



L'espace souterrain,  
élément d'équilibre  
de la densification  
urbaine

PAGE 24



Water supply  
for the Barcelona  
metropolitan area

PAGE 32



Les gisements  
énergétiques  
du sous-sol  
urbain

PAGE 62

LA REVUE DU BRGM POUR UNE TERRE DURABLE  
*BRGM's journal for a sustainable Earth*

# géo**sciences**

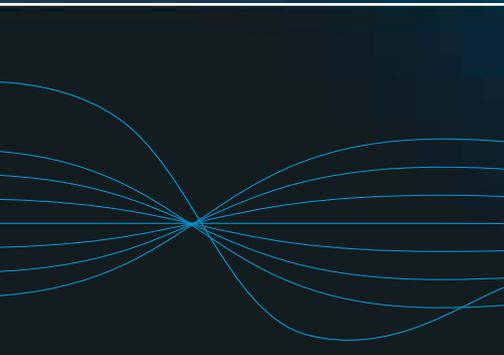
N° 10 ► DÉCEMBRE 2009 ► 8€

## Villes **et** géologie urbaine

 **brgm**  
BUREAU RECHERCHES GÉOLOGIQUES



# Moins de sel quand on sait



## Notre compréhension des zones côtières est vaste et profonde

Grâce à plus de 80 ans d'innovation technologique dédiée à l'exploration et à l'exploitation du sous-sol, Schlumberger est une référence incontournable pour les producteurs de ressources naturelles partout dans le monde. Pour la gestion des zones côtières Schlumberger Water Services offre:

- La mesure en continu du niveau et de la salinité des eaux superficielles et souterraines
- La détection et l'identification des infiltrations polluantes
- La caractérisation des aquifères, y compris les réseaux karstiques
- La recharge active d'aquifères avec stockage, et récupération
- Des techniques innovantes de lutte contre les intrusions salines
- La modélisation combinée hydrologique et sédimentaire de systèmes côtiers
- L'injection de résidus liquides en aquifères profonds

Les technologies et services spécialisés fournis par Schlumberger Water Services aident les gestionnaires d'eau en zones côtières à réduire leurs risques grâce à une meilleure compréhension et caractérisation du sous-sol et à la maîtrise des processus en jeu.



[www.swstechnology.com](http://www.swstechnology.com)  
[SWS-France@slb.com](mailto:SWS-France@slb.com)

- 03 ▣ Édito - *PHILIPPE VAN DE MAELE*
- 04 ▣ Le mot du rédacteur en chef - *JACQUES VARET*
- 06 ▣ Introduction scientifique - *MICHEL LUSSAULT*
- 08 ▣ La  **pierre de construction, matériau**  du développement durable  
*DAVID DESSANDIER, SHAHINAZ SAYAGH, PHILIPPE BROMBLET, LISE LEROUX*
- 16 ▣ **Anciennes cavités en site urbain**  
*ANNE-MARIE PRUNIER LEPARMENTIER*
- 24 ▣ L'**espace souterrain**, élément d'équilibre de la **densification urbaine** - *MONIQUE LABBÉ*
- 32 ▣ **Water supply** for the **Barcelona** metropolitan area  
*MIRA PETROVIC, ANTONI GINEBREDÀ, JORDI MARTÍN ALONSO, MIREN LOPEZ DE ALDA, DAMIA BARCELÓ*
- 38 ▣ **Gestion** intégrée des **sols et sites urbains dégradés**  
*SANDRA BÉRANGER, ANNE-LISE GAUTIER, FRANÇOIS BLANCHARD*
- 46 ▣ Urban **Aerosols** - *DAVID WIDORY, PHILIPPE NÉGREL*
- 54 ▣ Le **passé** des **villes** pour **comprendre** leur **futur** - *ÉRIC FOUACHE*
- 62 ▣ Les **gisements énergétiques** du **sous-sol urbain**  
*MINDJID MAIZIA*
- 72 ▣ **Gestion** des **données géologiques** en milieu urbain  
*ISABELLE BOUROLLEC, ÉRIC BOUTELOUP, SABINE CHARDAVOINE, JEAN-MARIE GANDOLFI, PHILIPPE ROUBICHOU*
- 80 ▣ **Pression urbaine et instabilité** des **versants** à **Messine** (Sicile, Italie)  
*GÉRARD HUGONIE*
- 86 ▣ Le **métabolisme urbain**, un outil de **gestion durable**  
*MARIE-FRANÇOISE GUYONNAUD, MÉLANIE BERLAND*
- 94 ▣ Du **risque** à la **gestion** des villes : la **ville durable**  
*YVETTE VEYRET*
- 102 ▣ **Points de vue croisés - Espace souterrain : une opportunité pour l'aménagement urbain** - *CHARLES-ÉRIC LEMAIGNEN, AHMED MORCHID, GÉRARD MARY*
- 106 ▣ **Chiffres clés**
- 108 ▣ **Brèves**

**En couverture :**  
**La Paz, capitale de la Bolivie, construite au pied de la cordillère des Andes, un bon exemple de ville en prise aux risques géologiques.**  
*La Paz, capital of Bolivia, at the foot of the Andes. A good example of a city prone to geological risks.*

© Fotolia



**Métro sous la colline  
de Passy (Paris,  
16<sup>e</sup> arrondissement).**

*The Paris underground  
running under  
the Passy quarter hill  
(16<sup>th</sup> arrondissement).*

© Tangopaso, Wikimedia



**Philippe Van de Maele**  
PRÉSIDENT DE L'ADEME

# L'enjeu de la ville durable

*La France a fait le choix d'un changement de modèle de développement sobre en énergie et en ressources et limitant les émissions de gaz à effet de serre et de polluants. La prise de conscience de l'ensemble des acteurs est arrivée à un niveau inégalé. Dans ce contexte, l'ADEME joue un rôle central et s'est vue confier de nouvelles missions faisant de l'Agence l'opérateur du Grenelle de l'environnement et un outil majeur de la transformation de notre société. Parmi ces nouvelles orientations, les actions prioritaires que je porte pour l'ADEME concernent entre autres la mise en œuvre d'approches transversales sur les thématiques des villes et territoires durables, de la production durable et de la consommation durable.*

L'enjeu de la ville durable, aujourd'hui, est de se fixer des objectifs de performance qui soient conformes aux objectifs du Grenelle. Je pense en particulier à l'objectif Facteur 4 pour la réduction des GES d'ici 2050, l'objectif 3x20 du Paquet énergie climat européen à l'horizon 2020, des objectifs de réduction des déchets, etc.

La ville durable, par la maîtrise de l'impact du transport et du bâtiment, est un maillon-clef de la réalisation des objectifs de lutte contre le changement climatique. N'oublions pas que, dans les pays développés, 80 % de la population vit dans les villes !

La collectivité doit se donner les moyens d'évaluer la situation initiale et suivre les évolutions vis-à-vis des objectifs, en s'appuyant notamment sur un bilan Carbone de son territoire. C'est ensuite, par secteur, des objectifs ambitieux d'efficacité énergétique des bâtiments que ce soit pour le neuf ou pour la rénovation, avec une insertion très forte des énergies renouvelables.

La ville, c'est aussi de mon point de vue une politique d'aménagement qui permet à la rue de retrouver sa fonction d'espace public de voisinage. La rue doit assurer la perméabilité du bâti, favoriser des zones à circulation restreinte et permettre un développement du réseau de transport public. La ville durable c'est encore une véritable politique de mixité sociale par une politique foncière et immobilière volontariste.

C'est enfin une politique cohérente de gestion de la mobilité et des déplacements. Il faut maîtriser les déplacements dits contraints en favorisant une densité acceptable et aussi la diversité fonctionnelle. Cela nécessite de prévoir les fonctionnalités pertinentes aux différentes échelles du quartier à l'agglomération : le boulanger au niveau du quartier, le lycée au niveau de l'arrondissement et l'université au niveau de l'agglomération. L'objectif est d'augmenter la probabilité d'une réduction des distances liées à ce type de déplacement et aussi l'éventail des modes de déplacement utilisables, modes doux, transports publics, et de gestion des transports collectifs.

Les pistes vers une ville durable sont donc identifiées, elles sont posées, le mouvement est lancé. Et le sous-sol est un des outils pour l'atteindre. Ce sous-sol qui abrite les réseaux de géothermie qui participent à l'efficacité énergétique de nos bâtiments, ces sols et sous-sols qu'il faut dépolluer et ces friches qu'il faut réintégrer dans une nouvelle dimension de la ville. Vos métiers sont donc indispensables à la réussite de cette ambitieuse et motivante politique de la ville de demain.



**Jacques Varet**  
DIRECTEUR  
DE LA PROSPECTIVE, BRGM  
j.varet@brgm.fr

# Voir la ville en 3D !

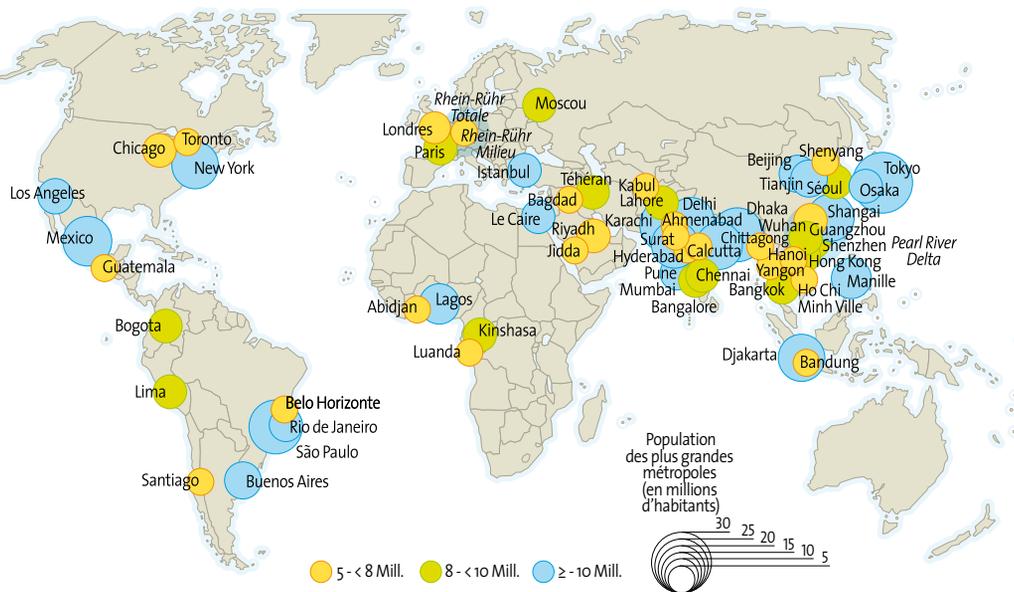
**A**u cours des dernières années, c'est dans les villes que la population a connu la plus forte croissance, souvent au détriment des arrière-pays. Selon les Nations unies, la croissance de la population mondiale va se poursuivre jusqu'en 2050, et celle-ci se fera essentiellement dans les villes, notamment les mégapoles (figure 1). Or la croissance des villes est souvent limitée par l'espace horizontal disponible alentour, qu'il s'agisse de barrières physiques (villes côtières, zones montagneuses, zones à risques naturels...) ou de nécessité d'aménagement du territoire (préservation de zones agricoles, forestières ou d'espaces naturels ou patrimoniaux). L'ensemble de ces contraintes, alliées à un souci d'optimisation des activités

humaines amènent à privilégier le développement « vertical » de la ville, bien sûr par des constructions de surface, mais aussi des ouvrages en sous-sol à des profondeurs croissantes. D'autant que la construction souterraine offre un certain nombre d'atouts, en plus de l'aspect purement spatial. Le premier est certainement la « durabilité » de la construction souterraine, qui ne souffre ni de problèmes d'altération atmosphérique, ni de renouvellement de façade. La sécurité est aussi une raison de ce choix (tenue face aux risques sismique, terroriste ou nucléaire). Enfin, dans les cités continentales, dans un souci d'adaptation au froid ou à la chaleur, l'espace souterrain constitue une solution particulièrement économique.

**Figure 1 : De 2005 à 2030, les Nations unies prévoient une croissance particulièrement rapide, qui atteindra en moyenne 2,2 % par an, dans les zones urbaines d'Asie, d'Amérique latine et d'Afrique.**

*Figure 1: Between 2005 and 2030, the United Nations expects particularly rapid population growth averaging 2.2% annually in the urban areas of Asia, Latin America and Africa.*

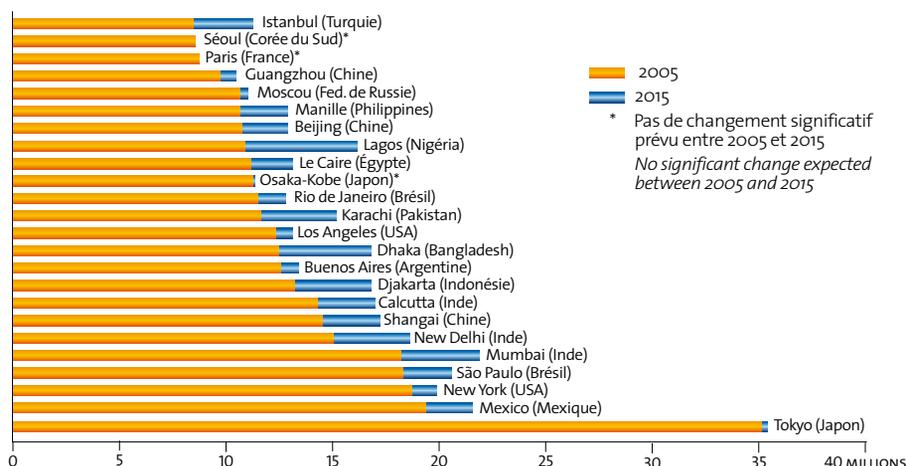
Source : ONU 2004, PRD-Statistics 2006  
Projet : F. Kraas.



