

Utiliser et aménager l'espace souterrain



Utilisé depuis longtemps pour de multiples applications (réseaux enterrés, égouts, métros, parkings...), l'espace souterrain favorise aujourd'hui un fonctionnement plus durable des villes qui deviennent de plus en plus denses et compactes. Hors des villes, il permet le stockage de gaz, de pétrole et bientôt de CO₂.

Construction d'un parking souterrain devant l'Assemblée Nationale, à Paris, en France. © Solétanche Bachy



Jean PIRAUD

INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN
PRÉSIDENT DU COMITÉ TECHNIQUE
DE L'AFTEs
ANTEA, ORLÉANS
j.piraud@antea-ingenierie.fr

Lorsque la place a manqué en surface, les hommes se sont mis à construire en hauteur, tout en enterrant certaines activités dans le sous-sol proche : égouts, métros, réseaux divers... Mais l'utilisation du sous-sol est restée longtemps une sorte de pis-aller, considéré comme coûteux et aléatoire, ou réservé à de simples fonctions logistiques. Aujourd'hui, la conjonction des progrès techniques (il n'y a presque plus de « mauvais terrain »), de la crise énergétique et des soucis environnementaux va conduire à multiplier les usages possibles du sous-sol, ce d'autant plus que la ville est grande et la pression foncière élevée.

Dans les villes de France, après des décennies d'étalement urbain incontrôlé – avec des conséquences catastrophiques pour l'environnement – la densification apparaît comme la condition nécessaire à un fonctionnement urbain plus durable ; la « ville compacte » du futur impliquera forcément une utilisation accrue de la 3^e dimension, vers le bas et pas seulement vers le haut.

Hors des villes, les qualités intrinsèques du sous-sol en termes d'isolation, de discrétion, de sécurité et de disponibilité sont particulièrement adaptées à des activités industrielles sensibles, comme le stockage de produits (pétrole, gaz...) ou de déchets (résidus ultimes, CO₂, déchets radioactifs...). Ces qualités du sous-sol seront de plus en plus prisées, car à la campagne on peut choisir plus aisément des sites favorables du point de vue géologique ou topographique, ce qui diminue le surcoût lié au creusement de cavités.

Avantages et usages du sous-sol

QUALITÉS INTRINSÈQUES DU SOUS-SOL

Hormis les caves des particuliers, le sous-sol urbain avait surtout été utilisé depuis la fin du XIX^e siècle pour l'implantation de réseaux divers (adductions d'eau, égouts et métros) ; mais cette utilisation s'est faite un peu par défaut, faute de place en surface. Or le sous-sol possède, en tant que volume potentiel à aménager, un ensemble de qualités propres, évidentes en apparence mais que l'on finit par oublier car ce n'est pas un milieu familier pour les aménageurs, ni attirant pour le public. Donnons la parole à Pierre Duffaut et Monique Labbé [réf. 2008b], respectivement ingénieur et architecte, tous deux promoteurs convaincus de l'intérêt de l'espace souterrain :

► « La **disponibilité** est la première qualité de l'espace souterrain : il est situé à proche distance de toute parcelle... L'accès vertical, facile à mécaniser, est rapide ; sous les reliefs, l'accès horizontal est possible, permettant d'y entrer et sortir sans énergie ;

► Grâce à sa **solidité**, on sait que le sous-sol supporte les bâtiments et ouvrages d'art, mais on sous-estime son aptitude à protéger contre des événements extérieurs ce qui est placé à l'intérieur, et réciproquement ; on sait aussi que les cavités souterraines résistent beaucoup mieux aux séismes que les ouvrages de surface ;

► Son **opacité** lui permet de cacher à la fois ce qui est précieux et ce qui est laid ;

► Ses **propriétés thermiques** deviennent aujourd'hui particulièrement intéressantes :

- une faible conductivité, qui lui confère un grand pouvoir isolant,
- une capacité calorifique qui permet au massif environnant de stocker le chaud et le froid,
- une capacité à fournir de la chaleur, dont le sous-sol profond est un gisement considérable. »

L'espace souterrain se prête aussi très bien aux installations complexes à flux multiples et interconnectés, pour la simple raison qu'en souterrain, l'utilisation de la 3^e

dimension n'implique aucun surcoût : les croisements de flux peuvent être dénivelés sans nécessiter d'ouvrage supplémentaire. Ainsi pour le boulevard périphérique de Stockholm : les échangeurs sont volontairement implantés en souterrain, tandis que les tronçons intermédiaires sont à ciel ouvert.

Bien entendu, toutes ces qualités ne vont pas sans quelques **défauts** :

► Le **statut juridique** du sous-sol est complexe, les droits de propriété imbriqués et le domaine public limité, ce qui ne facilite pas les opérations d'envergure ;

► Les ouvrages souterrains ont un caractère **irréversible**, contrairement aux constructions de surface (on ne peut jamais revenir à l'état initial) ;

► En ville, l'accès au sous-sol profond est souvent entravé par l'enchevêtrement des **réseaux enterrés**, dont la déviation préalable renchérit voire empêche les projets souterrains ;

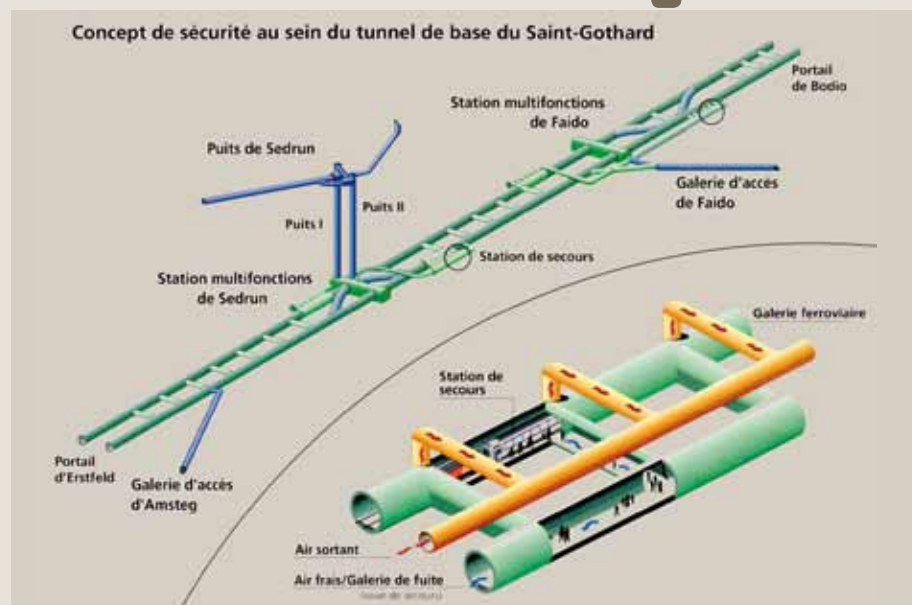
► Pour des ouvrages courants, l'installation ou le passage en sous-sol apparaissent en général **plus coûteux** en termes de construction ; mais on verra que des avantages externes ou de fonctionnement peuvent inverser la comparaison.

Enfin, chacun sait que les grands tunnels sont la voie privilégiée pour franchir les obstacles naturels, qu'il s'agisse de montagnes ou de bras de mer. Les grands

“ Le sous-sol possède des qualités propres que l'on oublie souvent, car ce n'est pas un milieu familier pour les aménageurs, ni attirant pour le public. ”

Fig. 1 : Schéma du nouveau tunnel ferroviaire du Saint-Gothard, en cours de construction (L = 2 x 57 km).

