

Solutions béton

Les énergies renouvelables	P. 2
Les éoliennes : l'énergie du vent	P. 3
Les barrages : l'énergie de l'eau	P. 4
La méthanisation : l'énergie des déchets	P. 5
Les fondations géothermiques : l'énergie du sol	P. 7
Valorisation de la chaleur des eaux usées	P. 8



Les solutions béton au service des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont multiples, elles sont issues de phénomènes naturels : soleil, magma terrestre, vent, forces de gravitation, biomasse, océans... Elles sont en pleine expansion, portées par une double pression : l'épuisement programmé des ressources en énergie fossile et la mobilisation contre le changement climatique. Les solutions constructives en béton offrent leurs propriétés et performances pour la construction des ouvrages de production d'énergies renouvelables dans une logique d'Aménagement Durable des Territoires. **Texte : Patrick Guiraud**

Les énergies renouvelables

L'épuisement programmé des ressources en énergie fossile, la mobilisation contre le changement climatique lié au rejet dans l'atmosphère de Gaz à Effet de Serre, les exigences politiques environnementales ainsi que le souhait de s'engager vers la transition énergétique nous imposent de développer des solutions énergétiques alternatives, dont les énergies renouvelables, pour construire la société postcarbone.

Les énergies renouvelables permettent de valoriser des sources locales et décentralisées d'énergie pour répondre de manière durable à de nombreux besoins en termes d'électricité, de chauffage ou de transport (biocarburant).

Elles répondent à des enjeux majeurs :

- réduction des Gaz à Effet de Serre ;
- satisfaction des engagements environnementaux internationaux ;
- lutte contre le changement climatique ;
- diminution de la dépendance de la France aux énergies fossiles ;
- rééquilibrage des modes de production (mix énergétique) ;
- protection de l'environnement et préservation de la biodiversité et des écosystèmes.

Elles s'intègrent et apportent leur contribution à la stratégie de transition énergétique.

La France s'est engagée dans la voie des énergies renouvelables depuis plusieurs décennies.

Le Grenelle Environnement a confirmé cette stratégie.

LES ENGAGEMENTS DE LA FRANCE EN MATIÈRE D'ÉNERGIE

La France s'est engagée vers deux objectifs énergétiques ambitieux.

Le facteur 4

- diviser par 4 les émissions de Gaz à Effet de Serre entre 1990 et 2050.

Nota : cet objectif a été successivement inscrit dans la « stratégie nationale de Développement Durable » en juin 2003, dans le « paquet climat » de juillet 2004, puis dans la loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique de juillet 2005 et dans le Grenelle Environnement en 2008.

Les « 3 x 20 »

D'ici 2020, la France s'est engagée :

- à améliorer l'efficacité énergétique : 20 % de gain ;
- à développer la part des énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie finale : 23 % ;
- à réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre : 20 %.

Ces objectifs répondent :

- aux défis environnementaux et climatiques actuels ;
- à des enjeux d'indépendance énergétique, de sécurité d'approvisionnement et de coût d'accès à l'énergie.

La loi de programmation sur la transition énergétique pour la croissance verte votée en octobre 2014 fixe comme objectifs de réduire de 40 %, d'ici 2030, les émissions de Gaz à Effet de Serre, de les diviser par 4 d'ici à 2050 (par rapport au niveau de 1990) et d'augmenter à 32 % de la consommation nationale en 2030 la proportion des énergies renouvelables dans le mix énergétique. L'objectif de la France est aussi de parvenir à un accord global ambitieux sur le climat lors de la Conférence mondiale sur le climat qu'elle accueillera à Paris en 2015. ■

La transition énergétique

Le développement des énergies renouvelables participe à la logique de la transition énergétique qui correspond au passage d'une société fondée sur la consommation abondante d'énergies fossiles à une société plus sobre et plus écologique.

Cette logique de changement de modèle énergétique suppose en particulier le développement des énergies renouvelables.

Elle vise à aller vers un modèle énergétique qui permette de satisfaire de manière durable, équitable et sûre pour les hommes et leur environnement les besoins en énergie des hommes et de l'économie.

Les enjeux sont :

- **écologiques** : réduire les émissions de GES, maîtriser les impacts environnementaux, lutter contre le changement climatique ;
- **économiques** : réduire notre dépense énergétique, gagner en compétitivité, réduire le gaspillage énergétique, faire face à l'épuisement des ressources, assurer la sécurité des approvisionnements ;
- **sociaux** : maîtriser le prix de l'énergie pour lutter contre la précarité énergétique.

Panorama des énergies renouvelables

Énergie du vent (voir p. 3) – Les éoliennes (terrestres et off shore) transforment l'énergie du vent en énergie électrique.

Énergie hydraulique (voir p. 4) – L'énergie potentielle de l'eau en mouvement est convertie en énergie électrique dans des barrages.