**Populations des mégapoles en 2005 et prévisions pour 2015. Les populations de Londres, Paris et Séoul devraient rester stables. Les villes de Chennai, Téhéran, Wuhan, Kinshasa, Lahore et Lima dépasseront les 8 millions d'habitants.**

*Population of megacities in 2005 and forecast for 2015. The populations of London, Paris and Seoul should remain stable. The cities of Chennai, Tehran, Wuhan, Kinshasa, Lahore and Lima are expected to top the 8 million mark.*

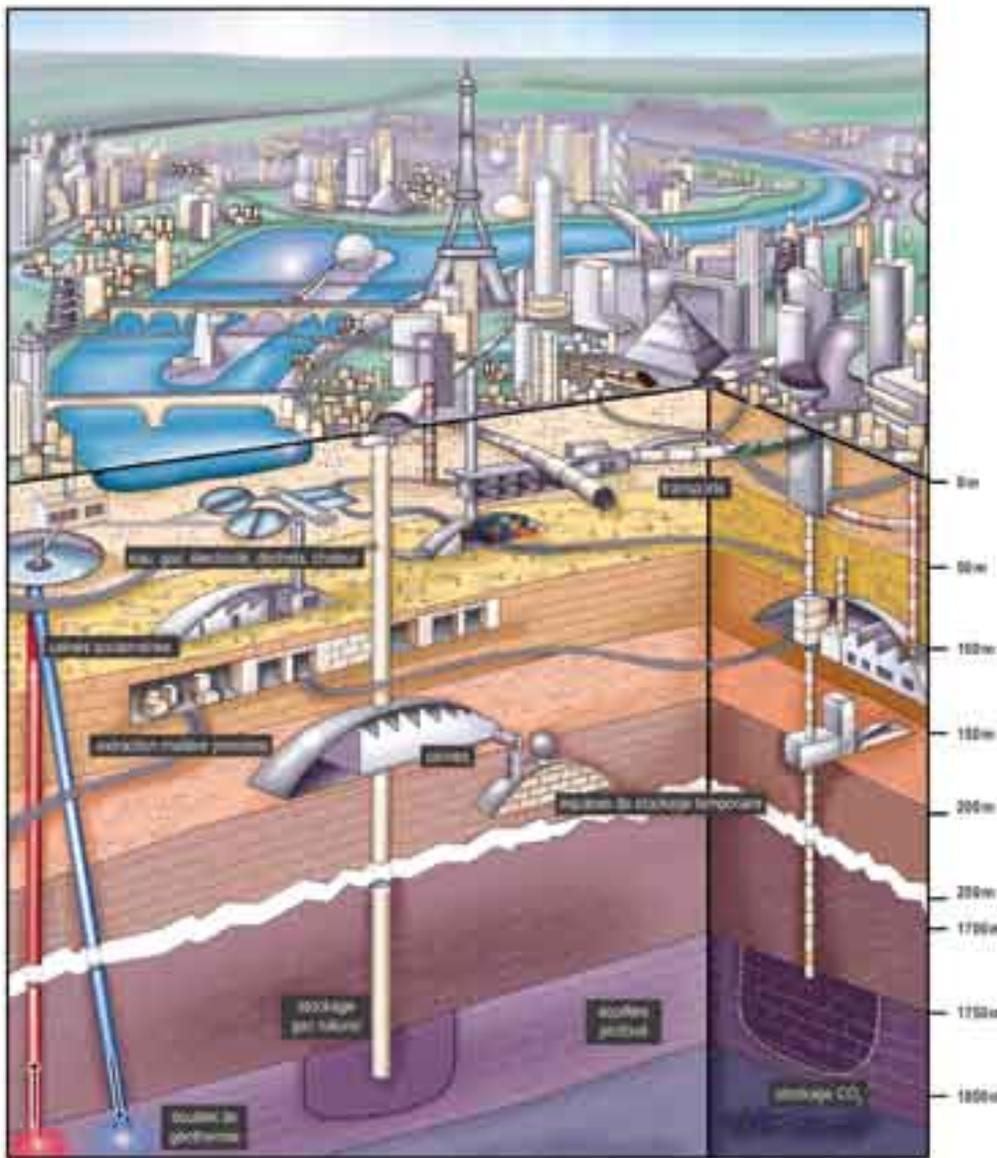
Source : [www.un.org/esa/population/WUP2005/2005WUP\\_agglomchart.pdf](http://www.un.org/esa/population/WUP2005/2005WUP_agglomchart.pdf)



**Figure 2 : Vision perspective d'une ville en 3D. Sont déplacés en sous-sol : réseaux, énergie, matières premières, transports, stockages.**

Figure 2: Prospective 3D view of the city of tomorrow. Lifelines, energy sources, raw materials, transportation systems and storage facilities have moved underground.

© BRGM



Après le numéro double (numéro 7/8) sur le patrimoine géologique, publié à l'occasion de l'année internationale de la Planète Terre, il fallait compléter une vision des géosciences centrée sur les paysages et milieux naturels. La ville constitue bien un lieu privilégié pour l'exploitation, l'utilisation du sous-sol, et de ce fait aussi sa connaissance. D'autant que, bien qu'il en ait couramment l'usage (métro, réseau d'alimentation en eau, parkings, catacombes, etc.), ce domaine privilégié d'application des géosciences – et de travail pour les professionnels, géologues et les ingénieurs – est certainement moins connu du grand public.

Le géologue, même s'il aspire souvent à travailler dans d'autres espaces, doit le reconnaître : les villes sont sans doute aujourd'hui les lieux dans lesquels la géologie est susceptible d'être la mieux connue, avec une précision inégalable, du fait de nombreux travaux qui y sont entrepris en sous-sol. On peut en avoir une connaissance précise en trois dimensions, incluant tous les paramètres quantitatifs (hydrauliques, thermiques, mécaniques, etc.) permettant de déployer l'usage de modèles et de prévoir toutes formes d'interactions découlant des divers usages.

Ce numéro aborde, en soulignant leurs interactions, des usages et des impacts aussi divers que les matériaux de construction, les anciennes carrières, les ouvrages souterrains, l'alimentation en eau des villes, la gestion des sols dégradés, l'archéologie urbaine ou encore l'utilisation de la géothermie. D'autres applications comme la connaissance des particules atmosphériques urbaines ou l'écologie industrielle sont également évoquées. Outre les scientifiques et les ingénieurs, il donne la parole aux autres parties prenantes de la ville : élus, services publics, entreprises de service.

Dans le passé, le développement urbain s'est caractérisé par des successions de pratiques éventuellement contradictoires ou pour le moins non harmonisées. Ainsi, les prélèvements des matériaux de construction ont laissé place à des cavités génératrices de risques, tandis que les creusements de voies de circulation ont pu générer des déchets. Dans une optique

de développement durable, on devrait parvenir demain à des modes de gestion optimisés de l'espace sous-terrain combinant exploitation des ressources du sous-sol (matériaux de construction : pierres à bâtir, calcaire à chaux pour ciment, gypse pour plâtres et enduits, argile pour briques et tuiles) et création d'espaces de voirie, galeries marchandes ou autres activités industrielles ou de services (dont parkings et aires de stockages). De même, les politiques urbaines devraient permettre de mieux hiérarchiser les niveaux d'occupation de l'espace souterrain : réseaux de distribution, galeries piétonnes, transports en commun, aires de stockages, voire zones industrielles et de services interconnectées (figure 2). Une véritable écologie urbaine souterraine verra le jour, optimisant espaces, déplacements des hommes et des matériels, et énergies (éclairage, thermique, mécanique, électrique...).

La gestion des risques constitue un autre domaine de gisement de progrès pour les urbanistes et les politiques urbaines. On a pu assister dans le passé récent, dans des zones de

deltas notamment, à des problèmes d'enfoncements, soit sous le poids des constructions, soit sous l'effet de prélèvements d'eau souterraine. La ville de Shanghai en a fourni de bons exemples. On dispose aujourd'hui des technologies permettant non seulement de prévenir ce type de risque, mais aussi de réparer les effets d'erreurs passées.

En tout état de cause, la construction urbaine impose une bonne connaissance du sous-sol, par acquisition de données quantitatives, leur gestion dans des systèmes d'information 3 et 4 D, et leur utilisation dans des modèles géologiques. Cette approche permet en effet l'intégration des diverses composantes applicatives (eau, énergie, matériaux, espaces...) dans une gestion prospective.

Enfin les métiers et services spécifiques de la géologie urbaine, notamment de la gestion de données et de l'information des parties prenantes – depuis la mesure de terrain jusqu'aux aides à la décision – font partie des enjeux pour les temps à venir. ■


**Michel Lussault**

 PROFESSEUR  
DE GÉOGRAPHIE URBAINE

PRÉSIDENT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Michel.Lussault@ens-lyon.fr

# Vers une urbanité durable

aires urbaines moyennes (500 000 à 1 million d'habitants) et petites (moins de 500 000 habitants) qu'au sein des mégapoles (plus de 10 millions de résidents). Celles-ci ne représentent que 9 % de la population urbaine mondiale, alors que les moyennes « petites » unités en accueillent 52 %, proportion qui ne va pas cesser de croître.

(les automobiles, les autoroutes et leurs aires, les avions, les trains, les gares de toutes sortes, les bus, les métros, les tramways, les navires, etc.) qui constituent autant des espaces de vie fondamentaux que des instruments de transport. Cette mobilité suppose et dispose des réseaux techniques multiples souterrains et aériens qui strient et ponctuent l'espace matériel, notamment parce qu'ils émettent dans l'atmosphère les ondes portant les informations en nombre infini. L'atmosphère est ainsi pleinement inscrite au sein du monde urbain, parce qu'elle est le milieu biophysique de déploiement du flux informationnel indispensable à la vie. Ce n'est donc pas un hasard si elle devient un enjeu politique, comme le

L'urbanisation est bien un phénomène global, qui concerne toutes les échelles et provoque une subversion de toutes les logiques sociétales [Lussault (2009)]. L'économie y est nouvelle, les structures techniques, sociales et culturelles connaissent des mutations profondes, les temporalités sont bouleversées, des logiques

**Un phénomène global qui concerne toutes les échelles et provoque une subversion de toutes les logiques sociétales.**

**N**ous avons connu en 2007 une inflexion décisive dans l'histoire de l'anthropisation de la planète. Pour la première fois depuis que l'être humain a commencé à imprimer sa marque sur la terre, plus de 3 milliards de personnes soit 50 % de la population vivent dans des ensembles urbains. Il faut bien mesurer l'ampleur de ce phénomène et en appréhender l'importance. Il y a là un enjeu collectif majeur, car ce monde urbanisé devient tout à la fois l'habitat du plus grand nombre et l'espace social et politique au sein duquel il nous faudra, de plus en plus, apprendre à saisir les évolutions et à réguler les problèmes.

La population urbaine a connu une croissance spectaculaire au XX<sup>e</sup> siècle (notamment dans ces cinq dernières décennies) passant de 220 millions à 2,8 milliards d'habitants. Cette croissance ne va pas se démentir, même si sa géographie va évoluer. En effet, ce phénomène sera de plus en plus marquant en Asie et en Afrique, là où existent encore des « réservoirs » de population rurales et agricoles et où les excédents naturels urbains sont importants – excédents qui partout sont devenus le moteur de l'urbanisation. Pour ces deux continents, on attend un doublement de la population urbaine entre 2000 et 2030. À cette date plus de 80 % de cette population urbaine, qui atteindrait selon les estimations les plus fiables 4,9 milliards, vivra en Afrique, en Asie, en Amérique du Sud. Les pays « développés » (Europe, États-Unis, Canada, Japon, Russie, etc.) verraient leur population urbaine passer seulement de 870 millions à un peu plus d'un milliard d'habitants. Contrairement à une idée reçue, la croissance urbaine actuelle est plus rapide au sein des

inédites d'organisation spatiale s'épanouissent à toutes les échelles, un état de nature spécifique est créé par le mouvement même d'urbanisation. Face à ces mutations, les régulations politiques et juridiques anciennes sont renvoyées à leur impuissance – mais les remplaçantes tardent à être inventées.

## Une fabrique d'environnement

Les savoirs académiques et techniques doivent prendre la mesure de cette nouvelle réalité du Monde. Je crois qu'il n'est pas très utile de continuer à réfléchir, comme jadis, à « l'impact » de l'urbanisation sur les « milieux naturels ». En effet, ces approches sont moins intéressantes et, surtout, moins pertinentes que celles qui considèrent le développement urbain sous l'angle d'une « fabrique d'environnement ».