© Antea



LE RENOUVEAU DES TUNNELS TRANSALPINS



Travaux d'accès au tunnel d'Ambin, marqués par plus de 2 m de convergence diamétrale due à l'excès de contrainte. Les grands tunnels transalpins posent de redoutables problèmes aux géosciences. © Artea

Dans la seconde moitié du XIX^e siècle, la construction des réseaux ferroviaires a nécessité un nombre considérable de tunnels, car ce mode de transport ne fonctionne bien qu'avec des pentes inférieures à 2 %, exceptionnellement 3 %. En France, 1 660 tunnels ont ainsi été creusés pour s'affranchir du relief et augmenter la vitesse grâce à des tracés plus rectilignes. C'est à cette époque que furent réalisés les premiers grands tunnels transalpins : Mont Cenis (14 km), Gothard (15 km), Loetschberg (15 km), Simplon (20 km), qui permirent de

relier l'Italie au reste de l'Europe. Cet effort exceptionnel s'acheva pratiquement avec la guerre de 1914-18, hormis le creusement, autour des années 1930, de nouveaux tunnels sous les Pyrénées et les Apennins.

Reprise dans les années 60

La construction de tunnels de montagne ne reprit que dans les années 1960, mais il s'agissait alors de tunnels routiers à vocation surtout touristique : ainsi pour le tunnel sous le Mont-Blanc (13 km), puis sous le Gothard (16 km), le Saint-Bernard, le Tauern, etc. Les Pyrénées furent percées à leur tour par des ouvrages plus modestes (autour de 5 km) : tunnels de Viella, d'Aragnouet, du Cadi, du Puymorens, d'Envalira, du Somport... Ce dernier fut longtemps retardé par une polémique (jugée alors passiste), les habitants craignant que leur vallée ne se transforme en « couloir à camions ».

Des tunnels ferroviaires de base

En fait, leur réticence était prémonitrice, car tous les ouvrages ci-dessus ont été peu à peu submergés par un trafic international de poids lourds source de graves nuisances dans les vallées, de fortes émissions de CO₂, et d'incendies meurtriers dans les tunnels eux-mêmes. L'opinion bascula dans les années 1990, et la construction de tunnels routiers fut abandonnée. La Suisse fut la première à imposer le transfert progressif du fret routier sur le chemin de fer, et entreprit pour cela le creusement de « tunnels ferroviaires de base », pour permettre aux trains lourds de franchir les Alpes à basse altitude. La France, l'Italie et l'Autriche s'engagèrent dans la même voie, ainsi que l'Espagne pour la traversée des Pyrénées (cf. tableau).

Tunnel	Pays	Axe	L (km)	Avancement	Mise en service
Ambin	F - I	(Lyon)-Chambéry-Turin	57	Accès entrepris	2023
Loetschberg	CH	(Bâle)-Berne-Milan	34	En service	2007
Gothard	CH	(Bâle)-Zurich-Milan	57	Travaux en cours	2017
Brenner	A - I	(Munich)-Innsbruck-Vérone	55	Accès entrepris	2020
Koralmb	A	(Vienne)-Graz-Trieste	33	Accès entrepris	2018
Perthus	F - E	Perpignan-Figueras-(Barcelone)	8	Tunnel achevé	2010

tunnels transalpins, qui sont le fruit des progrès conjoints de la géologie et du génie civil sont présentés dans l'encadré ci-dessus ; l'exemple du nouveau tunnel ferroviaire du Saint-Gothard (Fig. 1) montre que ce sont des ouvrages très complexes, de haute technicité.

QUELS AVANTAGES POUR QUELS USAGES ?

L'intérêt d'une solution souterraine dépend naturellement du type d'activité susceptible d'y être installé ; la figure 2 en décline les divers avantages, en distinguant ceux qui touchent à l'environnement, à la sécurité et à l'économie. Une lecture de ce tableau par colonnes conduit aux conclusions suivantes :

- les **avantages environnementaux** sont toujours indiscutables, en particulier grâce à l'espace économisé en surface et au confinement gratuit offert par le sous-sol ;
- pour ce qui est de la **sécurité**, l'avantage du souterrain est d'autant plus net que l'activité est fortement technique, et exige un haut degré de protection. Une seule « tache rouge » dans ce domaine : les risques

liés aux incendies de voitures ou de camions (même transportés sur des trains, comme l'ont montré deux incendies récents dans le tunnel sous la Manche). On retrouve ici la contradiction classique entre un grand tunnel – ouvrage de haute technicité – et l'amateurisme propre aux véhicules individuels ;

- du point de vue **économique**, le creusement d'une cavité ou d'une fouille apporte forcément un surcoût. Mais cette disposition peut devenir un avantage pour des installations qu'il faut absolument isoler et protéger, sous réserve bien sûr de choisir des sites géologiquement adaptés. Par ailleurs, plus le coût du foncier est élevé – comme c'est le cas en centre-ville – plus la comparaison joue en faveur des solutions souterraines.

Le classement des lignes du Tableau 1, ci-après n'est pas anodin : les activités ont été volontairement classées par ordre de **technicité** croissante. Or on constate que plus une activité est technique, délicate et concentrée, plus les avantages du souterrain augmentent.

Tableau 1 : Avantages des solutions souterraines selon le type d'ouvrage ou d'activité

Types d'avantages	Avantages environnementaux			Avantages pour la sécurité				Avantages économiques			
	Ouvrages ou activités	Préservation du territoire	Pollution atmosph. et visuelle	Bruit	Explosion, incendie	Vol, sabotage, guerre	Risques météo	Séismes	Construction	Exploitation	Maintenance
Routes											
Parkings											
Voies ferrées, métros											
Lieux publics (commerce, sport, spectacle, bibliothèque...)											
Réseaux de distribution (eau, gaz, électricité, télécoms...)											
Dépôts de ressources utiles											
Dépôts de déchets											
Centrales (électriques, téléphon., épuration, incinération)											
Installations nucléaires											
Installations militaires											

Avantage très net de la solution souterraine	Avantage net	Avantage léger	Neutre, ou sans objet	Inconvénient léger vis-à-vis d'une solution en surface	Inconvénient important
--	--------------	----------------	-----------------------	--	------------------------

Autrement dit, ces avantages sont d'autant plus nets que l'activité considérée est gérée par des professionnels, et que le public y est strictement encadré. C'est le principe-même de la fourmière, qui ne se conçoit pas sans une spécialisation et une discipline de fer !

LE SOUS-SOL, LIEU PRIVILÉGIÉ DE STOCKAGE

Le sous-sol protège, confine et isole ce qu'il abrite ; il est donc idéalement adapté aux activités de stockage, qu'il s'agisse du stockage temporaire de **produits** (qui ont un prix, et qu'il faut donc préserver), ou du stockage définitif de **déchets**. Ces qualités du sous-sol ont conduit à concevoir deux grandes familles de stockages souterrains (cf. revue Géochronique, 2003).

Les stockages naturels

On profite de structures géologiques adaptées pour y injecter des produits au moyen de forages. Parmi ces stockages inaccessibles à l'homme, on distingue :

- ▶ les stockages de gaz naturel en aquifère, sous des anticlinaux étanches repérés lors de la prospection pétrolière ; il en existe une quinzaine en France, qui servent à lisser les irrégularités de la consommation, voire les aléas des livraisons... (cf. encadré p. 106) ;
- ▶ les stockages inter-saisonniers d'eau chaude dans la nappe, souvent couplés à des pompes à chaleur ; cette utilisation encore marginale pourrait se développer fortement avec la crise énergétique ;
- ▶ le stockage définitif de CO₂, idée en cours de développement qui pourrait permettre de brûler du charbon sans émettre de gaz à effet de serre (cf. encadré p. 107).