Énergie solaire thermique – Des capteurs transforment l'énergie du rayonnement solaire en chaleur véhiculée par l'eau.

Énergie photovoltaïque – L'énergie photovoltaïque repose sur la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique.

Géothermie – La géothermie couvre l'ensemble des applications permettant de récupérer la chaleur contenue dans le sous-sol ou dans les nappes d'eau souterraines.

Biomasse – Les sources de biomasse dédiées à la valorisation énergétique sont multiples : ■ les plantes oléagineuses (tournesol, colza...) ■ les déchets de l'exploitation forestière et de la transformation de l'industrie du bois ■ les déchets de l'industrie agroalimentaire ■ Les déchets de l'agriculture (résidu de récolte), les déjections animales ■ les déchets verts urbains...

Valorisation énergétique des déchets – La valorisation énergétique des déchets consiste à récupérer le contenu énergétique des déchets par incinération.

Énergie de la mer – La mer recèle des sources d'énergie nombreuses : ■ vagues, houle ■ flux et reflux des marées ■ courants marins ■ énergie thermique (exploitation de la différence de température entre les eaux de surface et les eaux profondes).

Méthanisation (voir p. 5) – La méthanisation est un procédé biologique de dégradation de la matière organique.

Les éoliennes : l'énergie du vent

Le vent nous a donné de l'énergie pendant des siècles, comme en témoignent les multiples moulins à vent utilisés depuis plus de 20 siècles pour le broyage des céréales ou le pompage de l'eau. Désormais, c'est grâce aux éoliennes qui se développent en mer ou sur terre dans le monde entier, que nous bénéficions de cette énergie renouvelable.

Une éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. La force du vent permet la rotation du rotor constitué de 3 pales montées sur un moyeu. L'énergie développée par le rotor est communiquée par transmission mécanique à la génératrice qui transforme l'énergie mécanique en électricité. Le courant produit descend le long du mât de l'éolienne grâce à des câbles électriques, sa tension est ajustée dans une armoire électrique avant d'être injectée dans le réseau. Énergie abondante, inépuisable, non polluante et sans impact sur le climat, l'énergie éolienne affiche la croissance la plus rapide dans le monde en matière d'énergie renouvelable avec le développement de parcs et de champs éoliens sur terre ou en mer.

OBJECTIF AMBITIEUX DE LA FRANCE

La France possède des atouts climatiques et géographiques pour développer une filière éolienne performante. Les lois Grenelle ont fixé le rythme au développement et à la construction de parcs éoliens au cours de la prochaine décennie.

Le parc éolien français a atteint une puissance installée de 8 300 MW à fin mars 2014, ce qui représente plus de 4 % de la consommation électrique nationale. Un objectif de 25 000 MW (dont 19 000 MW pour l'éolien terrestre et 6 000 MW pour l'éolien off shore) est fixé à l'horizon 2020. Pour atteindre ses objectifs, la France devra construire plusieurs centaines d'éoliennes par an au cours des prochaines années.

DESCRIPTION DES ÉOLIENNES

Les éoliennes sont classées en différentes catégories en fonction de leur site d'implantation (terre ou mer), de leur hauteur et du diamètre de leur rotor lié à la puissance électrique produite.

Elles sont composées :

- d'un rotor : ensemble de pales (en général 3) qui captent directement le vent ;
- d'une nacelle : ensemble situé au sommet de l'éolienne qui contient l'installation de génération de l'énergie électrique ;
- d'un mât : structure supportant la nacelle et le rotor (mât en acier ou en béton) ;
- d'une fondation : superficielle (embase poids sans renforcement du sol ou sur sol renforcé) ou profonde sur pieux de gros diamètres.

Les éoliennes terrestres et off shore soumises aux efforts du vent exercés sur les pales et le mât, au poids propre de l'ouvrage et aux effets dynamiques du vent nécessitent des massifs de fondation en béton de grande dimension pour assurer leur stabilité.

Le dimensionnement des éoliennes¹ doit prendre en compte :

- les efforts statiques ou cycliques dus à l'éolienne, à son fonctionnement, aux conditions de vent et éventuellement aux séismes ;
- le respect de tassements différentiels ou totaux compatibles avec le bon fonctionnement de l'éolienne.

1 – Voir Guide du Comité Français de Mécanique des Sols et de géotechnique (CFMS) – *Fondations d'éoliennes : Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des fondations d'éoliennes.*

Des mats d'éoliennes off shore en BFUP

Les mats d'éoliennes *off shore* sont soumis à des sollicitations mécaniques intenses, répétées et cycliques dans un environnement agressif. Les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUP) offrent des performances reconnues pour la construction de ce type d'éolienne en haute mer :

- bon comportement dynamique et en fatigue ;
- résistances mécaniques élevées en compression et en traction ;
- grande résistance aux agressions ;
- augmentation de la durabilité et donc de la durée d'utilisation.

