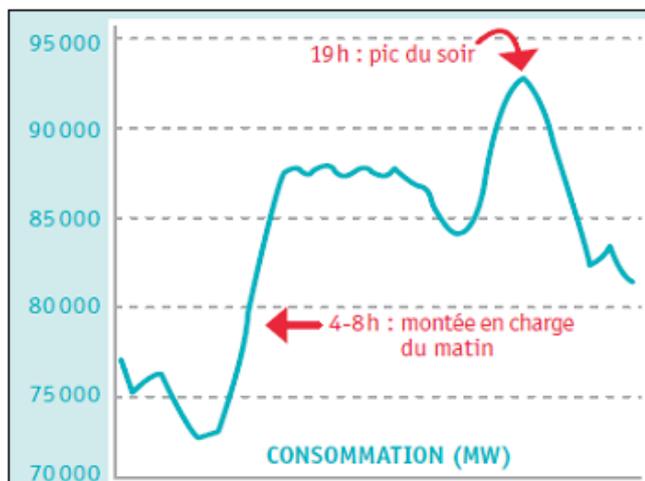
### Stockage de l'énergie par pompage-turbinage

Aujourd'hui la solution de stockage la plus utilisée dans le monde est le pompage-turbinage qui exploite la gravité comme moyen d'accumuler l'énergie : deux bassins sont remplis d'eau à une altitude différente et lorsque la production d'énergie est forte et en surplus, l'eau est pompée vers le bassin haut. A l'inverse au moment où la production est la plus basse, l'eau est relâchée dans le bassin bas et active des turbines.

Le barrage de Grand'Maison est la plus grande centrale de pompage-turbinage en France.

Bien que cette solution permette de stocker proprement l'énergie et de «lisser» la courbe de consommation/production électrique, c'est un système centralisé qu'il faut relier aux foyers et qui exige un relief géographique important, qu'il soit existant ou artificiel.

Diagramme d'une centrale de pompage-turbinage



## Stockage de l'énergie par batteries

Les batteries électriques domestiques sont de plus en plus développées pour stocker l'énergie dans les habitations. Jusqu'à récemment, des batteries au plomb (identiques aux batteries de voitures) étaient utilisées dans les logements équipés de panneaux photovoltaïques. Aujourd'hui de plus en plus de foyers s'orientent vers des batteries lithium-ion, comme le Powerwall de Tesla aux Etats-Unis.

Ces batteries sont plus sûres, plus automatisées et intelligentes : le stockage et la redistribution peuvent être surveillés et réglés par l'habitant et son intégration à une production d'énergies renouvelables est simplifiée. Cependant cette solution ne semble pas être valable au long-terme et à grande échelle dans des logements collectifs : les accumulateurs lithium-ion ne sont pas exempts de risques d'incendies voire d'explosion et ses composants chimiques ne sont pas pérennes.

Néanmoins c'est encore un secteur qui a beaucoup de potentiel étant donné que plusieurs constructeurs automobiles développent des usines de batteries (les «giga factories») et que l'Europe a octroyé 2,9 milliards € en 2021 pour la recherche sur les batteries de nouvelle génération. Les accumulateurs lithium-ion ont donc encore un avenir pour les batteries de petites tailles ainsi que les véhicules électriques, étant donné leur énergie massique élevée.



*Des batteries lithium-ion : une solution efficace pour concentrer de l'énergie dans un volume relativement petit, mais coûteuse et dangereuse à adapter à des logements*

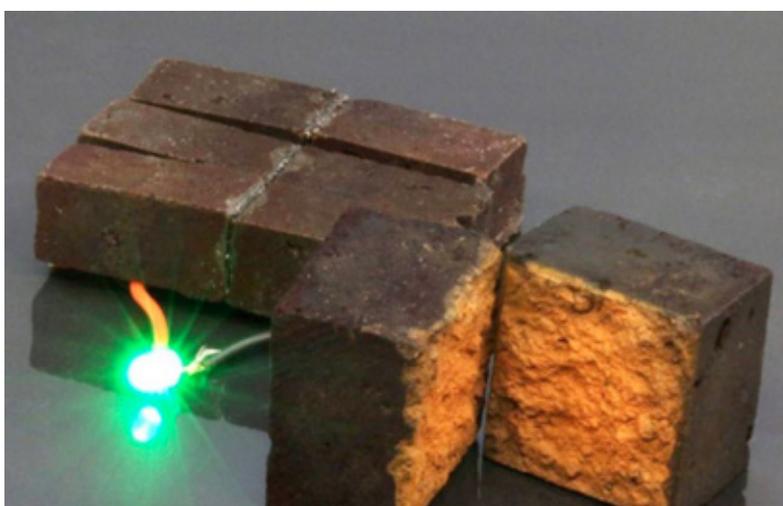
## Stockage de l'énergie : Nouvelle approche

Pour les bâtiments, d'autres solutions plus pérennes sont à envisager.