Prenons un exemple. La croissance exponentielle des mobilités des humains, des marchandises, des flux, s'appuie sur des artefacts spécifiques

montrent les premières controverses sur les effets des ondes électromagnétiques sur les populations, qui se fixent sur des équipements précis : lignes à haute tension, antennes relais de la téléphonie mobile, bornes WiFi.

La moindre analyse confirme que les systèmes urbains mettent en lien tous les composants des systèmes sociaux, biologiques, physiques – d'où la complexité extrême des réalités de société urbaines. Reprenons le cas de l'atmosphère, son importance est flagrante. Outre son rôle de support de transit des informations et des données numériques, elle est aussi au cœur de toutes les grandes préoccupations du moment, elle est la cible d'actions, de projets, de débats, de politiques, d'interventions, elle fixe des discours, des mythes, des peurs, des fantasmes. L'atmosphère, ou du moins sa partie basse, au contact de la surface terrestre, est intégralement urbanisée, découpée, spatialisée par le truchement d'opérations menées par des acteurs sociaux.

On pourrait analyser en ce sens le rôle des îlots de chaleur urbains dans la manière dont est appréhendé le réchauffement climatique et dans l'évolution de la réflexion urbanistique et architecturale qui s'ensuit – puisqu'on envisage de limiter cet îlot par une disposition particulière des emprises végétales au sein des aires urbaines. On pourrait plus globalement montrer la montée en puissance de ce que je nommerai le « souci atmosphérique » dans les sociétés urbanisées. La dimension physique et biologique des systèmes urbains doit donc retenir l'attention – et il faut se féliciter de ce point de vue du présent numéro de la revue du BRGM, car les initiatives en la matière restent encore trop rares. Cette dimension tient d'abord au fait que ni les artefacts construits, ni les humains n'échappent aux lois de la physique matérielle. Elle tient aussi au fait que les individus dotés de corps biologiques inscrivent le vivant dans l'interaction sociale. Mais au-delà de ces constats élémentaires, l'urbain est d'abord à considérer, de manière plus globale, comme une fabrique d'environnements : c'est-à-dire un système organisateur d'un état de nature spécifique, par insertion permanente des éléments biologiques et physiques dans l'arrangement spatial des réalités sociales.

## Questionner la dimension géo-environnementale

Je viens d'évoquer l'atmosphère et son importance, mais on pourrait multiplier les exemples. Comme celui de la riche problématique des eaux et de leurs cycles urbains tout à la fois physique, chimique, biologique, spatial, technologique, sémantique, social, économique, politique culturel. De l'aquifère au robinet, ou à la fontaine, elle passe ensuite dans les circuits de ses multiples usages : elle n'est d'ailleurs point toujours là, pensée par ceux qui l'utilisent en tant que ressource naturelle. Rejetée, salie, polluée, elle est dénaturée. Si on la traite dans une station, on ne la renature pas pour autant – comme le montrent les refus des populations australiennes de consommer des eaux d'égouts retraitées pour leur consommation d'eau potable – mais on la remet dans un circuit d'usages possibles. Le même litre d'eau aura donc connu de nombreux états produits par les savoirs, les idéologies, les imaginaires et les techniques

des opérateurs. Pour appréhender cela, il faut mener l'analyse dans des espaces d'échelles variées : des bassins versants, à l'exutoire de l'égout, en passant par les stations d'épurations, les rivières, les zones urbaines concernées par ce circuit de l'eau, les logements des utilisateurs etc. L'eau urbaine est donc une réalité sociétale totalement hybride, un mélange indissociable de social et de biophysique.

On doit aussi parler de la présence des nombreuses friches et des vastes espaces de forêt, d'agriculture, au sein des aires urbaines. Car ceci remet totalement en question les vieilles analyses de l'impact de la « ville sur la nature » rurale. On serait même tenté de dire que c'est aujourd'hui le système biophysique qui impacte l'évolution urbaine, et ce d'autant plus que les préoccupations environnementales deviennent de plus en plus sensibles. Ainsi des espèces « sauvages » faunistiques et floristiques, apparaissent en nombre dans les organisations urbaines et posent parfois des problèmes redoutables, comme ces végétaux invasifs ou certains prédateurs qui prolifèrent. On découvre un autre des paradoxes constitutifs

de l'urbain contemporain. Si celui-ci est incontestablement marqué par la prégnance des artefacts matériels et immatériels, et semble donc manifester la domination prométhéenne de l'humain, il est aussi travaillé et organisé par les dynamiques biophysiques, qui peuvent prendre parfois le tour d'un « ensauvagement » relatif de certains périmètres, ensauvagement qui progresse souvent selon une logique de rhizome.

On l'aura compris, le choix par la revue du BRGM de questionner la dimension géo-environnementale des organisations urbaines est tout à fait judicieux – et il faut souligner en particulier la volonté d'aborder des aspects très peu travaillés aujourd'hui, comme ceux renvoyant à la géologie. Il s'agit d'une démarche qui préfigure, on peut l'espérer, les efforts de tous les chercheurs, quelles que soient leurs disciplines et leurs orientations méthodologiques et théoriques, pour dépasser les cadres classiques de l'analyse. Et ce afin de poser les bases conceptuelles et scientifiques indispensables à la construction de l'urbanité durable à laquelle on doit aspirer. ■



▲ **Hong Kong, 9 millions d'habitants, une métropole à fortes contraintes spatiales, entre mer et montagne.**  
*Hong Kong, with a population of 9 millions: confined between sea and mountain, is a metropolis greatly stressed for space.*

© PhotoDisc



Depuis l'époque préhistorique, l'homme n'a eu de cesse d'extraire la pierre pour son usage quotidien. Il l'a toujours considérée comme noble car durable, dans le sens « qui résiste au temps », l'utilisant jusqu'à une époque récente comme principal matériau de construction. Aujourd'hui la pierre doit apporter la preuve qu'elle répond bien aux principes du développement durable, afin de figurer en bonne place parmi les matériaux de construction de demain.

**Abattage d'une quille de roche calcaire dans la carrière de Massangis, Yonne, Bourgogne.**

*Extraction of a limestone wedge in the Massangis quarry, Yonne Department, Burgundy.*

© F. Michel  
<http://monumat.brgm.fr>



# La pierre de construction, matériau du développement durable



**David Dessandier**

DIRECTEUR RÉGIONAL PACA  
BRGM  
[d.dessandier@brgm.fr](mailto:d.dessandier@brgm.fr)



**Shahinaz Sayagh**

CHEF DE PROJET  
CENTRE TECHNIQUE DE MATÉRIAUX  
NATURELS DE CONSTRUCTION (CTMNC)  
[s.sayagh@ctmnc.fr](mailto:s.sayagh@ctmnc.fr)



**Philippe Bromblet**

INGÉNIEUR DE RECHERCHE  
CENTRE INTERRÉGIONAL  
DE CONSERVATION ET RESTAURATION  
DU PATRIMOINE (CICRP)  
[philippe.bromblet@cicrp.fr](mailto:philippe.bromblet@cicrp.fr)



**Lise Leroux**

INGÉNIEUR DE RECHERCHE  
LABORATOIRE DE RECHERCHE DES  
MONUMENTS HISTORIQUES (LRMH)  
[lise.leroux@culture.gouv.fr](mailto:lise.leroux@culture.gouv.fr)

## La pierre de construction à travers les temps

Dans l'Antiquité, les difficultés d'extraction ont d'abord fait de la pierre un matériau de prestige dédié à la construction de bâtiments symbolisant le pouvoir ou le divin, alors que le bois et la terre étaient utilisés pour les constructions à usage plus banal. Plus récemment, les évolutions technologiques ont permis d'améliorer les techniques d'extraction et de taille, autorisant l'usage de la pierre dans des édifices plus variés. Nombre d'ouvrages sont toujours observables aujourd'hui, des centaines, voire des milliers d'années après leur édification, témoignant du savoir-faire des hommes et de la durabilité des pierres.

“ Les difficultés d'extraction ont d'abord fait de la pierre un matériau de prestige. ”

En France, la grande diversité des formations géologiques (*figure 1*) s'est naturellement traduite par une grande variété de pierres dimensionnelles<sup>(1)</sup> en œuvre. Le Val de Loire a

(1) Les pierres dimensionnelles désignent les pierres extraites de carrières sous forme de blocs, par opposition aux pierres exploitées pour les granulats.

ainsi bénéficié de la facilité d'extraction du tuffeau, pierre tendre et présente en grandes masses. Les grès triasiques ont été largement utilisés dans les constructions alsaciennes, tout comme les granites dans le Massif armoricain, les molasses tertiaires le long de la vallée du Rhône, ou certaines roches volcaniques en Auvergne. Les bâtisseurs ont su tirer parti de cette diversité de la ressource en utilisant les pierres de manière appropriée. Ainsi, le soubassement de la cathédrale d'Amiens présente plusieurs assises de blocs de grès qui étaient peu capillaires<sup>(2)</sup>; les parties hautes ont pu être construites en craie, matériau plus tendre, permettant une sculpture plus aisée et plus fine. Avant le XIX<sup>e</sup> siècle, les pierres de construction étaient souvent extraites de carrières proches des édifices, minimisant ainsi le coût de transport et de la manipulation. Cependant, dès l'Antiquité, certaines pierres de renommée particulière ont fait exception. Pour exemple, le « Grand Antique » extrait dans une carrière à Aubert (Ariège) est reconnaissable dans de nombreuses cités romaines du pourtour méditerranéen. De même, le « Liais », calcaire fin qui affleurerait uniquement dans le sous-sol de Paris, se retrouvait dans les portails sculptés de nombreuses cathédrales (Chartres, Sens, Auxerre).

À partir du XIX<sup>e</sup> siècle, on voit apparaître sur le marché de la construction parisienne les pierres de la vallée de l'Aisne, de Côte-d'Or, de l'Yonne ou de la Meuse. La première guerre mondiale entraîne la mise en sommeil de nombreuses carrières. Les années d'après-guerre sont caractérisées par la raréfaction de la main d'œuvre qualifiée, la diminution des savoir-faire associée à une exploitation mécanisée et la montée en puissance du béton dans les années 1930. La reconstruction après la seconde guerre mondiale est l'occasion d'une brève embellie marquée par des projets emblématiques portés par des architectes comme Fernand Pouillon, qui intègre la pierre dans les grands programmes de construction.

Aujourd'hui, l'industrie française des roches ornementales et de construction représente encore un pôle important d'activité avec en 2007 une mosaïque de 923 entreprises (954 en 1996) pour un effectif total de 7 687 personnes (près de 9 200 en 1996). Son chiffre d'affaires total était de 776,1 M€ (données Unicem,

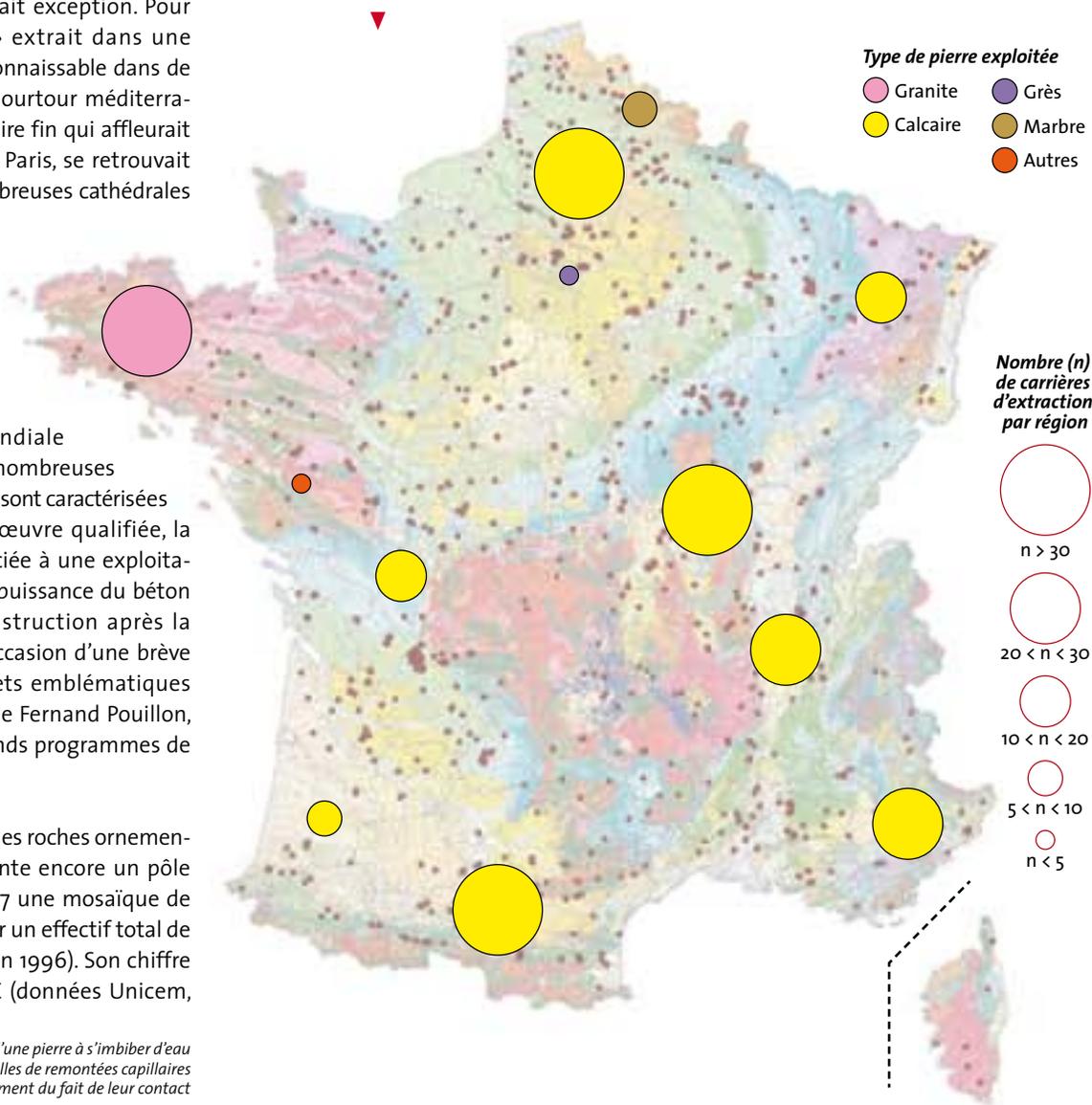
[Pierre Actual (2009)]. La filière est caractérisée par la grande diversité des matériaux extraits, avec la prédominance des pierres calcaires et marbres (272 000 m<sup>3</sup> extraits), des granites et roches similaires (124 500 m<sup>3</sup>) suivis d'assez loin par les grès de construction (18 200 m<sup>3</sup>) et les ardoises (10 100 m<sup>3</sup>).