Les mâts d'éoliennes pourraient être composés de voussoirs en BFUP assemblés par des câbles de précontrainte longitudinale par post-tension.

Les mâts d'éoliennes peuvent être constitués d'éléments préfabriqués en béton assemblés sur site :

- voussoirs préfabriqués annulaires et précontraints par précontrainte verticale ;
- voussoirs demi-circulaires assemblés par précontrainte verticale et circulaire.

Ils peuvent être aussi coulés en place à l'aide de coffrages glissants.

L'évolution des technologies permet aujourd'hui le développement de machines de plus en plus puissantes énergétiquement avec des pales de plus en plus longues nécessitant des mâts de plus en plus hauts pouvant atteindre 200 m.

LES ÉOLIENNES TERRESTRES

Élément primordial vis-à-vis de la stabilité de l'éolienne, le massif de fondation (d'un volume courant compris entre 300 et 450 m³ avec des densités d'armatures très élevées, en particulier dans les zones d'ancrage du mât) doit être réalisé avec le plus grand soin. Le béton du massif doit satisfaire en particulier des critères de résistance mécanique et de durabilité.

La fondation est bétonnée en une seule fois sans reprise de bétonnage.

Des précautions doivent être prises pour limiter la montée en température du béton, liée à la chaleur dégagée par l'hydratation du ciment, lors du bétonnage de ces pièces massives, afin de se prémunir d'éventuels risques de réaction sulfatique interne².

LES ÉOLIENNES OFF SHORE

Les éoliennes off shore sont :

- soit ancrées au sol avec trois types de fondations : monopieux métallique fiché dans le sol, embase gravitaire en béton posée sur le sol, structure en treillis ;
- soit flottantes.

Les embases gravitaires en béton sont acheminées sur site par flottage par des remorqueurs depuis leur zone de construction puis ballastées et déposées sur les fonds marins préalablement préparés. ■

2 – Voir Guide technique du LCPC – *Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne.*

Les barrages : l'énergie de l'eau

L'énergie hydraulique consiste à convertir l'énergie potentielle de l'eau en mouvement en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternateur relié à une turbine.



→ Centrale hydroélectrique du barrage de Rizzaneze (Corse).

L'énergie hydraulique résulte d'une technologie fiable et parfaitement éprouvée.

C'est aujourd'hui la première énergie renouvelable en France (90 %) et dans le monde.

Basée sur l'accumulation d'eau, elle est mobilisable instantanément.

Cette production d'énergie peut être obtenue par des usines barrages, des usines au fil de l'eau ou à dérivation. La turbine est située en pied de barrage.

UNE ÉNERGIE STOCKABLE

Certaines centrales sont constituées d'un réservoir haut et d'un réservoir

bas, ce qui permet par pompage-turbinage de stocker, via des stations de transfert, de l'électricité produite en surplus sous forme d'énergie potentielle pour une utilisation ultérieure. Le turbinage des barrages permet ainsi d'utiliser l'énergie d'heures creuses produite par les centrales nucléaires pour la stocker sous forme de potentiel hydraulique et de la réinjecter en période de pointe.

Les barrages sont des ouvrages de Génie Civil particulier :

- par leurs dimensions ;
- par l'ampleur des conséquences que pourrait avoir leur rupture ;

Domaines d'utilisation des barrages

Les barrages sont des ouvrages réalisés au travers d'une rivière ou d'une vallée qui permettent d'accumuler, de maîtriser ou de stocker de l'eau.

Cette eau peut ensuite être utilisée pour :

- la production d'énergie ;
- l'irrigation des cultures ;
- la régulation et l'écrêtement des crues ;
- l'alimentation en eaux potables et industrielles ;
- la lutte contre les incendies ;
- l'aménagement des bassins fluviaux :
 - soutien des étiages : le barrage permet de maintenir un débit suffisant dans le cours d'eau pendant la période d'étiage,
 - maintien de la navigation : l'ouvrage stocke l'eau en période de pluie et alimente le cours d'eau en saison sèche.

- par leur impact sur l'environnement et le paysage ;
- par leur spécificité : chaque ouvrage est un prototype conçu en fonction de son type d'utilisation et des caractéristiques du site.

Les barrages en béton ont contribué au cours des dernières décennies, de façon notable, aux évolutions et aux progrès du matériau béton sur de nombreuses thématiques :

- la technique nécessite de limiter le transport et donc de favoriser l'utilisation de ressources locales ;
- la formulation des bétons pour les barrages est basée sur l'utilisation de granulats de diamètre élevé ;
- les ouvrages étant souvent situés dans des zones climatiques sévères, il a fallu développer des dispositions constructives pour protéger le matériau du gel ;
- ces ouvrages en grande masse nécessitent des méthodologies d'exécution spécifiques pour limiter

les dégagements de chaleur induits par la cinétique de prise du ciment. Le compromis sur le dosage en ciment vise à limiter l'élévation de température en phase de prise tout en assurant des résistances mécaniques suffisantes.