Des batteries moins denses en énergie et plus stables existent déjà. A l'université de Washington (St.Louis) des chercheurs ont mis au point un matériau de construction capable de stocker de l'énergie électrique. Ils ont exploité la porosité des briques rouges en pulvérisant un polymère conducteur (nommé PEDOT) dans les cavités de la brique. Les briques ont ainsi pu être transformées en supercondensateurs capable de stocker et de redistribuer de l'énergie électrique.

Un telle brique supercondensatrice retient moins d'énergie qu'une batterie lithium-ion (à masse égale) mais est un matériau beaucoup plus stable, moins dangereux et isole les logements tout en étant plus économique.

Grâce à ce système, le bâtiment peut devenir auto-suffisant et intelligent.



*Une brique recouverte du polymère conducteur PEDOT alimentant une LED*

## 6.3 Exemple d'étude et de réflexion «S» : Bâtiments et pièges à sons

En ville il est de plus en plus difficile de fuir les bruits de l'activité humaine. La pollution sonore parvient même jusqu'aux zones reculées, voitures, avions, voisins, klaxons, appareils électroniques... les nuisances sonores parasitent nos vies, parfois au détriment de notre santé et de l'environnement.

Sans surprise, la ville la plus bruyante de l'Hexagone est Paris, où 10% de la population est exposée à des niveaux sonores élevés.

Thierry Lengagne, chercheur en écologie explique «Le bruit généré par une route ne s'arrête pas aux trente mètres de largeur de l'asphalte, il affecte par exemple les oiseaux jusqu'à 1,5 kilomètre de part et d'autre».

La pollution sonore ne pose pas uniquement problème par sa constance et son omniprésence. Elle atteint en outre des niveaux beaucoup trop élevés. Selon des données de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) datant de 2011, environ 40% de la population de l'Union européenne est exposée à des bruits de trafic routier supérieurs à 55 décibels. C'est le seuil au-delà duquel on ressent une «gêne».

Et la situation ne s'arrange pas, la densification du tissu urbain et l'augmentation du trafic routier sont les deux facteurs qui font que l'agglomération francilienne est de plus en plus bruyante.

Cette carte présente en rouge l'origine des axes de concentration de la pollution sonore : les voies de circulation.

Il existe entre la pollution liée au gaz d'échappement et le bruit un lien épidémiologique.

Le stress provoqué par le bruit favorise la fixation de molécules issues de la combustion des moteurs thermiques. La perturbation du sommeil, liée au niveau de décibels, endommage la qualité de la vie.

Enfin il existe une relation entre pollution acoustique et niveau socio-économique des

citoyens. Les effets sont la moindre performance scolaire, une altération de l'état de santé mentale. En bâtissant audessus des voies, le bâtiment actif diminue de -40 dBA le bruit de la circulation automobile.

La pollution sonore a également des effets néfastes sur l'Homme. En plus de causer un risque accru de troubles de l'audition ou des acouphènes (des bourdonnements après une exposition à un bruit très fort), elle peut entraîner des troubles du sommeil allant des réveils intempestifs à l'insomnie.

Sans oublier les troubles psychologiques ou encore les troubles de l'apprentissage chez les enfants.

Les personnes exposées de façon chronique à un niveau sonore trop élevé risquent en outre de développer des maladies cardiovasculaires.

En augmentant la sécrétion de certaines hormones (adrénaline, cortisol), le stress lié au bruit peut en effet provoquer de l'hypertension artérielle ou, dans les cas les plus graves, des infarctus. La pollution sonore due à la circulation ferait ainsi perdre, chaque année, l'équivalent d'un million d'années de bonne santé, selon un rapport de l'OMS.