**Figure 1 : Carrières actives hors granulats (pierres de construction, pierres ornementales, argiles, pierres pour l'industrie minérale...) en France métropolitaine, sur fond géologique au 1/1000 000. Un site internet en cours de développement par le BRGM donnera accès à ces données à compter de janvier 2010.**

Figure 1: Quarries in activity in metropolitan France, exclusive of aggregates (building and ornamental stones, clays, stones for the mineral industry...) plotted on the 1:1000 000 geological map of France.

A web site is being developed by BRGM which will allow these data to be accessed as of January 2010.

© BRGM, Observatoire des matériaux, CTMNC.



(2) La capillarité désigne l'aptitude et la vitesse d'une pierre à s'imbiber d'eau à pression atmosphérique; les zones préférentielles de remontées capillaires sont habituellement les soubassements de bâtiment du fait de leur contact avec le sol.

“  
La pierre reste une ressource  
fragile, nécessitant  
une exploitation raisonnée.”

En 1995, on dénombrait 323 carrières en activité avec une activité fortement régionalisée dans cinq zones (Bretagne, Midi-Pyrénées, Bourgogne-Franche-Comté, Lorraine et Provence-Languedoc-Roussillon) qui totalisaient 80 % du volume extrait national, pour 66 % du chiffre d'affaires total, 68 % des entreprises et 60 % des effectifs [Thibaut (1996), BRGM (1997)]. Ces dernières années, le développement de nouvelles techniques de préfabrication et de précontrainte ouvrent à la pierre des perspectives d'emplois sophistiqués jusqu'alors réservés au béton (*photo 1*).

### Une ressource épuisable entre accessibilité et conflits d'usage

La pierre est une ressource minérale naturelle présente dans le sous-sol français dont la grande diversité des formations géologiques a permis de fournir un large

panel de matériaux. Exploité généralement en carrières à ciel ouvert ou parfois en galeries souterraines, chaque gisement de pierre correspond à un volume limité de matériau, répondant à des critères de rentabilité, d'exploitabilité et d'aptitude aux usages pour la construction. Globalement, la pierre de construction constitue une ressource fragile et épuisable, pour laquelle le recyclage est aujourd'hui très limité. Outre la raréfaction, voire l'épuisement des gisements, les questions d'accessibilité à la ressource et de concurrence d'usage des matériaux extraits sont également sensibles, à l'exemple du marbre blanc de Saint-Béat (Haute-Garonne), exploité dès l'époque gallo-romaine comme roche décorative et aujourd'hui réduit sous forme de poudre à usage industriel.

### Les carrières, entre acceptation sociale et cadre réglementaire

Tout le monde s'accorde à dire que la pierre est le matériau de construction le plus noble et le plus durable, produit naturel mis en œuvre dans les monuments emblématiques ayant résisté aux siècles. Parallèlement, les carrières (*photo 2*) ne sont pas toujours bien acceptées par les populations riveraines, et les projets



◀  
**Photo 1 : Colonnes précontraintes en pierres des Lens (Gard) et du mont Caume (Var) dans le chantier de réhabilitation de la gare Saint-Charles à Marseille.**

*Photo 1: Pre-stressed columns of stone from Lens (Gard Department) and Mont Caume (Var Department) used in the renovation operation of Marseille's Saint-Charles railway station.*

© P. Bromblet



d'ouverture de nouveaux sites s'avèrent toujours compliqués. L'image de la pierre de construction est en effet souvent amalgamée à celle des carrières de granulats, perçues uniquement comme sources de nuisances en oblitérant leur rôle de développement local. Il est ainsi souvent fait abstraction du « développement » pour ne garder en mémoire que le « durable », en oubliant que les matériaux de construction sont nécessaires au développement économique.

Pourtant, l'exploitation des carrières est aujourd'hui extrêmement réglementée. D'un point de vue historique, la loi du 21 avril 1810 instaure un « régime de déclaration » d'exploitation à la mairie laquelle transmet à la préfecture. Le 16 août 1956 est publié le *Code Minier* qui rassemble les textes essentiels relatifs à l'exploitation des gîtes minéraux. Les carrières vivent sous ce régime très libéral de simple déclaration jusqu'à la loi du 2 janvier 1970 qui soumet l'ouverture des carrières à autorisation préfectorale préalable. Un autre tournant majeur est pris avec la loi du 4 janvier 1993 dont l'objet principal est de changer la base juridique des autorisations d'ouverture et d'exploitation des carrières, lesquelles deviennent des installations classées. Parmi les autres grands principes de cette loi, citons : la généralisation des autorisations

avec étude d'impact et enquête publique ; l'obligation de constituer des garanties financières pour assurer le réaménagement en cas de disparition ou de défaillance de l'exploitant ; les durées des autorisations ; la création de la commission départementale des carrières, instance consultative examinant les demandes d'autorisation d'exploiter ; le schéma départemental des carrières et le permis d'exploitation. Divers décrets d'application de 1994 à 1996 viennent constituer le dispositif réglementaire du nouveau régime des carrières, notamment le décret du 11 juillet 1994 relatif aux schémas départementaux des carrières. Enfin, depuis 2006 (décret du 31 mai), le régime dérogatoire de la simple déclaration est étendu sous conditions à certaines petites carrières destinées à la restauration des monuments historiques classés ou inscrits... ou à la restauration de bâtiments anciens dont l'intérêt patrimonial ou architectural justifie que celle-ci soit effectuée avec leurs matériaux d'origine.

▲  
**Photo 2 :**  
**Vue générale**  
**d'une carrière**  
**de pierre**  
**de Comblanchien**  
**(Côte-d'Or).**

*Photo 2:*  
*Panoramic view*  
*of a Comblanchian*  
*limestone quarry*  
*(Côte-d'Or*  
*Department).*

© J.-P. Gauthier, Les Pierres  
Bourguignonnes SARL

“  
Les matériaux de construction sont nécessaires  
au développement économique.”

## Un matériau fragilisé par les pollutions modernes, à adapter aux usages

Comme tout matériau, la pierre de construction subit au fil du temps des processus d'altération, dommageables pour l'esthétique et la conservation des bâtiments. D'origine physico-chimique ou biologique, ces mécanismes sont conditionnés par les caractéristiques intrinsèques de la pierre ainsi que par les conditions d'exposition et d'alimentation du bâtiment en eau et sels dissous.

Les facteurs externes d'altération, plus importants en milieu urbain, se sont amplifiés au cours du temps. Ainsi, à partir du début de l'ère industrielle au XIX<sup>e</sup> siècle, la pierre a souffert du fort accroissement de la pollution atmosphérique. Les façades des constructions se sont progressivement couvertes de croûtes noires avec des particules carbonées, produites par la combustion du charbon, puis des dérivés du pétrole, qui ont encrassé la pierre. En parallèle, le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) à l'état gazeux a réagi avec le carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) de la pierre ou des poussières qui la recouvraient pour former du gypse (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O). Ce gypse a alors cimenté les particules carbonées pour former des dépôts indurés inesthétiques (photo 3).

Il a aussi généré des écaillages et desquamations en plaques en cristallisant sous la surface de la pierre. À l'occasion d'opérations de nettoyage et de restauration, il est fréquent de découvrir sous les « croûtes noires », des patines naturelles anciennes, résultant de dépôts éoliens ou de l'activité des lichens, mousses, algues qui se développaient naturellement sur les pierres avant l'ère industrielle. En milieu rural, la pierre a continué à être colonisée par des organismes et microorganismes. Algues, mousses, lichens et plantes s'y développent à condition d'y trouver la lumière favorable à la photosynthèse et les substances nutritives nécessaires. Ces recouvrements biologiques induisent la formation de patines orangées riches en phosphates et en oxalates de calcium, également observables sous la « croûte noire » des pierres des monuments des villes. Certains organismes libèrent durant leur métabolisme des enzymes et des acides organiques (notamment l'acide oxalique) qui sont capables d'attaquer la surface de la pierre pour former de petites cavités millimétriques caractéristiques, altération appelée « biopitting ».



De leur côté, les facteurs internes d'altération d'une pierre correspondent aux propriétés intrinsèques suivantes, mesurables par des essais physico-chimiques en laboratoire [Dessandier (2000)] :

- comportement des minéraux constitutifs en présence d'eau (gonflement des argiles, dissolution des carbonates, etc.) ;
- degré maximum de saturation d'eau et volume poreux mobilisable (rôle de « vase d'expansion ») en cas de changement volumique d'un élément (cristallisation saline, gélifraction) ;
- propriétés de transfert d'eau dans le milieu poreux par répétition de cycles d'imbibition-évaporation pouvant mener des cristallisations salines en surface (efflorescences) ou en profondeur ;
- résistance mécanique (qualité des joints de grains) intervenant directement dans la réponse d'une pierre aux sollicitations générées par les cristallisations salines, la gélifraction ou le gonflement de minéraux argileux.

Ces propriétés intrinsèques à chaque type de pierre présagent ainsi de sa « résistance » dans le temps (durabilité intrinsèque), laquelle peut être très différente

▲  
**Photo 3 : Vue partielle du portail ouest de l'église Sainte-Croix à Bordeaux : « croûte noire » et essai de nettoyage (parties beige).**

*Photo 3: Detail of the west door of the Sainte-Croix church in Bordeaux: the "black coating", and an attempt at cleaning (beige patches).*

© P. Bromblet

## ► LA BASE DE DONNÉES « MONUMAT »

Isabelle Pallot-Frossard – LRMH – isabelle.pallot-frossard@culture.gouv.fr  
Lise Leroux – LRMH – lise.leroux@culture.gouv.fr  
Jean Féraud – BRGM – j.feraud@brgm.fr  
Patrick Vadala – BRGM – p.vadala@brgm.fr



L'édification du patrimoine bâti a nécessité la mise en œuvre de pierres variées et dotées d'une valeur non seulement culturelle, sociétale et patrimoniale, mais aussi économique. Pour se procurer des pierres d'origine ou de remplacement adaptées aux restaurations, les pouvoirs publics, les architectes et les particuliers rencontrent des difficultés croissantes. De même, les exploitants de carrières accèdent de plus en plus difficilement à la ressource. Certains chantiers de restauration sont ainsi paralysés, ce qui s'avère souvent aussi coûteux que la restauration elle-même.

La base de données « Monumat » (<http://monumat.brgm.fr>), développée par le BRGM avec la collaboration du Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH) du ministère de la Culture, a vu le jour fin 2005 afin de faciliter l'accès à la connaissance sur les pierres et la documentation sur les carrières. Cette base, accessible sur Internet par tous les acteurs impliqués dans des chantiers de



restauration, rassemble des données sur environ 3 600 monuments, 2 600 carrières et 7 000 pierres. Des actions régionales d'inventaire (Poitou-Charentes, Centre, Réunion, Languedoc-Roussillon) viennent régulièrement l'enrichir. ■



### Château de Saumur, finalisation des travaux de restauration après l'effondrement du rempart nord, 2001.

*Saumur Castle (Maine-et Loire Department), the final stage of restoration work undertaken subsequent to the collapse of the northern rampart in 2001.*

© P. Thierry



**Exemple d'une mauvaise restauration ayant utilisé des pierres incompatibles (chapelle San Michele à Piétralba, Corse). Pour remplacer les calcaires blancs d'origine, non exploités actuellement, des pierres blanches non calcaires, d'apparence adaptée, ont été utilisées. Mais assez rapidement le fer contenu dans ces pierres s'est oxydé, ce qui a apporté une patine disgracieuse. Monumat vise à empêcher ces erreurs.**

*An example of bad restoration by incompatible stones (the San Michele chapel at Pietralba, Corsica). As a replacement of the original white limestone, no longer quarried, white non-calcareous stones of apparently suitable aspect were used. But the iron they contained rapidly oxidized, producing an unsightly patina. Monumat aims at preventing such mistakes.*

© J. Féraud



d'un type de pierre à l'autre. Une pierre calcaire très poreuse et très capillaire comme le tuffeau (*photo 4*) extrait dans le Val de Loire résistera beaucoup moins dans le temps qu'une pierre de Berchères, calcaire lacustre de Beauce, peu poreux et peu capillaire, utilisé dans la construction de la cathédrale de Chartres [Dessandier (2003)].