LES ATOUTS DU BÉTON

Les possibilités offertes par les solutions constructives en béton permettent toujours de s'adapter aux spécificités des différents sites à équiper. ■

Différents types de barrages

On distingue différents types de barrages en fonction de la technique de construction et du matériau utilisé :

- barrages poids ;
- barrages à contreforts ;
- barrages voûtes ;
- barrages en Béton Compacté au Rouleau : BCR.

Barrage BCR

La technique du Béton Compacté au Rouleau (BCR) consiste à réaliser des ouvrages en grande masse en mettant en œuvre, par des matériels classiques de terrassement et de compactage, un béton spécialement élaboré, le BCR.

Cette technique analysée et optimisée en France dans le cadre du Projet National BaCaRa a démontré depuis de nombreuses années ses atouts techniques et économiques.

La technique BCR, en associant les performances mécaniques d'un béton à une mise en œuvre par des moyens de terrassement, présente de nombreux avantages :

- rapidité d'exécution permise par les grandes cadences de mise en œuvre et l'absence de coffrage ;
- simplicité de conception : la rapidité d'exécution permet de supprimer ou de simplifier les ouvrages de dérivation et les ouvrages provisoires nécessaires pendant la construction ;
- économie apportée :
 - par la réduction des volumes de matériaux à mettre en œuvre et l'abaissement des délais de réalisation (vitesse de montée des ouvrages particulièrement rapide) et la mise en place par des engins de terrassement,
 - par l'utilisation de matériaux locaux.

La méthanisation : l'énergie des déchets

La méthanisation est un procédé naturel biologique de dégradation de matières organiques contenues dans les déchets (réaction anaérobie en absence d'oxygène) par des micro-organismes (bactéries utilisant la matière organique pour se développer) dans un réacteur (le digesteur), avec des conditions de température et d'humidité contrôlées.

Elle permet de valoriser des matières organiques en énergie renouvelable (le biogaz) et en fertilisant utilisable comme amendement organique (le digestat) en substitution aux engrais chimiques.

Le biogaz permet de produire de l'électricité, de la chaleur, du biocarburant. Il peut être aussi, après traitement, intégré dans le réseau de gaz naturel.

Le potentiel de production d'énergie renouvelable par méthanisation est considérable du fait de son aptitude à valoriser une très grande variété de matières organiques :

- déchets agricoles : lisiers, fumiers, résidus végétaux, déchets de maraîchage et d'horticulture ;
- déchets municipaux : ménagers (déchets alimentaires) et verts (tontes et feuilles issues des jardins privés et publics) ;
- cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) ;
- déchets de l'industrie agroalimentaire ;
- biodéchets des commerces : déchets de la restauration... ;
- boues issues du traitement des eaux usées (STEP) ;

■ effluents industriels : industries pharmaceutiques, chimiques...

La méthanisation permet donc :

Une valorisation des déchets organiques

Le digestat, résidu riche en azote, est valorisé en épandage agricole sous forme de matière fertilisante (amendement organique pour terres agricoles) en substitution à un engrais (substitution d'engrais chimique par un engrais organique).

Une valorisation énergétique

■ Production de Biogaz : composé principalement de méthane (CH₄) pour 50 à 70 % et de 30 à 50 % de dioxyde de carbone (CO₂), utilisé pour produire soit de la chaleur par combustion, soit de l'électricité et de la chaleur par cogénération à des fins énergétique, thermique et électrique, ou transformé en carburant pour véhicule.

■ Production de biométhane : Biogaz épuré par extraction du dioxyde de carbone et de l'hydrogène sulfuré et injecté dans le réseau de distribution de gaz naturel après odorisation et contrôle qualité pour le chauffage, la cuisson et la production d'eau chaude.

LES ATOUTS DE LA MÉTHANISATION

La méthanisation remplit un double objectif, valorisation des déchets organiques et production d'énergie renouvelable.

Elle s'intègre dans le développement d'une économie circulaire appliquée aux déchets organiques. Elle vise à augmenter la part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique régional et développer une énergie d'origine locale.

Elle permet de développer l'autono-

mie énergétique des territoires tout en développant l'emploi local.

La méthanisation connaît un développement accéléré en France depuis :

- la révision des tarifs d'achat de l'électricité cogénérée à partir de Biogaz ;
- la création des tarifs d'achat du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel.

Cette technique vertueuse, qui offre des débouchés aux déchets locaux, présente aujourd'hui des perspec-

Le plan énergie méthanisation autonomie azote : PEMAA

Les pouvoirs publics souhaitent favoriser le développement de la méthanisation au travers du Plan Énergie Méthanisation Autonomie Azote (PEMAA).