Par contre, l'évacuation de déchets liquides toxiques dans des nappes profondes, qui avait été envisagée

dans les années 1980, est maintenant strictement interdite dans tous les pays développés.

Les stockages artificiels

Il s'agit cette fois de stocker dans des cavités creusées par l'homme. Là aussi, on distingue trois grandes catégories :

- ▶ les stockages créés par *dissolution* dans d'épaisses couches de sel, en injectant de l'eau douce par des forages et en récupérant de la saumure ; trois sites du Sud-Est de la France permettent de stocker de grandes quantités de gaz et de pétrole, dans des « bouteilles » artificielles parfois hautes de plusieurs centaines de mètres ;
- ▶ les stockages en *cavités minées*, en général à l'aplomb des ports ou des usines chimiques ; si les roches s'y prêtent, ces stockages sont plus économiques que des réservoirs superficiels dès que le volume d'hydrocarbures à stocker dépasse 100 000 m³ ;
- ▶ les stockages réutilisant d'*anciennes mines* ou carrières, comme celui qui a été exploité dans la mine de fer de May-sur-Orne (Calvados).

LE SOUS-SOL ET L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE

L'industrie nucléaire naît bien sûr du sous-sol, d'où l'uranium est extrait. C'est aussi dans le sous-sol que le cycle de l'uranium s'achèvera, puisqu'il existe un consensus, au niveau mondial, pour évacuer et isoler les déchets radioactifs les plus nocifs dans des formations géologiques profondes, en choisissant des sites exceptionnels par leur stabilité et leur étanchéité (cf. encadré p. 112).

Par contre, pour la production d'électricité nucléaire, le recours au souterrain est resté limité à quelques installations expérimentales (Norvège, Suède, Suisse...), puis à la centrale de Chooz, dans les Ardennes françaises. Pourtant,

LE STOCKAGE SOUTERRAIN DE GAZ NATUREL EN AQUIFÈRE VIERGE DE BEYNES : UN DEMI-SIÈCLE D'AMÉNAGEMENT DU SOUS-SOL

Gilles KIMMERLIN - Conseiller scientifique, GDF-Suez - Direction de la Recherche et de l'Innovation

En 1956, Gaz de France et ELF mettaient en exploitation, indépendamment et pratiquement le même mois, les 2 premiers stockages souterrains de gaz naturel en aquifère vierge : Beynes supérieur dans les Yvelines et Lussagnet dans les Landes ; il s'agissait là d'une double première mondiale. Dédié à la Région parisienne et destiné à assurer l'équilibre entre la production de gaz de ville à partir du charbon et sa consommation, caractérisée par une pointe hivernale due au chauffage, le stockage de Beynes supérieur a connu un riche historique technologique en matière d'aménagement du sous-sol.

Manquant totalement de gisements déplétés sur cette zone, il était venu à l'idée de l'opérateur gazier national d'utiliser une structure anticlinale (*Dogger*) dont l'exploration pétrolière antérieure avait été infructueuse. Les données, disponibles à la Direction des hydrocarbures (DHYCA), consistaient en quelques lâches profils sismiques et une poignée de puits forés jusqu'au Lias avec une colonne lithographique construite sur des déblais de forage (*cuttings*) pour les couches intermédiaires et, pour seule mesure physique en continu, des courbes de polarisation spontanée (PS) et de résistivité, seules diagaphies disponibles à l'époque.

Sur ces bases, qui paraissent maintenant précaires, le stockage souterrain a été développé prudemment, par étapes avec des couronnes de puits d'exploration complémentaire destinés à valider l'extension horizontale et la fermeture de la structure anticlinale (confinement horizontal), ainsi qu'à caractériser la continuité et l'étanchéité de la couverture argileuse assurant le confinement vertical. Compte tenu de la pression d'exploitation des canalisations de gaz de ville, il était inutile d'équiper un stockage dans le Lias, le Wealdien (étage continental du Crétacé) situé à 430 m de profondeur offrant une pression hydrostatique suffisante pour permettre, en période de soutirage (d'octobre à mars), de produire, collecter et traiter le gaz en surface (atelier de déshydratation), puis de l'injecter dans le réseau. Seul un atelier de compression (moto-compresseurs à gaz) était nécessaire pour faire tenir la campagne annuelle d'injection dans la période d'avril à septembre et vaincre l'activité de l'aquifère (*water drive*). Par la suite, les besoins de modulation saisonnière à satisfaire étant à la hausse, la pression minimale d'exploitation du stockage a été abaissée afin d'augmenter le volume de gaz récupérable sur la saison de soutirage (volume utile), conduisant en fin d'hiver à comprimer le gaz, après déshydratation, à une pression suffisante pour pouvoir l'injecter sur le réseau.

En 1973, avec l'arrivée du gaz naturel, le stockage a été "converti" par soutirage ultime du gaz de ville, puis déplacement "piston" du gaz de ville par du gaz naturel selon le grand axe de la structure anticlinale ; une batterie (*cluster*) de puits d'injection de gaz naturel et une batte-

rie de puits de soutirage de gaz de ville ont permis cette opération complexe, encore une première mondiale, de conversion du stockage par "vidage - balayage".

En 1975, le stockage de Beynes profond était mis en exploitation. Situé dans l'aquifère sous-jacent du Séquanien, à 730 m de profondeur et dans la même structure anticlinale se répliquant par homothétie de la surface (où elle est visible) jusqu'au Lias supérieur, il permettra in fine de stocker un total de 1,2 milliard de m³ de gaz naturel sur ce double site d'exploitation.

En 1985, le projet de stockage de chaleur de Thivernal-Grignon (78), projeté par le CEA dans l'horizon du Wealdien, a permis aux exploitants "sous-sol" du stockage de Beynes de prendre conscience des problèmes d'encombrement de l'espace souterrain : la "marée piézométrique" liée à la campagne annuelle d'injection et de soutirage du gaz naturel (quelques dizaines de mètres) était en effet à même de perturber les pompes immergées des puits de soutirage d'eau chaude du doublet de stockage thermique. Quelques réunions entre experts ont permis un dimensionnement robuste de ces ouvrages.

En 1990, nouvel épisode d'encombrement : le puits pétrolier de l'Orme 1, ayant pour cible un nouveau réservoir dans l'Hettangien (Lias), doit être foré à travers les deux stockages de Beynes supérieur et de Beynes profond, quasiment à l'apex de la structuration anticlinale, à travers les deux zones en gaz ! À nouveau, quelques réunions entre experts des sciences du sous-sol "gaziers" et "pétroliers" ont permis d'harmoniser, 6 mois à l'avance, l'exploitation en volume et en pression des deux stockages, de sorte à optimiser le forage pétrolier, particulièrement en matière de "programme boue" (*mud logging*) et de cimentation des cuvelages (*casing*) de sorte à ne pas obérer l'étanchéité verticale des deux réservoirs. Le forage pétrolier s'est fait à une "pression d'équilibre" des deux stockages proche de l'hydrostatique.

Nota : la pression d'équilibre d'un aquifère de stockage pour un stock donné est la pression gaz, stable, d'un gisement de caractéristiques identiques contenant statiquement le stock considéré (*virgin pressure of gas cap*).