La sélection des pierres et leur adéquation aux usages dans la construction sont des questions primordiales, traitées dans la norme B10-601 « Produits de carrières – Pierres naturelles – Prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles ». Ce document précise les tolérances sur les produits et les prescriptions d'emploi, en fonction de leur destination dans l'ouvrage, et les conditions de réception applicables aux fournitures.

### Un matériau naturel qui doit aujourd'hui prouver sa valeur écologique

La pierre doit apporter la preuve scientifique de ses qualités écologiques et pouvoir être objectivement comparée aux autres matériaux. Elle doit être capable de mettre à disposition des prescripteurs des données précises d'évaluation environnementale de ses produits, leur permettant de comparer objectivement la

valeur environnementale de chaque produit et de les guider vers la conception d'ouvrages respectueux de l'environnement [AFNOR (2004)].

Prévue à cet effet, la Fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) d'un produit de construction fournit des données chiffrées issues d'une Analyse de cycle de vie (ACV) du produit [AFNOR (2006a, 2006b)], complétée par des informations sanitaires résultant souvent d'essais spécifiques. L'ensemble des FDES est rassemblé dans INIES ([www.inies.fr](http://www.inies.fr)), base de données nationale française de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des matériaux et produits de construction. L'ACV est une évaluation des impacts sur l'environnement d'un système comprenant l'ensemble des activités associées à un produit, depuis l'extraction jusqu'à l'élimination des déchets.

Pour la première fois en France, et sous la conduite du Centre technique de matériaux naturels de construction (CTMNC), cette démarche a été appliquée à des produits en pierre naturelle, afin d'en apprécier objectivement la valeur écologique. Trois types de produits en pierre naturelle ont été étudiés : un pavé de voirie, une pierre massive et un revêtement mince attaché.

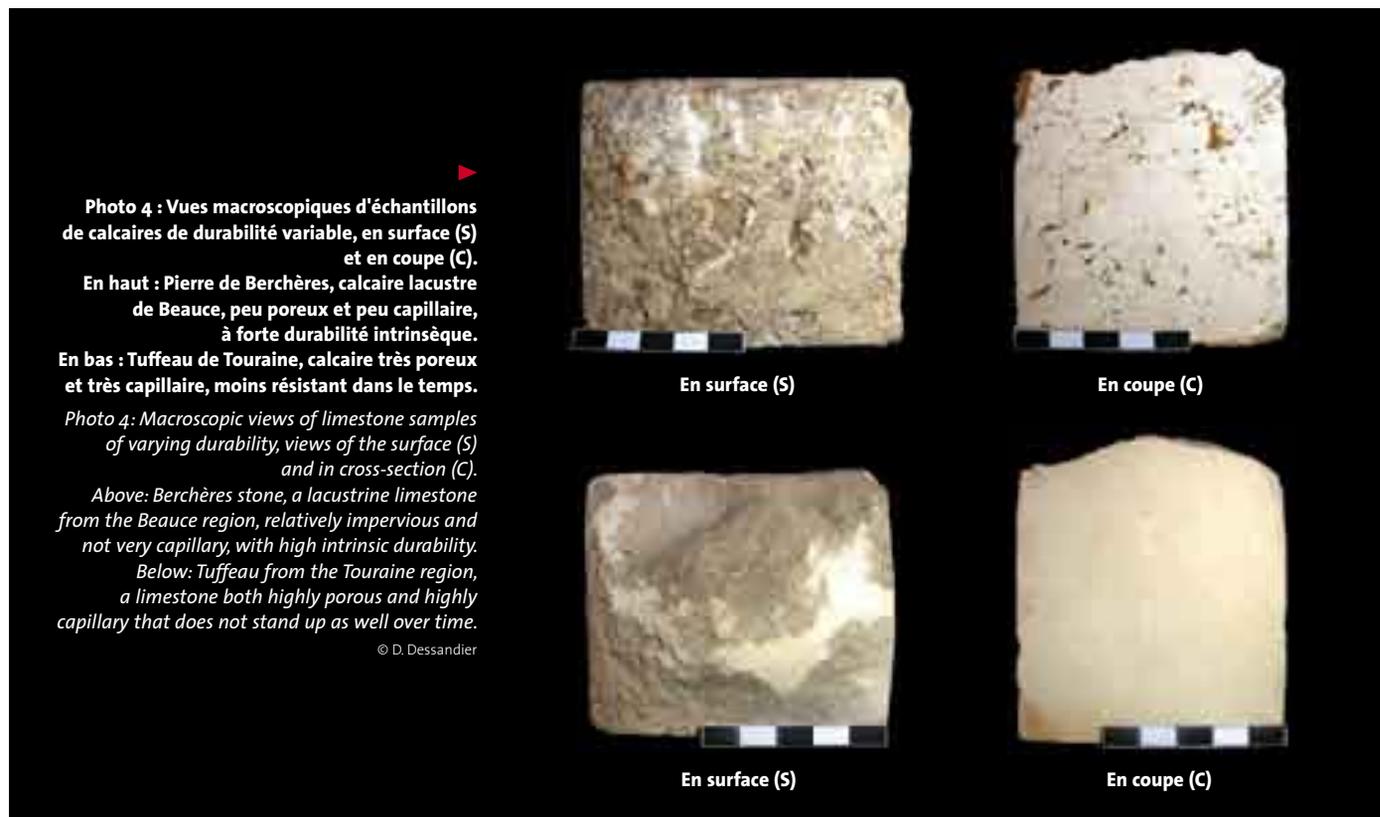
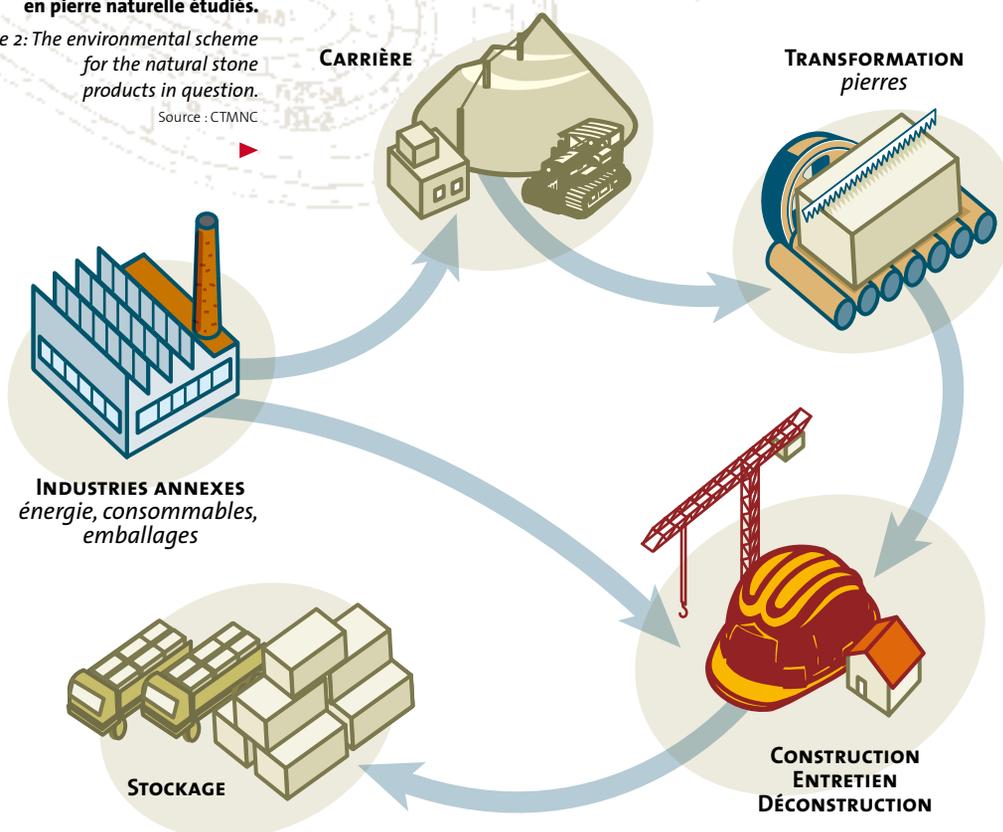


Figure 2 : Système environnemental relatif aux produits en pierre naturelle étudiés.

Figure 2: The environmental scheme for the natural stone products in question.

Source : CTMNC



Le système environnemental étudié est présenté en figure 2. Les résultats d'ACV de ces produits en pierre ont été comparés à ceux d'autres produits de construction (en béton et en acier). Il apparaît que le revêtement mince attaché de façade en pierre présente des indicateurs d'impact environnementaux plus ou moins favorables. Dans le cas du pavé, le bilan environnemental est clairement à l'avantage de la pierre naturelle. Une telle démarche reste maintenant à étendre à d'autres produits en pierre, afin de permettre des comparaisons objectives et de positionner favorablement la pierre comme alternative environnementale aux autres matériaux de construction.

Parallèlement, l'amélioration continue de la qualité environnementale des produits en pierre doit constituer un objectif guide. Elle doit s'appuyer sur une exploitation raisonnée des ressources, privilégiant l'emploi local des pierres extraites et leur usage mixte avec d'autres matériaux naturels, facteurs de pérennisation de l'identité des terroirs et de meilleure acceptation des carrières

d'extraction. Dans son *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI<sup>e</sup> au XVI<sup>e</sup> siècle*, Viollet-le-Duc décrivait en 1856 l'usage de la pierre dans l'architecture en ces termes : « Les constructions de pierre qu'ils ont laissées sont élevées toujours avec les meilleurs matériaux que l'on pouvait se procurer dans le voisinage de leurs monuments [...] ; lorsque celles-ci faisaient absolument défaut dans un rayon étendu, ils employaient le caillou ou la brique, plutôt que de mettre en œuvre de la pierre à bâtir d'une qualité inférieure... ». Et si la pierre devait regarder son passé en face pour mieux se construire un avenir ? ■

“ Positionner favorablement la pierre comme alternative environnementale aux autres matériaux de construction. ”



### Building stone, a sustainable development material

Since prehistoric times, mankind has regularly quarried stone for daily needs, always regarded it as a reference building material and used it extensively until it was replaced with concrete. The considerable diversity of France's geological formations has provided a wide assortment of stones disseminated over the whole country that exhibit varying technical characteristics suited to different types of building uses. Stone has also been called on for decorative purposes. However, it is a fragile resource that must be managed sensibly. Some deposits have already run out, whilst others are no longer accessible. Furthermore, quarries are subject to strict regulations, which are becoming increasingly stringent as years go by, while they also continue to be viewed as negatively impacting the environment. With modern air pollution, buildings that heretofore had withstood the test of time have significantly deteriorated today, especially in urban areas. Still, stone is the only material that has shown itself to be resistant in the long term. Finally, in these early years of the 21st century, stone, a natural substance per se and irreplaceable in former times, now must prove that it complies with the principles of sustainable development if it is to retain its good standing amongst building materials for the future.



# Anciennes cavités en site urbain

La mémoire collective est très sélective, notamment en site urbain.

Les matériaux utiles à la construction des grandes cités, comme Paris, ont été pris à leur périphérie, créant ainsi des vides qui furent quelquefois réutilisés mais le plus souvent oubliés. Ces anciennes carrières représentent désormais un danger pour les biens et les personnes.

Depuis les premiers grands incidents entre les XVIII<sup>e</sup> et XXI<sup>e</sup> siècles, la gestion de ces vides a évolué, la notion de risques aussi.

Dans une optique de développement durable, il faudra demain combiner extraction de matière première et gestion de l'espace souterrain.



**Anne-Marie Prunier Leparmentier**

INSPECTION GÉNÉRALE DES CARRIÈRES, PARIS  
DIVISION INSPECTIONS, CARTOGRAPHIE,  
RECHERCHES ET ÉTUDES  
anne-marie.leparmentier@paris.fr

## L'apparition d'une cité

De la bourgade de pêcheurs, à Lutèce, puis à la capitale des rois de France, Paris a connu une évolution bien tourmentée. Combien de Parisiens connaissent son histoire ? De son implantation géologique ou de son histoire humaine, quel facteur fut le plus déterminant ? Mais l'un va-t-il sans l'autre ? Pour comprendre les risques spécifiques à un site urbain dense, il faut aussi s'intéresser à son histoire.

D'un village de 9 hectares, au milieu d'un fleuve relativement tranquille, Paris est passé à 8 574 hectares (sans les bois) en moins de 2000 ans. À l'origine, ce village était bordé au nord par un marais et deux collines séparées par un col étroit, au sud par un versant abrupt, à l'ouest et à l'est par deux grandes forêts.