Le Plan EMAA vise à :

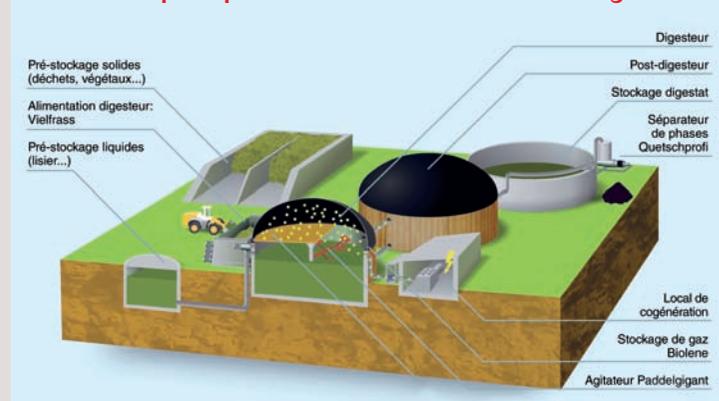
- gérer l'azote (matière première indispensable à l'activité agricole, mais source de pollutions) en valorisant l'azote organique, en particulier celui issu des effluents d'élevage et en diminuant la dépendance de l'agriculture française à l'azote minéral ;
- développer un « modèle français de la méthanisation agricole » pour faire de la méthanisation agricole collective de taille intermédiaire un complément de revenus pour les exploitations agricoles.

Ce plan s'inscrit dans une démarche agronomique fondée sur le respect de l'équilibre de la fertilisation et la réduction globale du recours aux intrants. Il comprend 2 volets complémentaires : Azote et Méthanisation.

Les objectifs du volet Méthanisation visent en particulier à :

- encourager le développement d'installations de méthanisation agricole collectives dans une logique d'ancrage territorial et dans le respect de la diversité des territoires pour atteindre 1 000 méthaniseurs à la ferme à l'horizon 2020 (soit 130 nouveaux projets par an) ;
- encourager la valorisation agronomique des digestats de méthanisation ;
- créer par le soutien à l'innovation une filière française d'équipement de méthanisation ;
- favoriser le développement d'énergie renouvelable ancrée dans les territoires dans une perspective d'agriculture durable et de transition écologique et énergétique.

Schéma de principe d'une unité de méthanisation agricole



tives de développement très intéressantes. Elle occupera une place croissante parmi les énergies renouvelables utilisées par les collectivités locales dans les prochaines décennies.

C'est une solution d'avenir pour contribuer à la transition énergétique et participer à l'émergence d'une économie circulaire ou les déchets deviennent des ressources.

La France s'est fixé des objectifs ambitieux qui prévoient sur une dizaine

d'années la multiplication par 4 de la production d'électricité (625 MW en 2020) et de la production de chaleur (555 ktep en 2020) à partir de Biogaz par rapport à 2010.

LES ATOUTS POUR LE SECTEUR DE L'AGRICULTURE

La production d'énergie renouvelable à partir d'effluents d'élevage et de productions agricoles permet une valorisation énergétique, agronomique et économique tout en

contribuant à l'autonomie énergétique des exploitations agricoles à l'échelle locale.

- traitement des effluents d'élevage ;
- production et valorisation décentralisée d'énergie ;
- diversification des activités agricoles et complément de revenus ;
- économie de fertilisants minéraux ;
- amélioration du bilan gaz à effet de serre des exploitations, directement par la réduction des émissions de méthane liées aux effluents d'élevage et indirectement par la substitution de chaleur, de carburants et d'engrais d'origine fossile ;
- ancrage des exploitations agricoles dans la dynamique de leur territoire.

Nota : depuis février 2013, un décret entérine les dispositifs de soutien à la production et à la valorisation du biogaz en autorisant l'injection de biométhane au réseau de gaz naturel.

LES ATOUTS POUR LES STATIONS DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES

Les stations de traitement des eaux usées produisent des boues qui peuvent être méthanisées, ce qui permet :

- une valorisation des boues issues du traitement des eaux ;
- une production de biogaz valorisable en énergie thermique ou électrique.

Nota : un décret et deux arrêtés publiés au cours de l'année 2014 ouvrent la voie à l'injection du biométhane issu du traitement des boues de stations d'épuration des collectivités locales dans les réseaux de gaz.

LES ATOUTS ENVIRONNEMENTAUX DU BIOMÉTHANE

Le biométhane est une ressource triplement vertueuse pour l'environnement :

- production d'énergie renouvelable : le biométhane remplace le gaz naturel ;
- réduction des émissions de GES ;
- diminution des engrais classiques : le digestat issu de la méthanisation est un engrais organique qui remplace les engrais azotés.

LES ATOUTS DU BÉTON

Les propriétés et performances du béton :

- durabilité,
- résistance aux agressions chimiques...