Pour réduire l'impact sanitaire des nuisances sonores, l'AEE préconise de s'attaquer au problème «à la source, par exemple en diminuant les émissions sonores des véhicules particuliers et en les équipant de pneus à bruit de roulement moindre». Elle appelle en outre les villes à développer les espaces verts, qui absorbent une partie des sons et à repenser «la conception, l'architecture et les transports urbains» pour réduire le bruit ambiant.



type de situation	trafic véhicules/h	Laeq dB (A)	réaction des riverains
à 30 m d'une autoroute 2 x 4 voies	9000	80	plaintes très vives et procès
artère principale d'une grande ville	2000	75	nombreuses plaintes et déménagement
urbanisation moderne	-	70	plaintes et inconfort
immeuble à 60 m d'une autoroute	2000		
rue secondaire en centre ville	500	65	accepté en centre ville et moins en périphérie
immeuble à 150 m d'une autoroute	2000		
petite rue réputée calme	200	60	généralement accepté
immeuble à 300 m d'une autoroute	2000		
immeuble à 500 m d'une route rapide	1000	55	assez calme
façade sur cour en centre ville	-	50	calme
façade sur cour en quartier résidentiel	-	45	très calme

## 6.4 Exemple d'étude et de réflexion «T» : Bâtiments pièges à sons, coque en sous-face

Les immeubles récents sont soumis à la réglementation acoustique RA 2000 qui impose un niveau maximum de 58 dB entre les étages pour les bruits d'impacts et de 45 dB pour les bruits aériens. Le procédé utilisé lors de la construction du bâtiment actif consiste à placer un isolant d'une épaisseur d'environ 18 cm en sous-face de la dalle du parking au-dessus de la chaussée.

Pour mesurer la performance d'un matériau isolant phonique, on calcule donc trois indices :

- l'affaiblissement acoustique ( $R_w$ ) qui indique le niveau de réduction du bruit de l'isolant

face aux bruits aériens. Plus l'indice est élevé, plus le matériau est performant

- l'indice d'efficacité aux bruits ( $\Delta L_w$ ), exprimé en décibels, qui indique le niveau de réduction de l'isolant face aux chocs et enfin,

- le coefficient d'absorption acoustique ( $\alpha(w)$ ) qui indique la capacité de l'isolant à capturer un bruit ou une onde. La mesure s'établit entre 0 et 1. Plus elle est proche de 1, plus le matériau est efficace.

Pour empêcher la propagation des bruits d'impact, il suffit de poser un revêtement sur une sous-couche résiliente, de type fibre de verre, liège ou matériau synthétique. Ces matériaux sont minces (de 2 à 5 mm).

On peut également envisager la mise en place d'une coque munie de capteur d'isolations acoustiques de faible épaisseur constitué de matériaux ignifugés.

La captation des sons et des bruits dès l'origine est réalisée grâce à la mise en place en sous-face du bâtiment d'une coque curviligne, qui agit comme dans une salle de concert. Elle évite les phénomènes de réverbération. La courbe dessinée par la coque évite le renvoi des sons par le non parallélisme des parois entre elles. La perforation de la coque filtre et la couche fibreuse posée en sous face absorbent les bruits.

Les techniques et les matériaux utilisés varient en fonction de la nature des bruits. Par exemple, on peut combler les cavités de la coque par de la laine minérale recouverte d'une natte isolante, de panneaux OSB et d'une couche de flocons de mousse.

Le gain au niveau acoustique dépend de la nature de l'isolant.

Un panneau de laine de verre de 28 mm d'épaisseur permettra d'obtenir un affaiblissement acoustique de 39 dB sous plancher béton.

Le coût d'isolation sous dalle est d'environ 25 à 50 €/m<sup>2</sup>, Les prix variant en fonction de la technique utilisée, de la méthode de pose et du prix des isolants.

## LE BÂTIMENT PERMET DE RETROUVER UN NIVEAU ACOUSTIQUE EXTÉRIEUR DE 45 dBA



TYPE	EPAISSEUR EN MM	PRIX AU M <sup>2</sup>
Panneau semi-rigide laine de verre	28	8,5 €
Dalle caoutchouc	15	30 €
Rouleau de fibre de bois	3	24 €
Plaque de plâtre phonique	12,5	7,5 €
Panneau de laine de roche	12,5	10 €
Plaque mousse de polyuréthane rigide	48	12 €
Plaque de polyoléfine	12,5	30 €
Panneau de liège expansé	60	20 €

## 6.5 Exemple d'étude et de réflexion «U» : Comment diminuer les consommations d'énergie.

En partant du principe qu'il est inutile de produire de l'énergie si le besoin n'est pas ressenti, (un peu comme le risque zéro n'existe que si la cause est éliminée), la ville liber'terre s'attache ici à rappeler quelques principes généraux d'économie d'énergie.