“ Pour comprendre les risques spécifiques à un site urbain dense, il faut aussi s'intéresser à son histoire. ”

▲  
**Champignonnistes en phase de récolte dans une carrière de calcaire grossier.**  
*Mushroom growers during the harvesting stage in a "calcaire grossier" quarry.*  
© IGC.

Géologiquement, au sud se trouve la « falaise » formée par le calcaire grossier, au nord, les deux collines correspondent aux buttes gypseuses de Montmartre

et de Belleville. Le site de Paris, par sa structure géologique, tectonique et morphologique (érosion de la Seine au Quaternaire), offrait à l'affleurement une très grande variété de terrains exploitables en carrières, directement aux portes de la ville. Ainsi disposait-on, outre le bois, de tous les matériaux nécessaires à l'édification de la cité. Paris se suffisait à elle-même en pierres, chaux, ciment, plâtre, briques, tuiles, granulats, etc., sans oublier la terre arable [Prunier Leparmentier (1988)].

Ce sont les Romains qui exploitèrent en premier et à ciel ouvert les ressources minérales de Lutèce, plus particulièrement le calcaire grossier. Paris devint la capitale de la culture pendant l'époque classique, notamment avec son « quartier latin », la rive gauche se développa en riches écoles latinistes, monastères ou couvents. La pierre était exploitée à l'extérieur de la cité, jusqu'au XVI<sup>e</sup> siècle, suivant la méthode des « piliers tournés »<sup>(1)</sup> (figure 1). Puis les rois et la cour s'installèrent à Paris, l'industrie de la pierre prit un nouvel essor avec l'exploitation du calcaire par la méthode des « hagues et bourrage »<sup>(2)</sup>. La hauteur des carrières souterraines était alors réduite à celle des bancs recherchés, entraînant une exploitation sur plusieurs étages.

Parallèlement, l'exploitation du gypse s'intensifiait aussi pour le plâtre qui assurait notamment une protection contre les incendies. De grande qualité, il était même exporté jusqu'aux Amériques.

(1) – Exploitation par piliers tournés : exploitation de la pierre en laissant régulièrement du matériau en place qui constitue ainsi des piliers naturels.  
 (2) – Exploitation par hagues et bourrages : exploitation de la pierre sur la totalité de l'espace, en laissant derrière soi des remblais ou déchets de l'extraction, maintenus par des murs de pierres sèches (hagues), si possible jusqu'au toit de la salle d'extraction, et en mettant quelques piliers en pierres sèches (dits « cales à bras ») pour maintenir le toit de la carrière, le temps de l'exploitation.



▲ **Cabinet de curiosités construit au XIX<sup>e</sup> siècle.**  
*A cabinet of curiosities built in the 19<sup>th</sup> century.*  
 © ACP



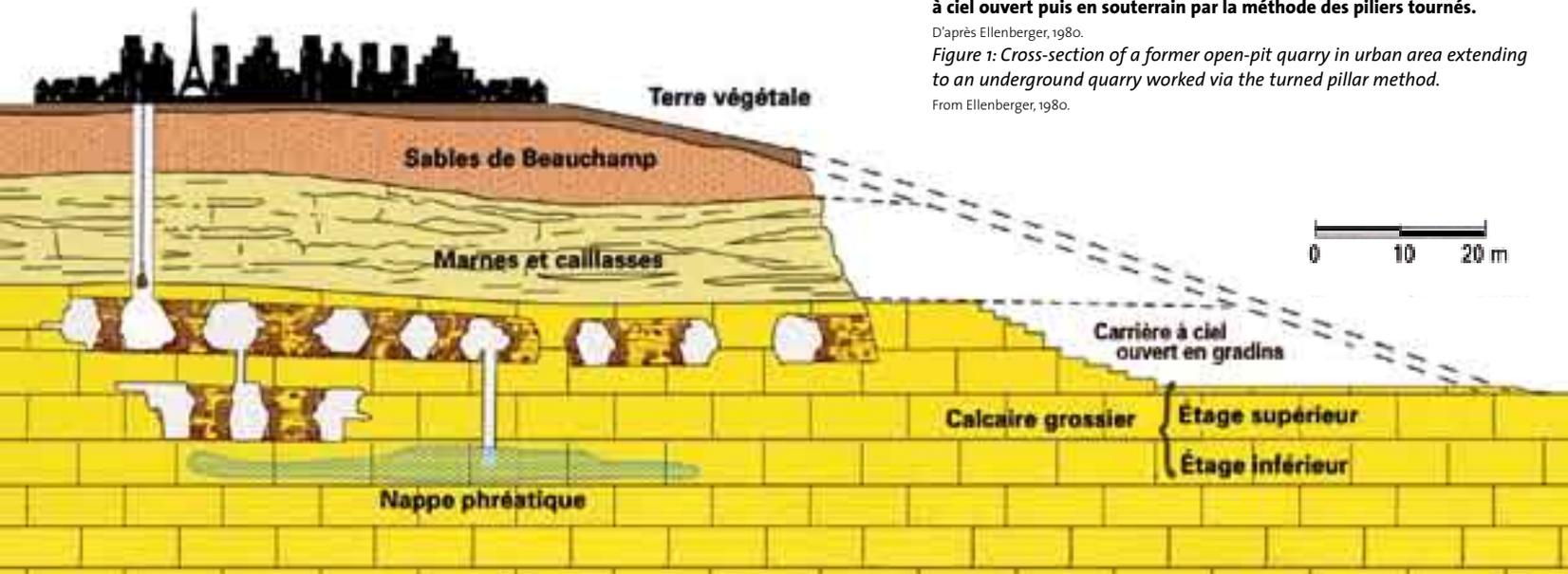
▲ **Ancienne exploitation à ciel ouvert de calcaire grossier, à Vitry-sur-Seine, Val-de-Marne.**  
*Former open-pit "calcaire grossier" quarry at Vitry-sur-Seine, Val-de-Marne Department.*  
 © IGC

▼ **Figure 1 : Coupe schématique d'une ancienne exploitation en site urbain, à ciel ouvert puis en souterrain par la méthode des piliers tournés.**

D'après Ellenberger, 1980.

*Figure 1: Cross-section of a former open-pit quarry in urban area extending to an underground quarry worked via the turned pillar method.*

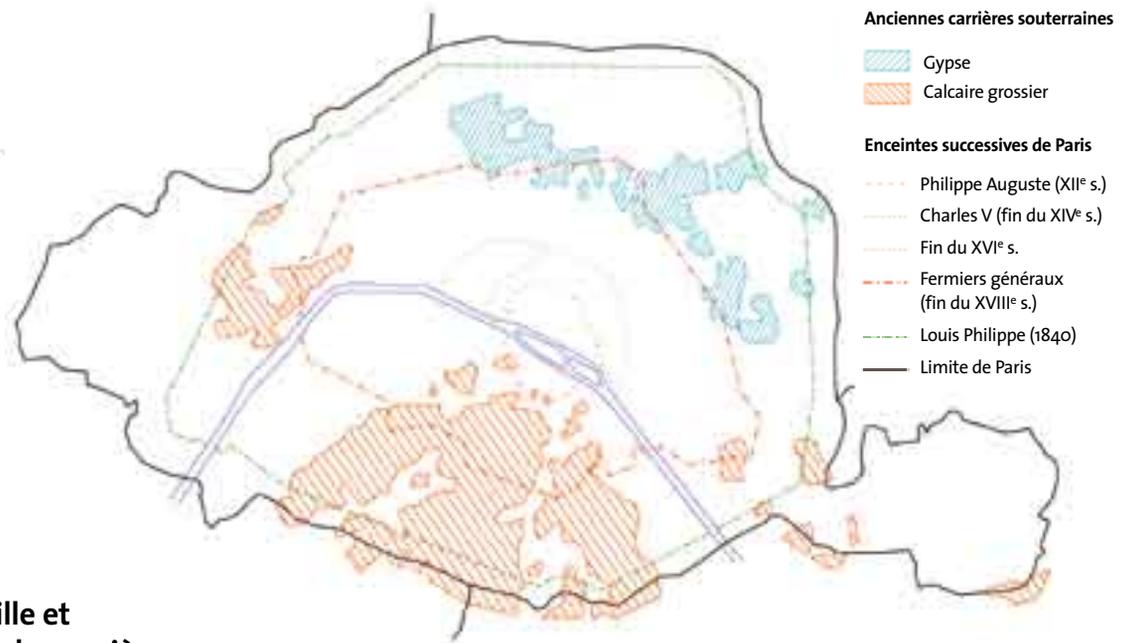
From Ellenberger, 1980.





**Figure 2 : Situation des anciennes carrières souterraines par rapport aux enceintes successives de Paris.**

D'après Broquet, 1976.  
*Figure 2: Locations of abandoned underground quarries with respect to Paris's successive city walls.*  
 From Broquet, 1976.



## Développement de la ville et création de l'Inspection des carrières

La ville s'est ensuite développée en oubliant son passé d'exploitation. Les grandes carrières actives de calcaire se situaient toujours à l'extérieur de ses murs, les grands quartiers d'exploitation étaient alors la Plaine de Vaugirard pour l'argile plastique à ciel ouvert comme en souterrain, le Petit Montrouge, directement au sud de la Porte d'Enfer, la Butte Montmartre ou le Quartier d'Amérique... (figure 2).

La population avait oublié le passé. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, ce passé réapparut sous la forme de grands fontis (effondrements brutaux) remontés jusqu'à la surface (figures 3a et 3b), plus particulièrement au boulevard Saint-Michel et à la Barrière d'Enfer. À la suite de ces accidents, l'Inspection des carrières fut créée en 1777, par un décret de Louis XVI (encadré).



**Figure 3a : Effondrement du sol d'une cave en pavillon.**

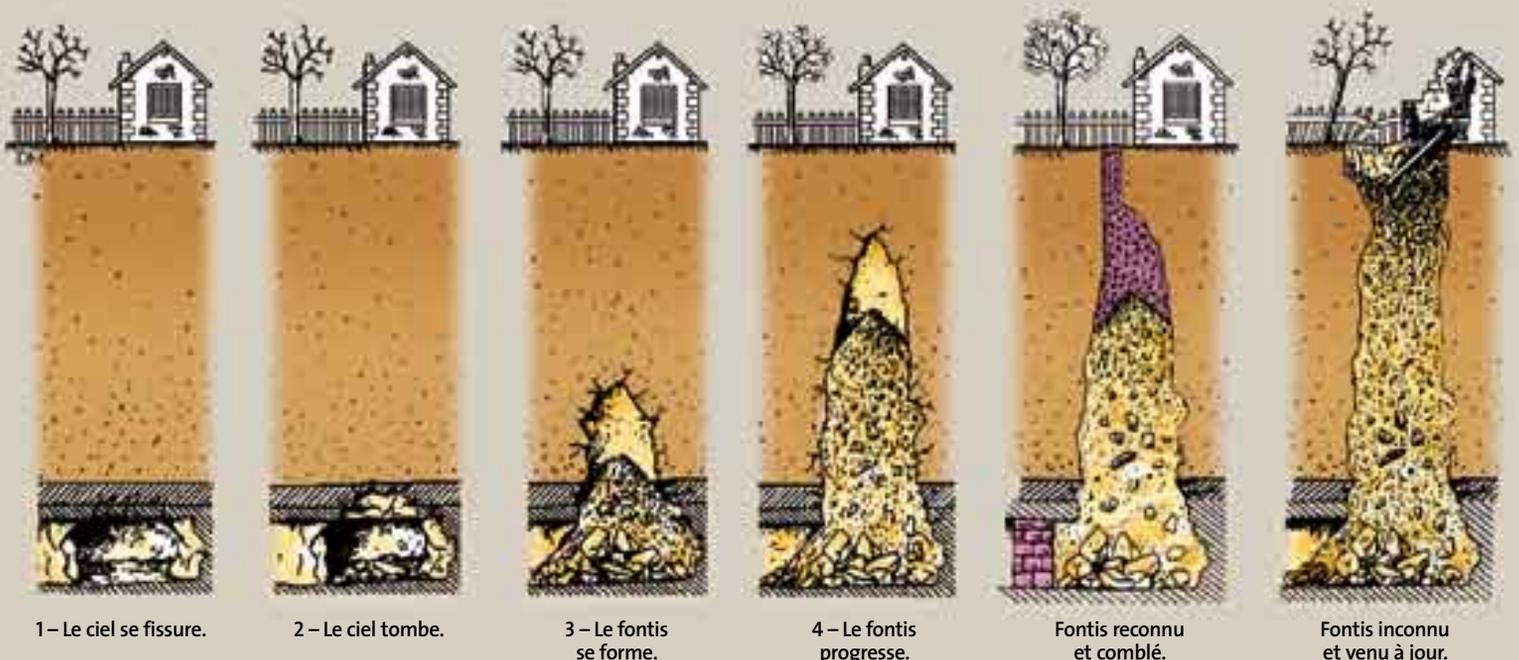
*Figure 3a: Collapse of a basement floor in a single-family home.*

© IGC.

**Figure 3b : Mécanisme de formation d'un fontis jusqu'en surface.**

*Figure 3b: Formation of a swallow hole eventually reaching the surface.*

From Vachat, 1982.



1 - Le ciel se fissure.

2 - Le ciel tombe.