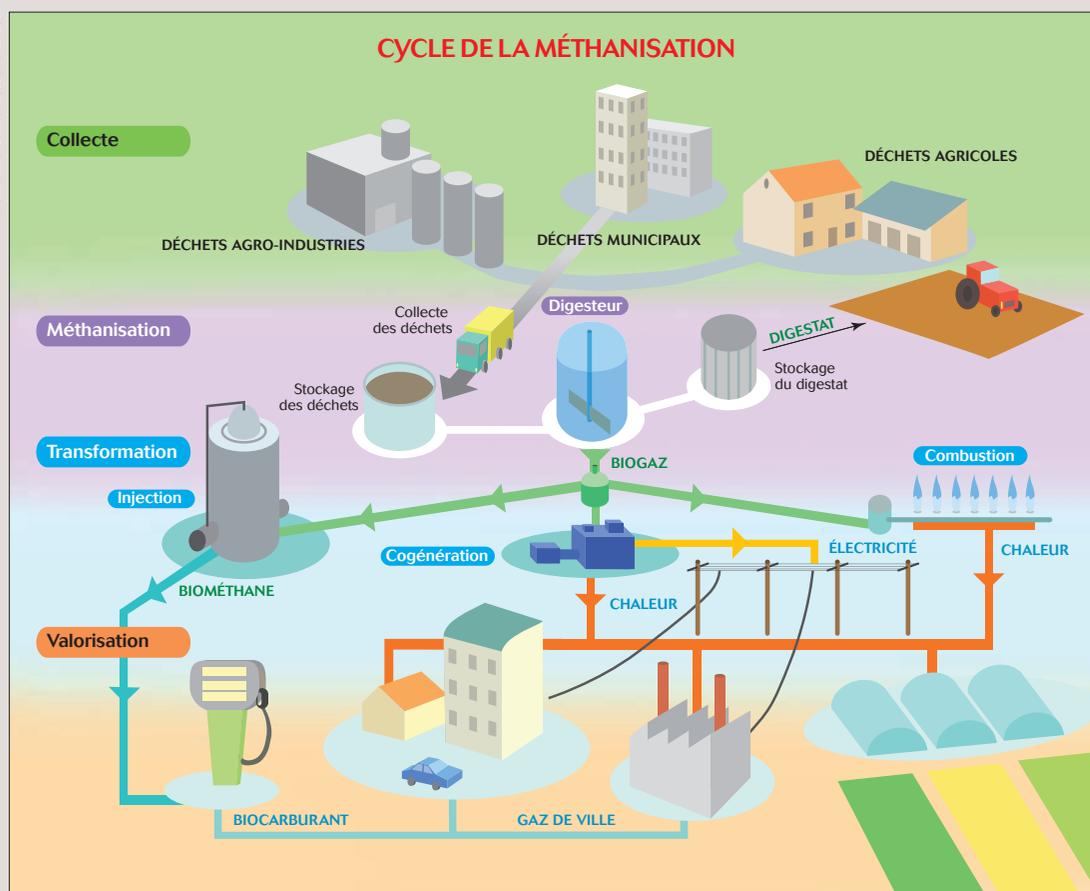
permettent de l'utiliser pour la conception de divers ouvrages du process de méthanisation (aires et fosses de stockage, de déchargement, d'attente et de transfert, ouvrages de maturation, digesteurs, ouvrages de traitement organique, de traitement des eaux...), tout en répondant à des problématiques architecturales. ■

Les différents types d'installations de méthanisation

- Unité de méthanisation à la ferme.
- Unité de méthanisation de déchets ménagers.
- Unité de méthanisation territoriale.
- Unité de méthanisation des biodéchets des activités économiques.

Nota : la taille des installations est très variable et propre à chaque projet. Le dimensionnement résulte d'un compromis entre le gisement disponible de déchets et l'opportunité de valorisation de la chaleur et du digestat.