En conclusion, il apparaît clairement sur cette rétrospective que la gestion optimale du sous-sol n'est pas un vain mot, elle nécessite le rapprochement anticipé des opérateurs, ainsi que leur bonne entente : deux points à méditer, ne serait-ce que dans le cadre du développement des futurs sites de stockage de CO₂ en aquifères vierges. Les aspects administratifs relatifs notamment au Code Minier, qui n'ont pas été évoqués ici, sont suffisamment complexes et techniques en eux-mêmes pour mériter un développement spécifique.

l'implantation d'un réacteur dans le sous-sol jouit, a fortiori, de tous les avantages qu'offre ce milieu pour des installations industrielles sensibles [Duffaut, 2008a].

Andreï Sakharov, le père de l'atome soviétique, écrivait en 1989, dans sa préface à l'ouvrage de Medvedev : « Je suis convaincu que l'énergie nucléaire est nécessaire à l'humanité. Il faut la développer, mais seulement en

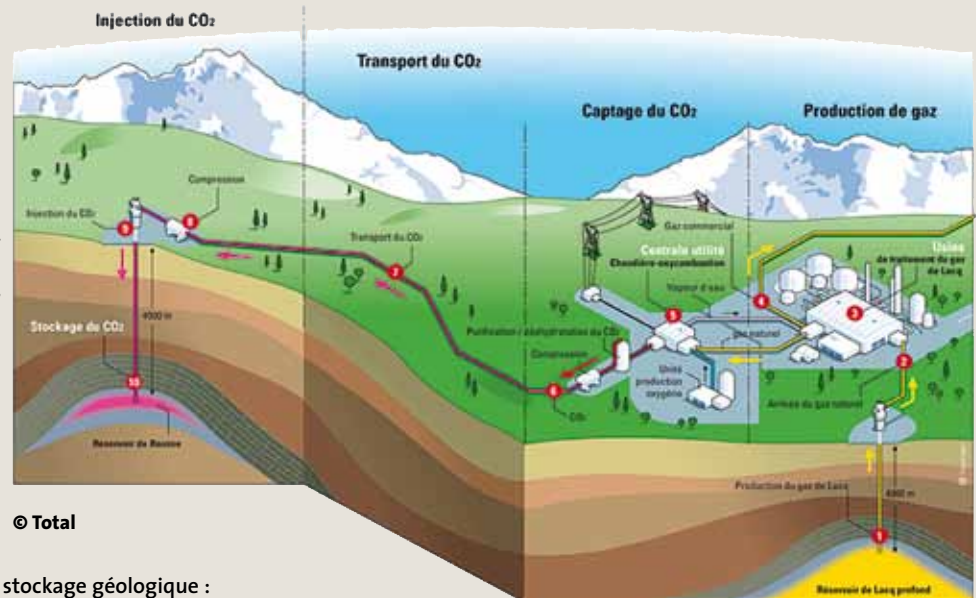
garantissant une sécurité absolue, ce qui suppose que les réacteurs soient installés en sous-sol. Une législation internationale imposant l'implantation des réacteurs sous terre doit être élaborée sans attendre ». Les progrès considérables des travaux souterrains dans les dernières décennies montrent que les réticences d'autrefois vis-à-vis du sous-sol n'ont plus lieu d'être : les Norvégiens ont construit une patinoire olympique dans une caverne

LE PROJET PILOTE DE CAPTAGE ET DE STOCKAGE DE CO₂ À LACQ

Manoelle LEPOUTRE - Total, Directeur Recherche et Développement (Pau) - manoelle.lepoutre@total.com

Le stockage géologique du CO₂

Une majorité d'experts s'accorde pour relier le changement climatique aux émissions de gaz à effet de serre (dont le CO₂) dans l'atmosphère. Pour limiter ces rejets, une des solutions serait de réinjecter le CO₂ dans des stockages géologiques souterrains (voir article p. 28). Cependant, les obstacles ne manquent pas à la mise en œuvre de stockages. En premier lieu, le captage et l'injection s'avèrent coûteux et fortement consommateurs d'énergie : des travaux de R&D sont nécessaires à la réduction des coûts et à l'amélioration de l'efficacité énergétique du captage. Ensuite l'établissement de la faisabilité de l'injection et de la pérennité du stockage est nécessaire.



© Total

Trois types de cibles sont identifiés pour le stockage géologique :

- Des réservoirs de pétrole ou de gaz en fin de vie ;
- Les aquifères salins, constitués de roches perméables saturées d'eau salée impropre à la consommation ;
- Certaines veines de charbon trop profondes pour être exploitées.

Depuis quelques années se développent des travaux de recherche théorique et expérimentale, et des pilotes de démonstration industrielle. De par ses connaissances et ses réalisations, l'industrie pétrolière est bien placée pour mettre en place ces stockages.

Le projet de Lacq, un exemple de pilote de démonstration initié par la compagnie Total

Le projet vise à tester une chaîne complète de captage après combustion, de transport, d'injection et de stockage du CO₂. Les objectifs du démonstrateur sont d'abord de valider et d'optimiser la technologie de l'oxycombustion, avec pour cible la réduction de 50 % des émissions directes et indirectes, et la diminution de 50 % des coûts du captage par rapport aux procédés existants. Ils sont aussi de valider la faisabilité industrielle de l'ensemble de la chaîne. Le projet sert à développer des outils, une méthodologie et des techniques de monitoring pour établir, et démontrer à plus large échelle, la fiabilité et la pérennité du stockage sur le long terme.

Le pilote consiste à produire, par oxycombustion de gaz dans l'une des chaudières existantes, de la vapeur surchauffée, à haute pression destinée aux

industries du site. L'air étant remplacé par de l'oxygène, le CO₂ émis (150 000 tonnes de CO₂ sur deux ans) sera concentré à plus de 90 %. Après dépoussiérage, déshydratation et compression, il sera transporté vers le champ de gaz dépleted de Rousse (à 30 km) où il sera injecté dans le puits (une intervention préalable y est prévue pour installer les équipements de monitoring nécessaires).

Le réservoir (Mano) est un réservoir fracturé, dolomitique de 120 mètres d'épaisseur, situé à 4 500 mètres de profondeur. Il contenait un gaz (avec 4.6 % de CO₂ et 0.8 % d'H₂S) à une pression initiale de 485 barg. Productif depuis 1972, ce champ est maintenant à une pression de 30 barg.

Des actions R&D de collaboration, avec des universités, des instituts (ex : IFP, BRGM, CREGU de Nancy) sont mises en place pour utiliser ce pilote comme terrain d'études et d'expérimentations. Ce projet constitue la première expérience de stockage géologique de CO₂ en France et il nécessite un dialogue constant avec l'administration et les différentes parties prenantes. En effet la définition du cadre réglementaire et l'acceptabilité du captage et du stockage du dioxyde de carbone seront aussi un préalable à la mise en œuvre à grande échelle de cette technologie de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

À son démarrage prévu début 2009, il s'agira de la première réalisation en France de stockage de dioxyde de carbone.

de 61 m de portée ! Le principe de Sakharov pourrait s'appliquer aux installations nucléaires de demain, que ce soit dans des cavernes au rocher ou dans de grandes fouilles remblayées (cf. projet belge MYRRHA).