3 - Le fontis se forme.

4 - Le fontis progresse.

Fontis reconnu et comblé.

Fontis inconnu et venu à jour.

## ► CRÉATION DE L'INSPECTION DES CARRIÈRES

Florence Cavallé – Inspection générale des carrières, Patrimoine  
florence.cavalle@paris.fr

Des effondrements graves causés par d'anciennes carrières parisiennes entre 1774 et 1777 sont à l'origine de l'Inspection des carrières créée par un arrêt du Conseil d'État de Louis XVI le 4 avril 1777. Elle a pour missions le développement de la surveillance et la consolidation des anciennes carrières sous le domaine public. Des recherches sont menées afin de déterminer les limites des carrières pour établir des plans par un levé systématique. Dès 1779, un système de confortations et de galeries de visites sous le domaine public est mis en œuvre. L'IGC rattachée à la direction des Mines en 1810, puis à la préfecture de la Seine, est devenue un service de la ville de Paris en 1976. Depuis 1777, 300 kilomètres de galeries ont été consolidés par l'IGC sous les différentes rues de Paris et des communes voisines. ■

En 1810, Napoléon interdit définitivement les exploitations sous Paris. Les principaux sites d'exploitation de gypse du nord de Paris, annexés à la ville en 1860, connaissaient eux aussi des effondrements assez importants.

L'Inspection des carrières recherchait les carrières de Calcaire Grossier sous les quartiers du sud, les cartographiait et consolidait les principales artères comme les rues Saint-Jacques et Royale. Elle cherchait également à utiliser ces vides importants. C'est l'époque de la création des catacombes, grand ossuaire édifié en limite sud de Paris afin de vider les cimetières parisiens saturés d'ossements, et de la construction des cabinets minéralogiques (*photo page 17*), sous Héricart de Thury, inspecteur des carrières, où des sociétés savantes se réunissaient pour observer les matériaux en échantillons.

Plus tard, les carrières de calcaire ont été occupées par les champignonnistes (*photo d'entrée*) et les brasseurs (limonades et bières), nouveaux locataires qui ont parfois modifié la physionomie de la carrière, en la recreusant ou en la remblayant. Les conditions atmosphériques (hydriques et de température) y étaient souvent perturbées. Dans le calcaire, les conséquences étaient moindres que dans le gypse, soluble et dont les carrières sont plus hautes et souvent plus vastes. Des refuges de défense passive y furent aussi construits dans les années 1930 pour mettre la population à l'abri des bombardements durant la guerre.

Les principaux sites d'exploitation de gypse du nord de Paris connaissaient eux aussi des effondrements assez importants.

## Incidents sur carrière souterraine

En analysant l'accidentologie en carrière, on remarque que deux séries de dates apparaissent : l'une synchrone ou très proche de l'exploitation et l'autre décalée dans le temps.

La première série vient de l'exploitation historique un peu anarchique. La carrière suivait souvent les limites de parcelles du permis d'extraire plutôt que les lignes naturelles des diaclases<sup>(3)</sup> et les circulations d'eau dans les matériaux visés. Or en région parisienne, les karsts, les lignes de fractures régionales, bien connues aujourd'hui grâce aux observations réalisées en carrière, ainsi que les influences des versants et leurs fracturations particulières en « cuillère » comme dans la craie, n'étaient apparemment pas pris en compte.

Cette connaissance, acquise par expériences parfois tragiques, a conduit l'Inspection des carrières à introduire des règles d'exploitation, notamment sur les formes des galeries (voûte en plein cintre dans la craie, croisement des galeries à angle droit, superposition des piliers entre étages superposés...).

(3) – Diaclase : cassure de roches sans déplacement relatif des parties séparées. Elles sont perpendiculaires aux couches sédimentaires.

### Brasserie dans une ancienne carrière de calcaire grossier.

*A brewery installed in a quarry where Lutetian limestone (the so-called "Calcaire Grossier") was formerly extracted.*

© IGC





Le vieillissement des carrières est à l'origine de la seconde phase d'incidents. Les carrières exploitées par la méthode des piliers tournés, identique à celle du secteur minier, évoluent plus rapidement que celles utilisant la méthode par hagues et bourrages, car leur hauteur est moindre et elles sont en grande partie remblayées. De hauteurs plus importantes, rarement remblayées et frettées<sup>(4)</sup> au niveau des piliers, les anciennes carrières souterraines présentent des fragilités aux croisements de galeries ou dans les salles de taille trop importante par rapport à la résistance aux cisaillements du matériau. Si, lors de l'exploitation, c'est généralement la résistance à la traction du banc de toit qui entre en jeu, lors du vieillissement le cisaillement au niveau du raccord pilier-toit prend son importance. Pour les piliers dans la craie (figure 4) ou la première masse de gypse, la forme en plein cintre ou en ogive a été choisie pour s'adapter à la moindre résistance à la traction des matériaux. Ce sont les nez de piliers, en porte-à-faux au-dessus des galeries, qui ont tendance à basculer vers le vide.

Les décompressions résultant des fléchissements internes à la carrière modifient les circulations des eaux de recouvrement qui constituent dans la plupart des cas le facteur déclenchant de remontée de fontis vers la surface.

Le travail de l'Inspection des carrières (IC puis IGC) a consisté à consolider les carrières tant de calcaire grossier, sous Paris intra-muros, que de gypse alors extra-muros (figures 5). Pour le calcaire grossier,



**Figure 4 :**  
Nez de pilier tombé et début de fontis dans une carrière de gypse.

Figure 4:  
End of a fallen pillar and the onset of a roof collapse in a gypsum quarry.

© IGC.

l'IGC a comblé les carrières, construit des galeries maçonnées sous les rues, à raison d'une ou deux par rue, et remblayé les fontis au fur et à mesure qu'elle en rencontrait.

Pour le gypse dont les exploitations étaient encore actives entre 1810 et 1860, les fontis étaient nombreux et formaient des affaissements parfois importants. Il fut décidé de foudroyer<sup>(5)</sup> ces carrières souterraines même si le foudroyage n'était pas encore une technique dirigeable et fiable. Des vides résiduels trop importants subsistaient et d'autres effondrements anarchiques survenaient. La méthode fut donc interdite et les carrières de gypse comblées, et ce entièrement après

“  
L'histoire  
de Paris  
se confondait  
encore une fois  
avec celle  
des carrières.”

(4) – Frettage de pilier : remblayage en pied de pilier afin de consolider sa base.

(5) – Foudroyage : dépilage brutal, réalisé avec de l'explosif.



**Figure 5**  
À gauche : fontis remblayé en pierres sèches.  
À droite : voûte de consolidation.

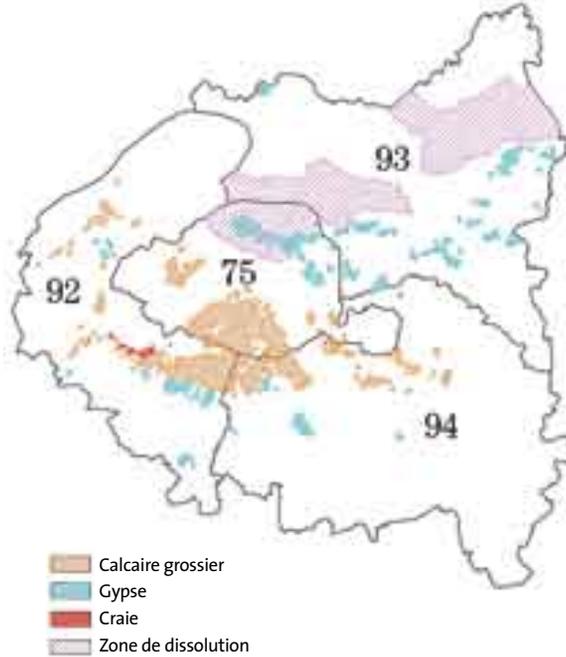
Figure 5  
Left:  
a roof collapse filled in with dry stones.  
Right:  
a consolidation arch.

© IGC.

la Commune de Paris de 1871 qui se poursuit dans les cavages de Montmartre et au Père Lachaise. L'histoire de Paris se confondait encore une fois avec celle des carrières.

Aujourd'hui, il ne subsiste qu'une carrière de gypse en exploitation, en petite couronne et qui est remblayée au fur et à mesure.

L'IGC a petit à petit étendu sa zone d'intervention, de Paris à la petite couronne (figure 6), notamment après l'accident d'Issy-les-Moulineaux de 1961 qui a causé la mort de vingt et une personnes, fait une soixantaine de blessés et détruit un quartier pavillonnaire. Ses missions ont évolué vers un suivi de ces carrières par des visites régulières sous le domaine public, des demandes de permis de construire sur Paris et la petite couronne, et vers une expertise lors de la survenue d'un nouvel incident. Ses missions de base – cartographier et consolider – existent toujours. La seconde consiste davantage en des renforcements ou traitements par injections des voiries



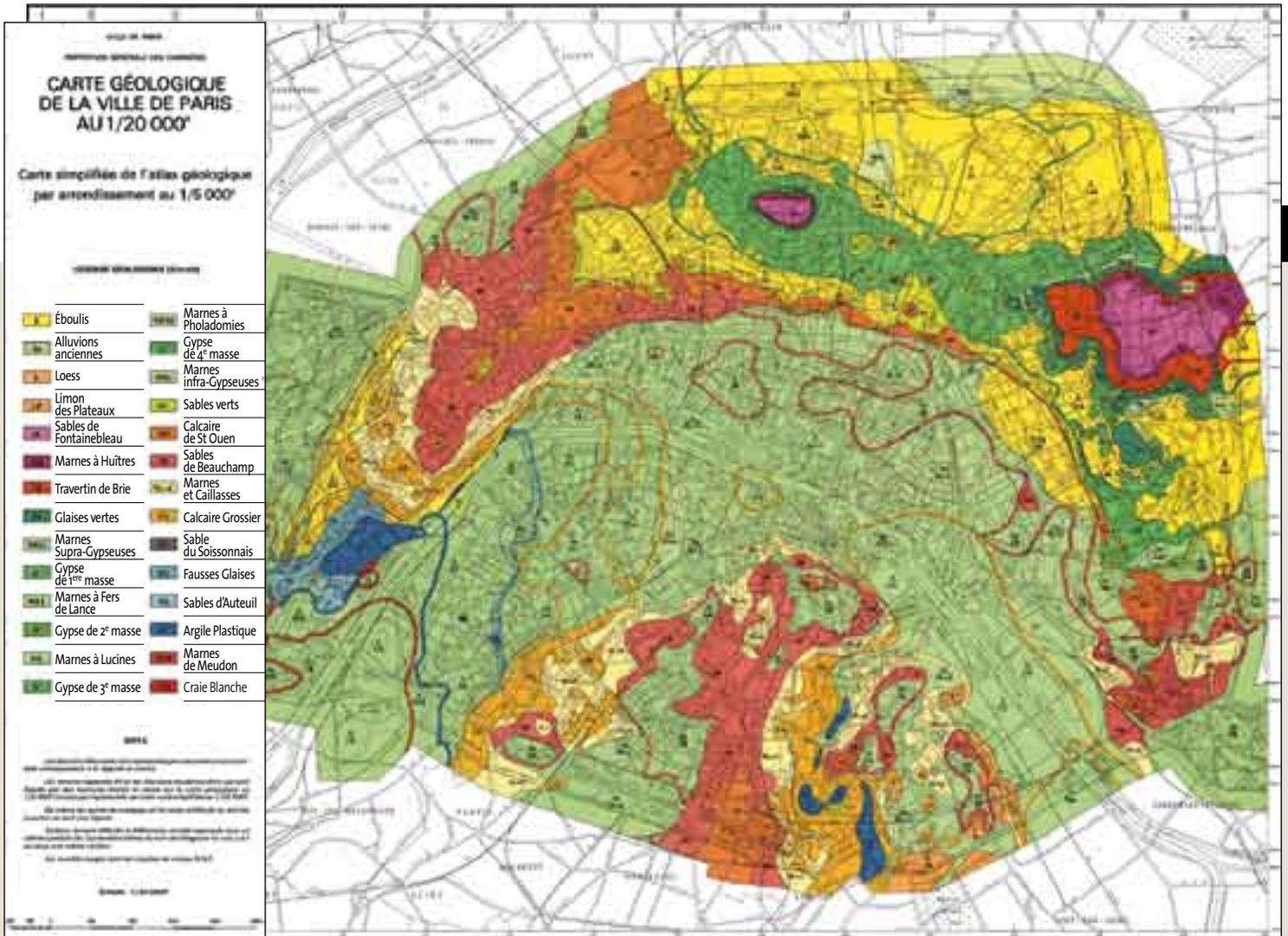
**Figure 6 : Carte des zones de gypse, calcaire, craie et des zones de dissolution : 800 hectares de gypse, 2 350 hectares de calcaire, 35 hectares de craie. Secteurs de missions de l'IGC.**

Figure 6: A map indicating zones of gypsum, limestone and chalk, together with dissolution zones (1980 acres of gypsum, 5800 of limestone and 86 of chalk) IGC sectors of activity.

**Carte géologique de la ville de Paris au 1/20 000.**

1 :20 000 geological map of Paris.

© IGC.