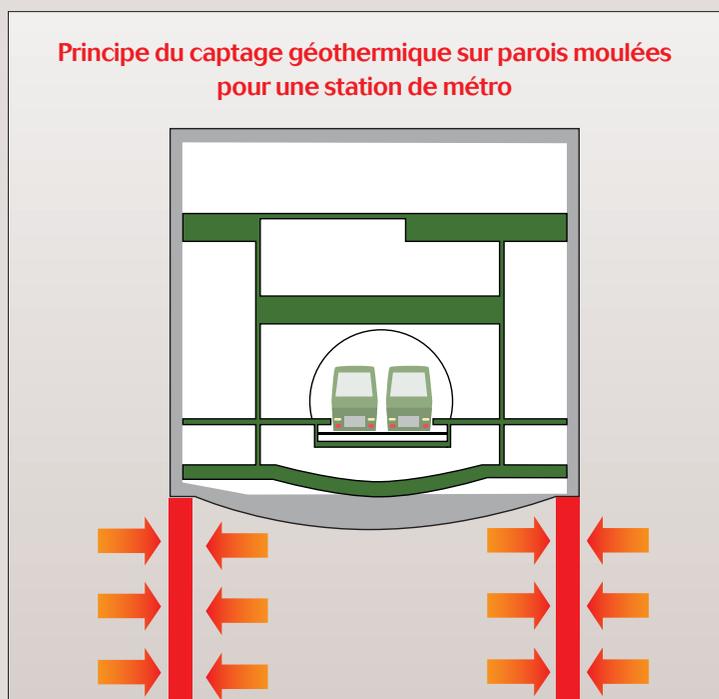
Schéma : Frédéric Olivier



Les fondations géothermiques : l'énergie du sol

Le procédé de captage géothermique consiste à utiliser les fondations d'un ouvrage (pieux, radiers, barrettes, parois moulées) pour assurer son chauffage et son refroidissement.

Schéma : Frédéric Olivier



Le sol, qui est à une température constante (10 à 15 °C), est un lieu de stockage d'énergie que l'on vient :

- puiser pour chauffer le bâtiment en hiver : le sol est dans ce cas une source de chaleur ;
- recharger pour refroidir le bâtiment en été : le sol est alors une source de fraîcheur.

La technique consiste à intégrer un système de tubes géothermiques fixés aux cages d'armatures des fondations de bâtiments ou de structures de Génie Civil, fichées dans le sol jusqu'à quelques dizaines de mètres de profondeur.

Les tubes fixés aux cages d'armatures de la fondation, en usine chez l'armaturier ou directement sur le chantier, sont associés à des dispositifs échangeurs couplés à une pompe à chaleur (PAC). Ils sont tra-

versés par un fluide caloporteur (eau glycolée afin d'éviter les risques de gel). Vecteur d'énergie entre le terrain et la PAC, ils vont permettre d'extraire la chaleur du sol en hiver et la fraîcheur en été en effectuant plusieurs allers-retours au sein de la fondation.

L'échange et la transmission de la chaleur s'effectuent donc en boucle fermée à travers le béton *via* un fluide caloporteur circulant dans les tubes.

UN SYSTÈME RÉVERSIBLE

La PAC a pour fonction de procéder à l'échange thermique entre le circuit primaire (réseaux géothermiques) et le circuit secondaire (réseaux de distribution de l'énergie).

Le système est réversible. Quand les calories sont prélevées dans le sol, elles participent aux besoins en

chauffage de l'ouvrage et en eau sanitaire. Inversement, quand il fait chaud, les calories sont rendues au sol par échange naturel entre les 2 réseaux, elles participent ainsi à la climatisation (refroidissement) de l'ouvrage.

Les tubes sont associés lors de la réalisation des pieux ou des parois moulées sans modifier leurs principes de réalisation :

- cages d'armatures en acier descendues dans le forage préalablement creusé ;
- béton mis en œuvre avec un soin particulier pour éviter d'endommager les tubes.

Le dimensionnement du captage géothermique permet de déterminer la surface de captage nécessaire à équiper en réseaux géothermiques dans les fondations en intégrant les besoins énergétiques, les spécificités de la fondation et les caractéristiques thermiques du sous-sol environnant.

Le débit de fluide caloporteur dans les réseaux géothermiques est déterminé de manière à ce que le régime d'écoulement soit turbulent afin d'augmenter l'échange thermique.

UN VASTE CHAMP D'APPLICATION

La technique couvre un champ d'application potentiel très important en zone urbaine :

- **Bâtiments** : immeubles, ensembles immobiliers, logements collectifs, bureaux, écoles, bâtiments tertiaires, gymnases, hôpitaux...
- **Ouvrages de Génie Civil** : stations de métro, parkings, stations d'épuration, tunnels...

La mise en place de ce type de captage énergétique est en cours de réalisation sur les parois moulées de plusieurs nouvelles stations du métro parisien (prolongements des lignes 12 et 14) et pour des complexes immobiliers.

Dans le cas d'équipement par exemple de stations de métro, le captage énergétique a pour objectif le chauffage et le rafraîchissement des locaux d'exploitation (bureaux, vestiaires, sanitaires) et techniques de la station.

UNE TECHNIQUE EN DÉVELOPPEMENT EN FRANCE

Cette technologie environnementale largement éprouvée depuis de nombreuses années, notamment en Autriche, Angleterre, Allemagne, Suisse, Canada ou en Chine, se développe en France.

Elle contribue à la réalisation d'ouvrages (bâtiments et structures) à basse consommation énergétique voire à énergie positive en assurant les besoins en chauffage et en climatisation et la production d'eau chaude sanitaire et permet donc une valorisation énergétique de ces installations.