Prescription et coordination pluridisciplinaire des diagnostics techniques

L'isolation thermique des bâtiments Français permet d'économiser l'énergie, mais aussi de diminuer les émissions de CO2 dans l'espace. Il est possible de participer à la mise en place de la loi n° 1442 issue du Grenelle de l'environnement, tout en favorisant l'embellissement des villes.

Nous tenterons de décliner les moyens simples d'amélioration des performances thermiques des bâtiments tout en valorisant la qualité d'usage.



- La chaleur intérieure doit être conservée lors de l'ouverture de la porte :  
Mettre un SAS



- Préchauffer les entrées d'air neuf dans la construction :  
Installer un système de menuiserie type pariéto-dynamique.



- Chauffer les bâtiments :  
Créer des espaces supplémentaires tels que : jardins d'hiver, bow-windows, loggia vitrées, serres, plus simplement par des façades double usage.



- Isoler les murs extérieurs :  
Construire un doublage thermique en maçonnerie de pierre ou de briques.



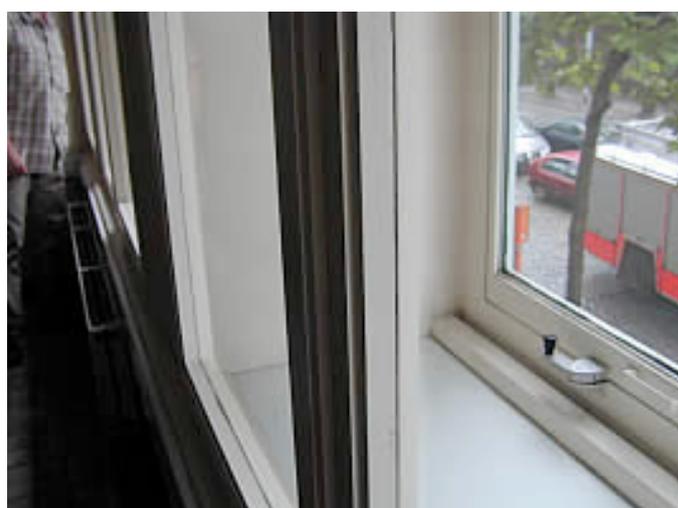
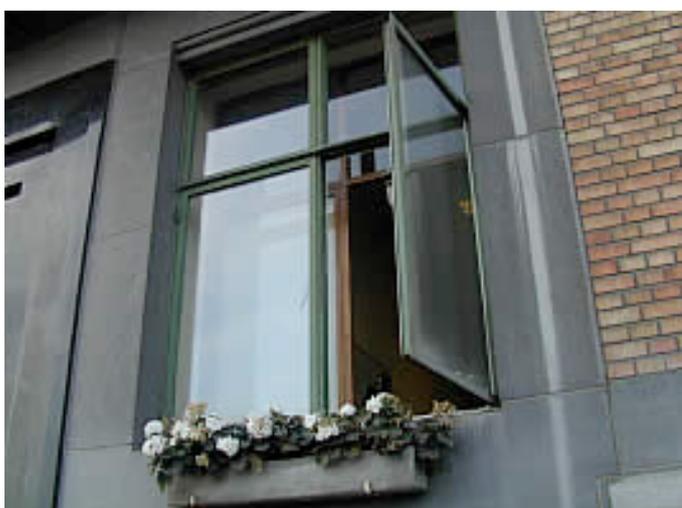
- Calories thermiques par les toitures terrasses :  
La construction des équipements environnementaux; l'installation de panneaux solaires.

- Enfin la création de réseau de chauffage urbain CPCU soit de type géothermique ou issu des centrales de retraitement.

La chaleur intérieure doit être conservée lors de l'ouverture de la porte : Mettre un SAS