Les progrès des travaux souterrains

IL N'Y A PLUS DE « MAUVAIS TERRAIN »

Traditionnellement, les travaux souterrains traînent une mauvaise réputation : le sous-sol est censé receler des « vices cachés », source de retards, de tassements en surface, de surcoûts imprévisibles... Les ennuis financiers du tunnel sous la Manche, en dépit de sa réussite technique, ont encore terni son image. Mais cette vision pessimiste est dépassée : on sait aujourd'hui creuser de grands tunnels en maîtrisant les coûts et les délais, sous réserve de faire des reconnaissances suffisamment détaillées, de respecter les règles de l'art pendant les travaux, et de ne pas éluder les incertitudes géologiques. Pour ce qui est des tunnels urbains, deux innovations des années 1980-90 ont complètement changé la donne :

► **Les tunneliers « à confinement »** : ces machines peuvent creuser des tunnels en toute sécurité dans des terrains meubles et aquifères qui auraient nécessité autrefois de coûteuses injections ; elles avancent dans le sol comme de véritables sous-marins, à une vitesse de l'ordre de 200 à 500 m/mois ;

► **Les « injections de compensation »** : sachant que tout tunnel peu profond peut engendrer des tassements, on injecte progressivement un coulis de ciment sous les fondations des bâtiments, au fur et à mesure du creusement du tunnel ; on compense ainsi les tassements préjudiciables avant qu'ils ne se produisent.

Grâce à ces progrès, il n'y a plus d'obstacles techniques à la réalisation de tunnels sous les centres historiques, ni même sous les fleuves, si bien que la solution du tunnel foré s'impose de plus en plus pour les métros. Les tunneliers ont sonné le glas des tranchées couvertes,

qui éventraient autrefois les villes pendant des années, et concurrencent même les viaducs (pourtant moins coûteux) du fait de l'absence d'impact en surface, que ce soit pendant les travaux ou l'exploitation. Ainsi pour la deuxième ligne du métro de Toulouse, dont les 16 km ont été entièrement creusés au tunnelier en dépit de la faible densité du bâti urbain à ses deux extrémités.

LES TUNNELS-RÉSEROIRS DE PARIS

Créer de l'espace souterrain sous forme de cylindres longs peut donc se faire économiquement. Mais les progrès des tunneliers ont aussi donné des idées aux ingénieurs de l'assainissement : pourquoi ne pas utiliser ces machines pour créer du volume souterrain là où on en a le plus besoin, à savoir sous des villes, pour l'écrêtage des plus fortes pluies ? Celles-ci posent un problème majeur, car le sol urbain est devenu totalement imperméable. Ainsi à Chicago, des dizaines de km de tunnels de 10 m de diamètre ont été entrepris pour éviter des inondations, brèves mais catastrophiques. A Paris, un réseau de tunnels-réservoirs est en cours de construction ; leur diamètre (6 m) est surabondant pour les besoins courants, mais ils permettent d'éviter, pendant quelques heures à quelques jours par an, de déverser dans la Seine des flots pollués qui suffiraient à tuer tous les poissons.

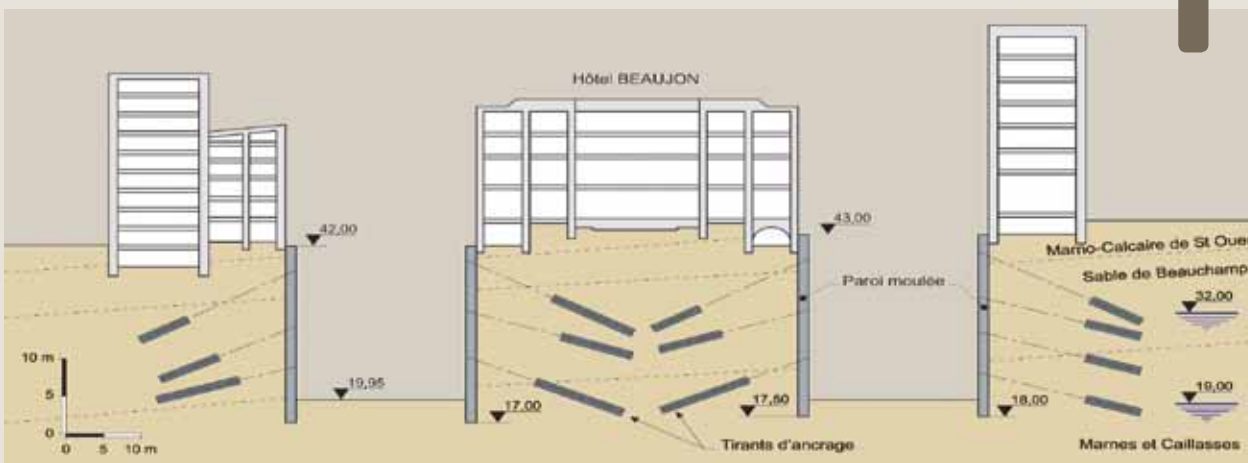
LA MAÎTRISE DES GRANDES FOUILLES

Une autre manière de créer de l'espace souterrain est de creuser de grandes fouilles à ciel ouvert. On utilise le plus souvent la technique des « parois moulées dans le sol », puis ancrées par des tirants dans le terrain en place au fur et à mesure du creusement de la fouille. Cette technique, totalement maîtrisée, permet de creuser des sous-sols dont le volume utile est équivalent à celui déjà bâti en hauteur (Fig. 2 et 3), et ce sans toucher ni endommager les immeubles voisins.

Aujourd'hui, les volumes souterrains ainsi créés servent en général de parkings souterrains pour voitures

Fig. 2 : Création d'espace souterrain dans un tissu urbain dense (fouilles soutenues par parois moulées et tirants précontraints).

© Solétanche-Bachy.





particulières, mais on peut penser qu'à l'avenir on y logera surtout des installations techniques utiles à la collectivité. De même que les grands magasins de Paris sont souvent directement reliés au métro, ces locaux fonctionnels seront desservis par des réseaux souterrains de distribution de biens, mais aussi par des réseaux d'évacuation pneumatique de déchets : ces derniers sont déjà fréquents en Scandinavie, avec en France une première application à Narbonne.

Sous-sol et fonctionnement durable

LES PROMOTEURS DE L'ESPACE SOUTERRAIN

On ne peut évoquer l'intérêt des aménagements souterrains sans rendre hommage à trois précurseurs qui se sont consacrés à la promotion des usages du sous-sol :

- ▶ Edouard Utudjian, architecte visionnaire qui créa en 1932 le GECUS (Groupe d'études et de coordination de l'urbanisme souterrain), puis l'anima inlassablement pendant 40 ans ;
- ▶ Maurice Doublet, préfet de la Région parisienne, qui pilota le premier Schéma directeur d'aménagement de cette région et fonda en 1988 l'association Espace souterrain ;
- ▶ Pierre Duffaut, ingénieur et président d'honneur de cette association, qui a fusionné en 2005 avec l'Association française des tunnels et de l'espace souterrain (AFTES) ; ce combattant infatigable de la cause du sous-sol a inspiré les travaux de nombreux chercheurs soucieux d'imaginer et de promouvoir toutes sortes d'utilisations nouvelles du sous-sol (cf. Brégeon, 1983).

Hélas, les urbanistes français de la deuxième moitié du XX^e siècle ont été débordés par le flot automobile et ne purent endiguer les conséquences catastrophiques de l'étalement urbain qui en résulta... Les Autorités reconnaissent aujourd'hui qu'il faudrait au contraire densifier la ville. Pour contribuer à cet objectif, l'AFTES s'efforce de leur faire prendre conscience des ressources considérables qu'elles pourraient mobiliser dans le sous-sol, afin de favoriser un fonctionnement plus « durable » des grandes villes.