Elle offre une valeur ajoutée aux fondations des ouvrages, éléments indispensables pour leur stabilité qui servent de captage énergétique en plus de leur fonction structurelle. Les fondations deviennent un atout énergétique.

Les fondations géothermiques ne nécessitent aucune consommation de foncier supplémentaire : c'est donc une solution très intéressante en milieu urbain dense. ■

Valorisation de la chaleur des eaux usées

Il est désormais possible de récupérer et valoriser la chaleur des eaux usées provenant d'usages domestiques (douche, baignoire, lave-linge, lave-vaisselle...) ou industriels (eaux de lavage...) pour chauffer des locaux ou les climatiser et produire de l'eau chaude sanitaire *via* une pompe à chaleur.

Le dispositif est constitué :

- d'un échangeur de chaleur intégré dans le réseau d'assainissement dans lequel circule un fluide caloporteur (eau glycolée) qui capte l'énergie des eaux usées ;
- d'une pompe à chaleur alimentée par le fluide caloporteur circulant en circuit fermé qui restitue l'énergie en produisant une eau à température souhaitée (40 à 60 °C) permettant d'alimenter le réseau de chauffage ou d'eau chaude sanitaire ou de climatisation.

Les eaux usées, source d'eau régulière constamment renouvelée, présente une température comprise entre 10 et 20 °C. En hiver, elles sont plus chaudes que l'air extérieur, en été, c'est l'inverse.

En hiver, le fluide qui a une température plus basse que les eaux usées se réchauffe.

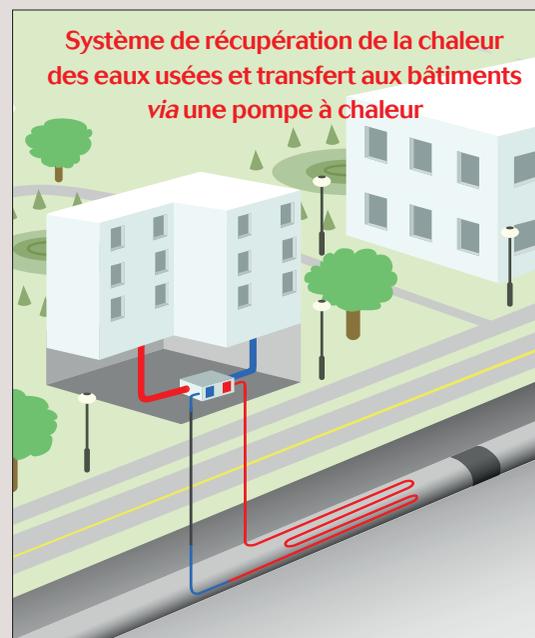
La production de chaleur refroidit le fluide caloporteur qui revient vers l'échangeur pour se réchauffer à nouveau.

La technique est réversible, elle offre la possibilité de climatiser les bâtiments en période de chaleur.

Schémas : Frédéric Olivier



Canalisation en béton équipée d'échangeurs thermiques



Système de récupération de la chaleur des eaux usées et transfert aux bâtiments via une pompe à chaleur

système d'assainissement, ni perturber l'évacuation des eaux usées.

Cette technique peut être appliquée :

- aux eaux transportées par les canalisations d'assainissement ;
- aux eaux traitées dans les stations d'épuration des eaux usées (valorisation en amont ou en aval de la STEP) ;

- aux eaux rejetées par des processus industriels ou agricoles ou des groupes frigorifiques.

UNE SOURCE D'ÉNERGIE LOCALE

Le procédé est adapté à de nombreux ouvrages : immeubles, lotissements, bâtiments commerciaux,

habitats tertiaires, écoles, complexes sportifs, piscines, bâtiments publics, écoquartiers, entreprises, sites industriels. Les eaux usées deviennent ainsi une source potentielle d'énergie locale et renouvelable tout au long de l'année pour satisfaire les besoins en chauffage et en climatisation et en eau sanitaire des bâtiments. ■

LES ATOUTS DES CANALISATIONS EN BÉTON

Les canalisations en béton conviennent parfaitement à l'intégration d'échangeurs thermiques.

Ceux-ci peuvent être disposés directement en usine, en partie basse des canalisations ou de manière hélicoïdale couvrant ainsi l'ensemble de la section de la canalisation.

Le procédé permet donc de capter et valoriser le potentiel énergétique et renouvelable des eaux usées, sans modifier le fonctionnement du

AMÉNAGEMENT DURABLE DES TERRITOIRES



Le béton accompagne le développement des collectivités territoriales

Il offre une multitude de solutions pour :

- mieux vivre,
- mieux circuler,
- mieux protéger la planète.

... tout en s'inscrivant dans **l'économie circulaire**

qui relocalise dans les territoires la valeur ajoutée liée à l'innovation et à la mise en œuvre de l'écologie industrielle.