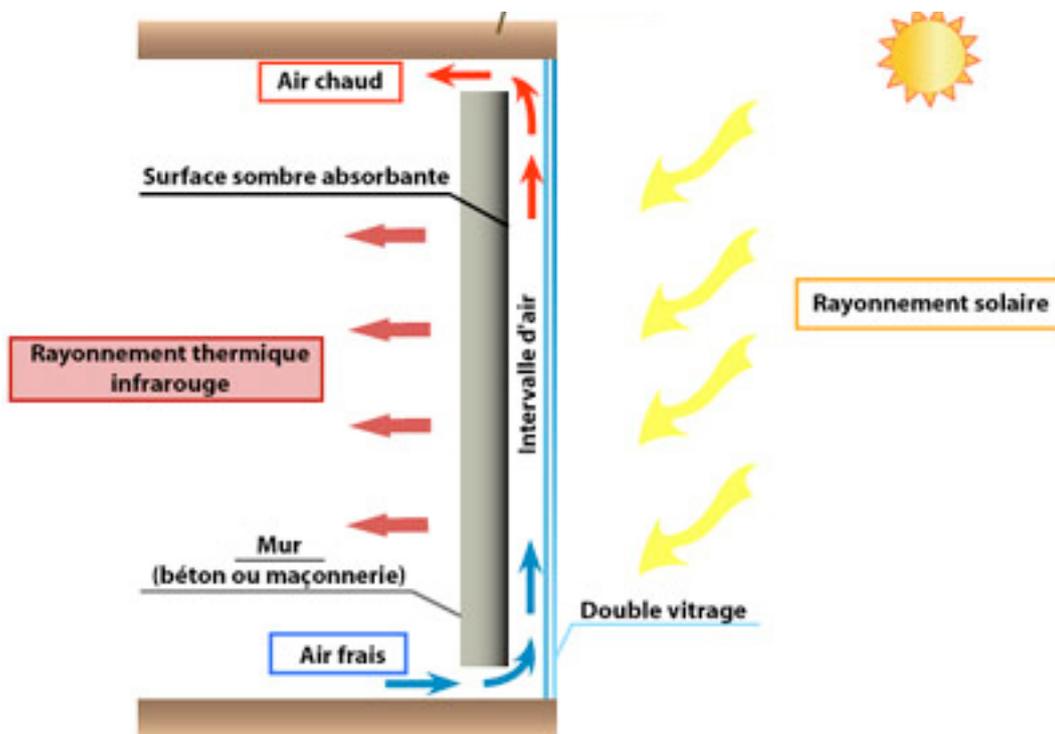
Préchauffer les entrées d'air neuf dans la construction : Installer un système de menuiserie type **pariéto-dynamique** ou une **double fenêtre**.



Chauffer les bâtiments : Créer des espaces supplémentaires tels que : jardins d'hiver, bow-windows, loggia vitrées, serres, plus simplement par des façades double usage.



Isoler les murs extérieurs : Construire un **doublage thermique** en maçonnerie de pierre ou de briques.



Calories thermiques par les toitures terrasses : La construction d' équipements environnementaux : serre, équipements sportifs par exemple, installation de panneaux solaires.



RT 2012 - moteur 8.1.0.0

Résultats | Attestations et RSET | Fichiers ...

Résultats | Historique

au dépôt du permis de construire | l'achèvement des travaux

**Immeuble de logement**

Dép. : 75	Altitude : 77 m	Site : PARIS MONTSOURIS	Bbio : 13.50 points	Cep : 31.20 kWhep/m <sup>2</sup>
Date PC : 14-10-2016	Num. PC : en cours	SRT : 4200.00 m <sup>2</sup>	Bbiomax : 72.00 points	Cepmax : 75.90 kWhep/m <sup>2</sup>

**Conformité du bâtiment**

Bâtiment réglementaire

Bbio : 13.50 points	Cep : 31.20 kWhep/m <sup>2</sup>	Tic : conforme	Coeff. Aepenr : 15.50 kWhep/m <sup>2</sup>
Bbiomax : 72.00 points	Cepmax : 75.90 kWhep/m <sup>2</sup>	Moyens : conforme	

Synthèse Bbio	Synthèse Th-C
<b>BBio chauffage</b> 2.60 points	<b>SRT</b> 4200.00 m <sup>2</sup>
<b>BBio refroid.</b> 0.00 points	<b>Cep chauffage</b> 5.70 kWhep/m <sup>2</sup> 0.40
<b>BBio éclairage</b> 1.60 points	<b>Cep refroid.</b> 0.00 kWhep/m <sup>2</sup> 0.00
<b>BBio ch x 2</b> 5.20 points	<b>Cep ECS</b> 19.60 kWhep/m <sup>2</sup> 0.30
<b>BBio refroid. x 2</b> 0.00 points	<b>Cep éclairage</b> 4.20 kWhep/m <sup>2</sup> 0.14
<b>BBio éclairage x 5</b> 8.00 points	<b>Cep auxiliaires</b> 1.60 kWhep/m <sup>2</sup> 0.05
<b>Ratio psi</b> 0.07 W/(m <sup>2</sup> .K)	<b>Prod. PV</b> 0.00 kWhep/m <sup>2</sup>
<b>Psi9 moyen</b> 0.07 W/(ml.K)	<b>Prod. cogé.</b> 0.00 kWhep/m <sup>2</sup>
Bbio = Bbiomax - 81.25 %	Cep = Cepmax - 58.89 %      GES : 0.89