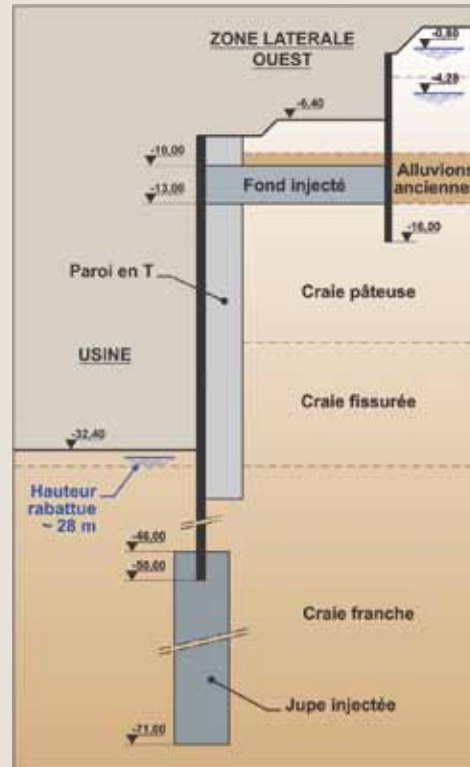


Fig. 3 : Isséane, l'usine invisible pour le traitement des déchets de l'Ouest parisien à Issy-les-Moulineaux (Hauts-de-Seine) est aux deux tiers enfouie, la partie visible fait seulement 21 mètres de haut. Il reçoit, trie, brûle ou valorise 500 000 t/an d'ordures ménagères produites par 1,1 million d'habitants. Le volume utilisé en souterrain, sur une emprise de 3,8 ha, est très supérieur au volume construit en surface. Implantée en bord de Seine, cette usine est entourée d'une enceinte étanche périphérique, qui plonge à 73 m de profondeur pour réduire le débit à pomper en fond de fouille. © Syctom-Isséane

L'ILLUSION DES AUTOROUTES SOUTERRAINES

Dans les années 1980-90, la congestion croissante de la région parisienne suscita une floraison de projets d'autoroutes souterraines à péage (LASER, MUSE...), dont les promoteurs faisaient miroiter aux Autorités une fluidification de la circulation automobile. Après examen, celles-ci jugèrent sagement que ces autoroutes introduiraient inévitablement dans Paris de nouveaux flux automobiles, et que le remède serait pire que le mal. Seul survécut le projet de tunnel Duplex (dit aussi « A86 à l'Ouest »), justifié par son caractère de transit sous l'agglomération de Versailles et qui va ouvrir en 2009.

Lyon offre un contre-exemple parfait avec le tunnel de Fourvière. Cet ouvrage avait été creusé dans les années 1970 pour assurer la continuité de l'autoroute Paris-Marseille à travers Lyon ; mais sa fonction de transit est aujourd'hui complètement occultée par son rôle prin-

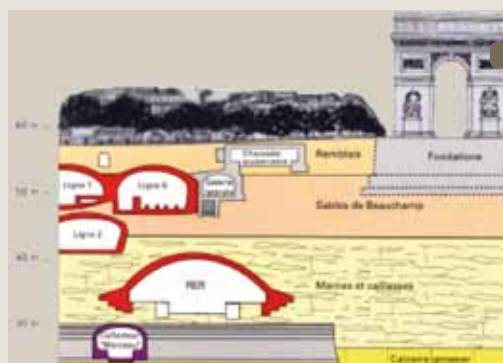


Fig. 4 : Utilisation intensive du sous-sol sous l'Arc de Triomphe à Paris. © Ville de Paris

cipal, qui consiste en fait à injecter dans le cœur de la ville des flots de voitures qu'elle ne peut absorber sans douleur... Inversement, le tunnel autoroutier de Caluire, sur le boulevard périphérique Nord, apparaît comme une déviation utile autour du centre ville.

Paris et Lyon ne font pas exception ; aujourd'hui, la plupart des grandes métropoles ont renoncé aux « pénétrantes » autoroutières d'autrefois et entravent volontairement l'accès des voitures au centre ville, en instituant parfois un péage urbain, comme Singapour, Stockholm, Londres, etc. Elles ne construisent plus d'autoroutes souterraines que pour des fonctions de transit pur, sans débouchés dans le centre ville : ainsi pour les voies sur berge de Cologne et Düsseldorf, qui ont permis la reconquête des quais par les habitants, ou encore la Central Artery de Boston, le boulevard périphérique M30 à Madrid, etc.

LA RECONQUÊTE URBAINE GRÂCE AUX TRANSPORTS PUBLICS

Le début du XXI^e siècle est caractérisé par une prise de conscience générale des ravages de l'automobile dans les grandes villes. En Europe, les pays germaniques ont montré la voie avec 20 ans d'avance grâce à des transports publics de plus en plus efficaces, selon une hiérarchie que la France commence juste à comprendre et à imiter. Schématiquement :

- ▶ dans les villes de 200 à 300 000 habitants, les voitures sont détournées des rues du centre que se partagent piétons et tramways ;
- ▶ entre 300 et 700 000 habitants, les trams et les piétons deviennent trop nombreux pour cohabiter et on doit alors enterrer les trams, avec un double bénéfice : on

parachève la reconquête urbaine au profit des piétons tout en accélérant les trams, qui traversent le centre comme des quasi métros, puis ressortent en surface en se ramifiant pour desservir la banlieue ;

▶ au dessus de 700 000 habitants, le trafic est tel qu'on doit compléter le réseau de trams par de vrais métros, entièrement souterrains donc plus coûteux, mais avec des rames plus longues et plus rapides.

Aujourd'hui, l'Allemagne compte 21 villes équipées de métros ou de trams souterrains. En France, il n'y en a que 7 : Lille, Rouen, Paris, Rennes, Lyon, Toulouse, Marseille. On essaie de rattraper le temps perdu, en privilégiant les solutions peu coûteuses comme le tram de surface. Mais ces efforts louables ne sont pas toujours à la hauteur des besoins : à Paris, la densité de la banlieue est telle que des trams seront forcément trop lents ou sous-dimensionnés : seule une desserte par métro souterrain sera à même de renverser la tendance (c'est-à-dire de convaincre les gens d'abandonner leur voiture). C'est bien ce que prévoit le projet de double rocade souterraine annoncé début 2009 dans le cadre du réaménagement du Grand Paris (cf. Fig. 5).

Pour conclure, on peut se réjouir que les premières années du XXI^e siècle aient vu une prise de conscience générale des impératifs écologiques, qu'il s'agisse de réduire les effets de serre ou le trafic automobile en soi. Une utilisation plus intensive de l'espace souterrain pour les activités humaines pourra contribuer utilement à ces objectifs : la « ville durable » du futur sera plus compacte et ne pourra se passer de son sous-sol. ■

“ La ville durable du futur sera plus compacte et ne pourra se passer de son sous-sol. ”

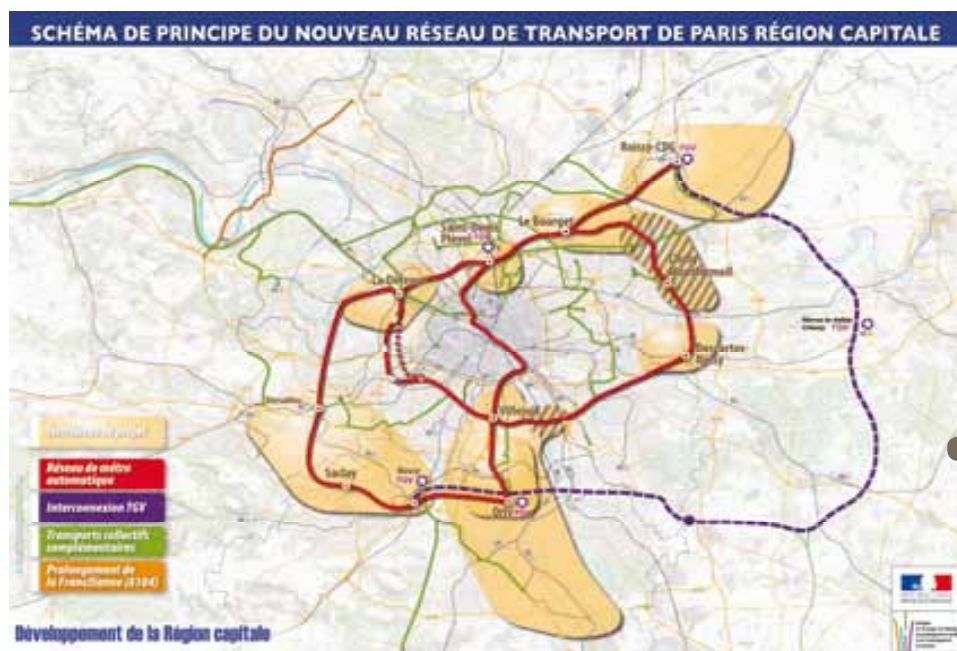
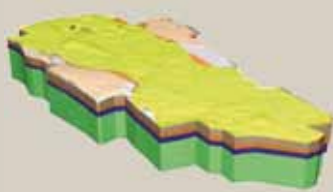


Fig. 5 : Esquisse du nouveau réseau de métro automatique à construire dans le cadre du « Grand Paris Région Capitale », qui comportera la réalisation d'ouvrages souterrains.

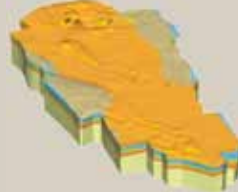
© MEEDDAT

MODÉLISATION 3D DU SOUS-SOL POUR LE SITE DES JEUX OLYMPIQUES 2012 À LONDRES

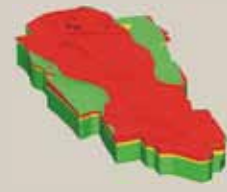
Katherine R. ROYSE - géologue en chef, British Geological Survey (BGS)



(A) Modèle géologique : les zones de tourbe (marron) sont surmontées de dépôts d'alluvions (jaune), de dépôts de terrasse fluviatile (orange) et de dépôts anthropiques (gris). L'assise rocheuse est constituée de dépôts paléogènes (orange, bleu et rose) avec une formation crayeuse sous-jacente (vert).



(B) Variation de la compressibilité : zones à haute compressibilité (orange et rouge), zones à compressibilité variable (marron clair au vert) et zones de faible compressibilité (bleu au brun).



(C) Variation du potentiel de sulfate, avec un potentiel élevé (en rouge) et un potentiel bas (en vert).

Modèles géologiques en 3D et propriétés de la basse vallée de la Lea. © BGS

Le site olympique de la basse vallée de la Lea sera implanté dans l'East End, à l'Est de Londres. La plupart des projets d'aménagement impliqueront des constructions sur des terrains classés "difficiles". La Société des ingénieurs du génie civil (Institution of Civil Engineers) a estimé à 50 % les dépassements de budget et de délai à mettre au compte des "conditions de sol imprévues", mal estimées, en partie en raison d'une insuffisante maîtrise de la géologie en 3D.

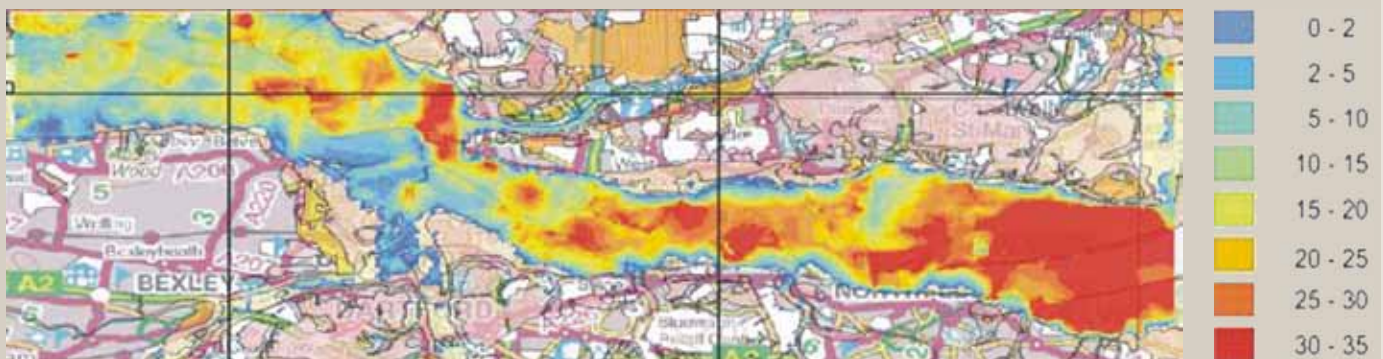
La modélisation en 3D est en mesure de fournir une description détaillée du sous-sol. Cependant, la mise en œuvre de ces méthodes a pris du retard par rapport aux progrès technologiques. Des changements récents de la législation et les adaptations dans la présentation des informations géologiques en 3D ont permis d'élargir l'appropriation des applications de la modélisation 3D par les communautés concernées.

Ainsi, un modèle géologique en 3D a été élaboré pour la basse vallée de la Lea qui permet d'évaluer les zones les plus difficiles sur le plan du génie civil, dans la mesure où il fournit les épaisseurs, la géométrie et les propriétés de couches géologiques spécifiques (voir figure ci-dessus). Une fois le cadre géologique 3D construit, les propriétés physiques des unités modélisées (sous forme de polygones 3D) ont été définies. Les systèmes de classification reposent, pour chaque propriété, sur des descriptions de sondages, des résultats d'essais en

laboratoire, en s'assurant de la prise en compte de tout autre paramètre figurant dans les rapports d'étude de site. Le modèle géologique proposé est fiable et rend bien compte des caractéristiques et de la variabilité naturelle des formations.

Les ingénieurs et les géologues peuvent faire appel au modèle géologique 3D pour la reconnaissance, l'identification des propriétés et les contraintes à prendre en compte dans les études de sol. Le modèle peut fournir des informations sur la profondeur de l'encaissant, sur ses propriétés et leur variabilité. Par exemple, la profondeur jusqu'au sommet des formations graveleuses sous les alluvions peut être exportée depuis le modèle 3D et visualisée dans un SIG, affichant les courbes de niveau de la profondeur ou de l'épaisseur (voir figure ci-dessous). Il devient alors possible de combiner les surfaces 3D avec d'autres données rectifiées dans l'espace (qu'elles soient géotechniques, géochimiques, géographiques ou autres) qui, une fois intégrées, permettent de déterminer les conditions d'exploitation et les techniques de construction les mieux appropriées.

Cet exemple démontre bien l'intérêt qu'offrent les modèles 3D pour une bonne prise en compte des aspects sol et sous-sol dans les projets d'aménagement. Ils donnent aux ingénieurs une vision géologique vraiment proche de la réalité.