Consommations annuelles du bâtiment			
		Conso Ef (kWef/m <sup>2</sup> )	Conso Ep (kWep/m <sup>2</sup> )
<b>Immeuble de logement</b>	Total		31.20
	Chauff.	2.20	5.70
	Refroid.	0.00	0.00
	ECS	7.60	19.60
	Écl.	1.60	4.20
	Aux. ventil	0.60	1.50
	Aux. dist	0.00	0.10

## Prescription et coordination pluridisciplinaire des diagnostics techniques

	Surface		U		Déperditions	
Murs	1793	X	0,26	=	466,18	W/K
Toiture	894	x	0,24	=	214,56	W/K
Sol sur vide sanitaire	819	x	0,24	=	196,56	W/K
Sol sut terre-plein	-	x		=		W/K
Fenêtres et portes-fenêtres	601	x	1,5	=	901,5	W/K
Portes	-					
TOTAL	4107		0,15		1778,80	W/K
	SE		D UBAT		DP	

Isolation UBAT	DP	+	D UBAT	=	UBAT	0,58	W/M2.K
	SE						

Ventilation	0,34	x	1,7	x	6415,92	=	3708,40	W/K
			RA		VOL		DR	

Déperditions	0,58	x	4107	+	3708,40	=	6103,25	W/K
	Ubat		SE		DR		DT	

Besoins de chauffage	6103,25	x	0,7	x	0,35	x	66	=	98689,58 kWh/an
	DT		INT		TRA		DH		BES

Besoin par m2 de SDO	35,72 kWh/m2.an							
----------------------	-----------------	--	--	--	--	--	--	--

Charge chauffage pour un T3	15,28 €/ mois							
-----------------------------	---------------	--	--	--	--	--	--	--

### Calcul de l'ensemble de la consommation annuelle du bâtiment

L'ensemble des consommations sont d'origine électrique.

Soit  $31,20 \text{ kWh/m}^2 \times 4200 \times 17\text{c€/kWe} = 22\,277\text{€/an}$  pour tout l'immeuble.

Dans ce cas, nous considérons 50 logements de type T3 soit :

**318.00 € / an / logement ou 27,00 € / mois / logement.**

## Conclusion

Les énergies renouvelables, l'économie et le recyclage des ressources nécessaires à la construction, sont au centre du projet de la structure de la ville Liber'terre.

Que le terme « structure » soit entendu comme la conception architecturale et structurelle du bâtiment lui-même ou tout simplement comme l'organisation du territoire, l'ambition reste et restera de proposer un développement harmonieux du cadre de vie, sans risquer de spolier les intérêts des générations à venir.

**Le livret N°4**, à venir, synthétisera, dans une approche plus réflexive et « philosophique » les moyens à mettre en œuvre pour répondre aux grands enjeux de demain.

# QUE FAIRE ?

FACE AU **RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE**

FACE AU **REFROIDISSEMENT ÉCONOMIQUE**

FACE AU **DÉRÈGLEMENT CITOYEN**

**CETTE QUESTION A ÉTÉ POSÉE AUX :**

PAYSAGISTES  
URBANISTES  
ARCHITECTES

INGÉNIEURS DES  
GRANDES ÉCOLES  
DES INDUSTRIES ET  
CENTRES DE RECHERCHES

MÉDECINS DES SERVICES  
DE SANTÉ PUBLIQUE  
POMPIERS ET SERVICES  
DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE

GROUPES FINANCIERS

**Voici quelques réponses dans le cahier d'étude N°3 le bâtiment actif**

**De la structure à l'environnement : Récupérer l'énergie dynamique pour diminuer  
la consommation d'énergies fossiles.**

## Comment recycler la route



POUR UN URBANISME CONFORME À LA DÉCLARATION UNIVERSELLE DES DROITS DE L'HOMME

«le rapport de la FAP» Fondation Abbé-Pierre

**Étude d'Architecture & d'Urbanisme 2eme Trimestre 2021**  
Synthèse de projets conçu et rédigé par Jean Claude Laisné (E A U)  
46, rue de l'Église - 94500 Champigny-sur-Marne  
www.eauarchitecture.com  
eauarchitecture@orange.fr  
06 74 99 35 31, Paris, 2021