Dépôts alluvionnaires entre Bexley et Tilbury visualisés sous ArcGIS et générés à partir du modèle 3D. © Crown. 100017897/2008 - BGS

LES ENJEUX DES RECHERCHES EN GÉOSCIENCES POUR LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Patrick LANDAIS - Directeur scientifique, Andra et Patrick LEBON, Andra

Les objectifs de la loi du 28 juin 2006

La loi du 28 juin 2006 charge l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) « de réaliser ou de faire réaliser, conformément au plan national de gestion des matières et déchets radioactifs, des recherches et études sur l'entreposage et le stockage en couche géologique profonde, et d'assurer leur coordination ». Plus particulièrement, concernant le stockage géologique, l'article 3 de la loi prévoit que « les études et recherches correspondantes sont conduites en vue de choisir un site et de concevoir un centre de stockage ».

Cette loi fait suite à quinze années de recherches sur le stockage géologique, qui ont abouti en 2005 à la production d'un dossier démontrant la faisabilité du stockage géologique des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue (HA-MAVL) dans une couche géologique argileuse d'âge jurassique située à 500 m de profondeur, dans l'est du bassin de Paris à la limite entre la Meuse et la Haute-Marne.

Le dispositif de recherche mis en place pour répondre aux objectifs fixés par la loi vise à préparer pour 2014 une demande d'autorisation de construction du stockage et, dans ce cadre, à préciser la localisation des installations souterraines (2009, puis 2012).

Les géosciences occupent une place centrale dans les activités de recherche

Les enjeux scientifiques liés au stockage géologique des déchets radioactifs sont multiples et concernent de nombreuses disciplines scientifiques. Parmi celles-ci, les géosciences occupent une place centrale dans les activités de recherche mises en œuvre par l'Andra.

Dans le domaine de la géologie, l'axe de développement est la mise en relation des mesures de propriétés de la roche obtenues de façon discontinue (échantillons) avec des paramètres enregistrés en continu par différentes méthodes de géophysique (diagraphies et sismique réflexion) pour construire des modèles géologiques 3D détaillés à l'échelle d'une centaine de

km². L'évaluation quantitative de la distribution des propriétés pétrophysiques passe par l'utilisation d'outils géostatistiques s'appuyant sur une connaissance fine de la structuration spatiale du milieu géologique, en particulier sur une analyse séquentielle à partir d'informations diagraphiques détaillées. En support à ces orientations, l'Andra a réalisé sur le site depuis une quinzaine d'années plusieurs campagnes de reconnaissance (forages et géophysique) incluant la réalisation en 2008 d'un forage de 2 000 m de profondeur, recoupant l'ensemble des formations sédimentaires mésozoïques. Ce forage a été mis à disposition de la communauté scientifique pour qu'elle puisse mener un programme de recherche dédié.

Comprendre les comportements physico-chimiques et les processus de transfert

En matière de géochimie, les objectifs visent la compréhension du comportement physico-chimique des radionucléides mais également la modélisation des distributions spatiales de divers systèmes de traceurs géochimiques dans les formations. Les recherches se focalisent sur la définition d'un modèle de transfert multi-échelles, depuis l'échelle nano à microscopique jusqu'à celle de la formation géologique sur le secteur étudié par l'Andra.

Aux interfaces entre la formation géologique et les ouvrages de stockage, la compréhension et la formalisation des processus de chimie-transport en champ fortement perturbé apparaissent également essentielles. Ces processus se produiront avec des cinétiques très faibles, mais sur des durées importantes de quelques dizaines à quelques centaines de milliers d'années, ce qui les rapproche des processus géologiques. Le challenge est de déterminer les mécanismes qui seront activés et les facteurs qui agiront sur leur cinétique.

Les transferts dans la formation géologique ne s'intéressent pas uniquement aux fluides aqueux et aux éléments dissous mais aussi au gaz, et plus particulièrement à l'hydrogène

produit par différents processus d'altération comme la corrosion en milieu anoxique des aciers. Il s'agit en particulier de définir des modèles de transfert des gaz en tenant compte de la nature des interfaces entre les différents composants du stockage. Les modèles proposés devront permettre de simuler les transferts de gaz en fonction du temps et de traiter les risques d'endommagement des matériaux et du milieu géologique ou les possibles modifications des écoulements d'eau autour des ouvrages et leurs conséquences sur le transfert des radionucléides.

Ces processus de transfert ne peuvent être traités indépendamment du comportement mécanique de la roche et des ouvrages. Dans ce domaine, les objectifs majeurs consistent, pour ce qui concerne le milieu géologique, à améliorer la compréhension du modèle de comportement hydro-mécanique des argilites, des conditions d'apparition, de la géométrie et de l'étendue de l'endommagement en paroi des ouvrages excavés ainsi que des conditions de leur évolution et enfin, de l'impact initial et différé de divers chargements (thermique, hydrique, pression de gaz) sur le comportement mécanique des argilites.

On comprend que de tels processus soient nécessairement intégrés dans une phénoménologie complexe qui impose de gérer des couplages entre phénomènes dont l'existence, l'intensité ou la complexité varient dans le temps et dans l'espace. Par exemple, la compréhension des mécanismes de cicatrisation de la fissuration des argilites engendrée par le creusement des ouvrages ne repose pas uniquement sur une approche mécanique, mais nécessite de maîtriser les conditions hydriques et de représenter à l'échelle microscopique le comportement pétrophysique du matériel argileux. Dans cette optique, les recherches conduites par l'Andra visent l'intégration de ces couplages et le développement d'approches mécanistiques devant aboutir à la représentation fine de la structure des argilites et de leur réactivité.

Le laboratoire souterrain de Meuse/ Haute-Marne

Les recherches réalisées sur le stockage géologique des déchets radioactifs reposent en partie sur un outil unique qu'est le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Il dispose de galeries expérimentales situées à -450 m et -490 m, accueillant un ensemble conséquent d'expérimentations visant à étudier le comportement de la roche, évaluer les cinétiques de transport des éléments, comprendre les effets de certaines sollicitations mais également à mettre en place des opérations de démonstration, préfigurant les futurs ouvrages ou architectures du stockage.

L'environnement de surface du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne offre également un champ d'investigation important dans le domaine des sciences de l'univers. En effet, l'Andra met en place depuis 2007 un observatoire pérenne de l'environnement qui, outre l'établissement d'un état zéro et le suivi des éventuelles perturbations engendrées par la mise en œuvre des infrastructures de stockage, offrira aux scientifiques la possibilité de suivre sur plusieurs dizaines d'années les cycles biogéochimiques dans trois écosystèmes différents et d'évaluer les effets de forçages locaux et globaux. Cet observatoire sera associé dès 2012 à une écothèque permettant la conservation dans des conditions optimales d'échantillons environnementaux.

L'élargissement à des applications dans d'autres secteurs

Au même titre que les recherches effectuées en laboratoires de surface, les expérimentations en laboratoire souterrain permettent de traiter des phénoménologies dont les applications dépassent largement le cadre des applications au



Afin d'étudier le stockage en profondeur de déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue, l'Andra a construit à 500 mètres sous terre en Meuse/Haute-Marne un laboratoire de recherche souterrain. © ANDRA / Véronique Paul

stockage des déchets radioactifs. On citera par exemple les expériences multi-échelle et in situ sur la migration des gaz dans le milieu géologique qui permettent d'acquies des paramètres et de développer des modélisations essentielles pour comprendre le rôle des formations argileuses dans le confinement d'accumulations de gaz.

C'est en particulier dans cette optique qu'une réflexion a été initiée en 2008 sous l'autorité

du ministère de la recherche afin d'évaluer les possibilités de transformation du laboratoire souterrain et de son environnement en une très grande infrastructure de recherche ouverte à la communauté scientifique.

Plus d'informations : www.andra.fr