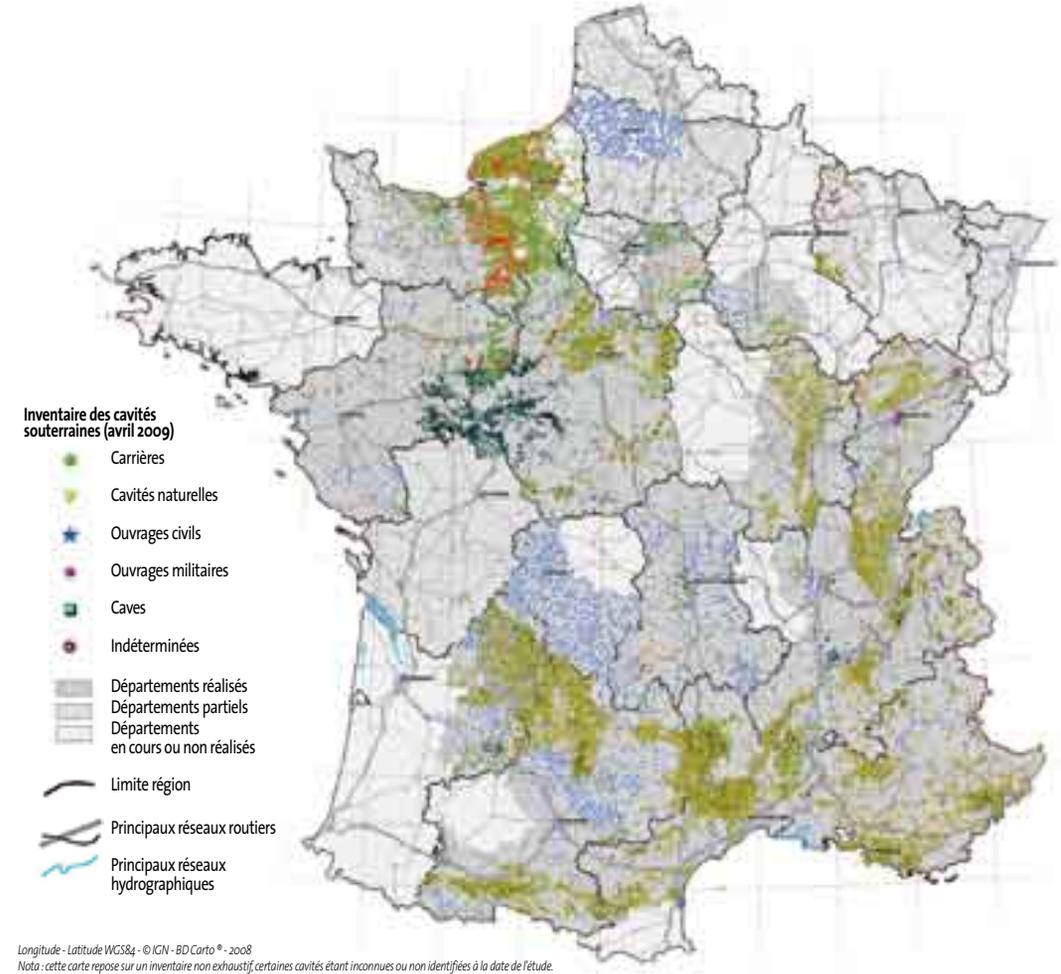
## ► INVENTAIRE DES CAVITÉS SOUTERRAINES, LA BDCAVITÉS

Séverine Bès de Berc – Christian Mathon – BRGM – Service risques naturels et sécurité du stockage du CO<sub>2</sub> – s.besdeberc@brgm.fr – c.mathon@brgm.fr

Toutes les régions françaises recèlent des cavités souterraines. Les grands massifs calcaires (Jura, Alpes, Pyrénées, bordure sud du Massif central) sont affectés par plusieurs dizaines de milliers de cavités naturelles. L'activité des carrières a aussi produit son lot de cavités souterraines en Île-de-France, Nord-Pas-de-Calais, Aquitaine et Poitou-Charentes, Basse-Normandie et Haute-Normandie. Les Pays de la Loire et le Centre recèlent, eux, plusieurs milliers de caves. Enfin les lignes de front successives de la Première Guerre mondiale ont laissé plusieurs milliers de sapes de guerre en Picardie et dans le Nord-Pas-de-Calais.

La présence de cavités souterraines constitue un facteur de prédisposition aux mouvements de terrain en surface. La rupture du toit d'une cavité, ou de piliers dans le cas des carrières abandonnées, peut conduire à la propagation plus ou moins brutale du vide vers la surface. Du fait de leur large répartition sur le territoire national, sous les campagnes comme sous quelques villes, et du caractère inéluctable de leur dégradation, ces vides constituent un danger potentiel tant pour les biens que pour les personnes.

Quelques villes et départements sont dotés de structures permettant de prévenir ce danger, par leurs actions de recensement et de réglementation directe ou indirecte en matière de permis de construire, parfois depuis de très nombreuses années – deuxième moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle pour Paris – mais surtout depuis le début des années 2000. Le BRGM réalise, à la demande du MEEDDM (ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer), des inventaires départementaux des cavités souterraines. Il s'agit de recenser les cavités

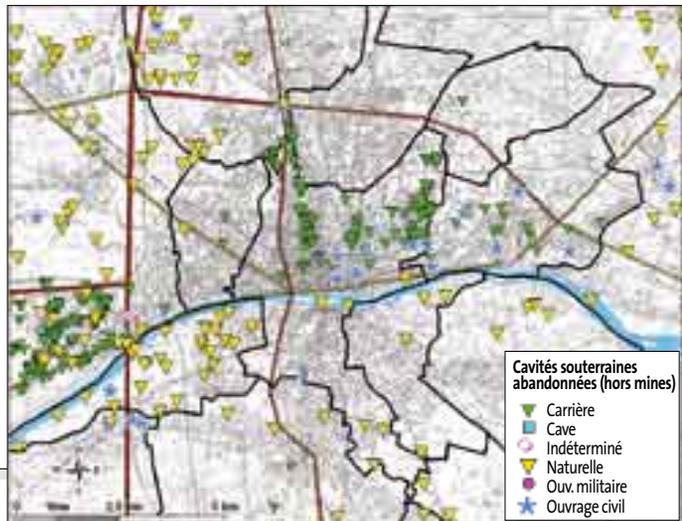


Longitude - Latitude WGS84 - © IGN - BD Cartho® - 2008  
Nota : cette carte repose sur un inventaire non exhaustif, certaines cavités étant inconnues ou non identifiées à la date de l'étude.

**État d'avancement de l'inventaire des cavités souterraines abandonnées (hors mines) du territoire national français, juillet 2009. L'inventaire de la Corse et des DOM/TOM n'est pas encore réalisé.**  
*State of progress of the ongoing inventory of derelict underground cavities (exclusive of mines) in metropolitan France as of July 2009. No inventory has as yet been made for Corsica and France's overseas departments and territories.*

souterraines en zones rurales comme en zones urbaines dans chaque département, puis de les intégrer à la base de données nationale (*carte ci-dessus*), mise à disposition du public via le site internet <http://www.cavites.fr> (plus de 100 000 données déjà recensées). Le site permet d'effectuer des recherches par zone géographique (départements, communes), ou par type de cavités (*plan ci-contre*). Cette démarche de l'état en matière de prévention de ce risque s'accompagne également de l'établissement de PPRN sur certaines communes ou parties de communes. ■

**Exemple d'inventaire de cavités en zone urbaine. Les cavités souterraines de l'agglomération d'Orléans (Loiret).**  
*An example of an inventory of cavities in an urban zone. Underground cavities in the city of Orléans and adjoining areas (Loiret Department).*



© BRGM, Ineris, Lcpc, rtm, MEEDDM.



## ► LES MISSIONS RÉGLEMENTAIRES DE L'INSPECTION GÉNÉRALE DES CARRIÈRES (IGC)

Olivier David – adjoint à l'inspecteur général des carrières – olivier.david2@paris.fr

En application d'arrêtés préfectoraux, l'IGC examine toutes les demandes d'autorisation de construire en zone de risques dus à la présence de carrières souterraines ou à ciel ouvert ou au phénomène de dissolution du gypse. L'avis de l'IGC contient la situation et les caractéristiques du sous-sol et édicte des prescriptions techniques concernant les fondations du bâtiment et la consolidation du terrain qui le supportera.

Les prescriptions sont fonction du niveau de risque qui dépend à la fois de l'état du sous-sol et de l'importance du projet de construction. Cet avis peut prendre la

forme d'une obligation ou d'une simple recommandation d'étude de sol, de travaux de fondations superficielles ou profondes ou de travaux de consolidation souterraine par maçonnerie ou injection.

L'IGC veille à l'application de ces prescriptions qui constituent un support indivisible de l'autorisation de bâtir par des contrôles inopinés pendant le chantier. À la fin des travaux, le pétitionnaire doit remettre à l'IGC un dossier de récolement des travaux pour obtenir la conformité au permis de construire. Les travaux peuvent ainsi être reportés sur la cartographie de l'IGC. ■



### Abandoned cavities in urban environments.

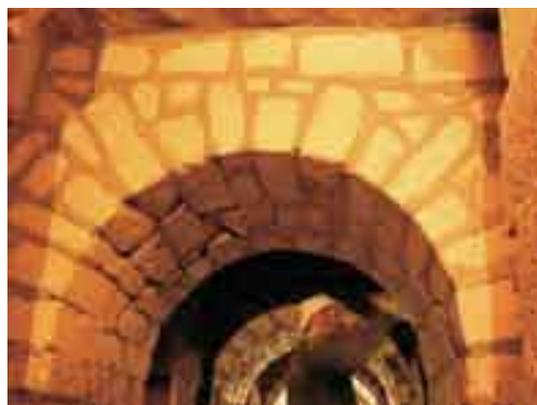
*The interdependence between building materials and the advent of a city is self-evident in the case of Paris. Intensification of quarrying and materials that are chosen are both directly implicated in the city's development. The problems that subsequently arise generally stem from a lack of collective memory. To compensate for this, the Inspection générale des carrières (IGC, the general inspectorate for quarries) was established over 230 years ago. Once an inventory had been drawn up of all quarries beneath the city's surface and different types of incidents, it proceeded to reinforce publicly-owned property and consolidate zones where subsidence had occurred. Because quarrying was still on going in out-lying areas, the city also drafted a set of basic rules for quarrying so as to guarantee the stability of such sites, at least while work was still in progress. These caves located under the city were occasionally reemployed, although only to a very minor extent, but most often they were simply filled in or purposely caused to collapse.*

*For over two centuries, IGC's zone of involvement has expanded to cover metropolitan Paris and its three neighbouring departments. Its duties in preserving information on the subsurface and on properties have expanded to include the management of risks associated with former quarries.*

mais aussi en des consolidations plus traditionnelles dans les sites au patrimoine particulier (figure 7).

L'IGC a, en plus de deux siècles d'existence, accumulé un certain nombre de données et d'expériences qu'elle met à profit pour orienter vers une préservation des personnes et des biens (encadré). Bien avant l'apparition des nouveaux outils, tels les PER (Périmètre de risques) puis les PPR (Plan de prévention des risques) liés aux mouvements de terrain, des périmètres de risques liés aux anciennes carrières avaient été élaborés par l'IGC, à partir des documents collationnés pour réaliser entre autres les cartes de l'atlas des carrières au 1/1 000. Ces documents permettent d'adapter les mesures à prendre pour contrer le risque, à l'échelle de la parcelle, ce qui n'est pas lisible avec les nouveaux outils de gestion des risques. En effet, en site urbain, la densité de parcelles et les enjeux sont tels que la gestion des risques doit se faire à une échelle fine (grande échelle), en regard de la documentation à disposition et des règles d'urbanisme.

Actuellement la symbiose autrefois de mise entre la cité et ses carrières a disparu, un peu au détriment de la conservation du patrimoine. Dans le cadre du développement durable et avec l'amélioration des techniques de consolidation, une autre vie pourrait être donnée à ces anciens vides. ■



▲▲  
**Figure 7 de haut en bas : Constitution de murs en carrière avant injection depuis la surface. Consolidation par voûtes maçonnées dans le circuit des catacombes. Agents de l'IGC boisant un fontis.**

*Figure 7 from top to bottom: Installing quarry walls preparatory to injection from the surface. Consolidation with stone-built arches along the Paris catacombs tour. IGC agents timbering a roof collapse.*

© IGC.



La densification des villes fait l'objet d'un consensus de plus en plus large parmi les professionnels de l'urbanisme et les décideurs politiques.

La croissance du nombre d'habitants au mètre carré obligera à utiliser et gérer les ressources naturelles locales et à réorganiser dans un même temps les besoins logistiques devenus plus intenses.

Le sous-sol est à la fois une ressource et un espace qui est appelé à jouer un rôle décisif dans ce processus de densification.

# L'espace souterrain, élément d'équilibre de la densification urbaine



**Monique Labbé**

ARCHITECTE DPLG  
m.labbe@moniquelabbe.fr

▲  
**L'exemple de Monaco est remarquable par l'utilisation de l'espace souterrain et sous-marin (jusqu'à 18 mètres sous le niveau de la mer). Ici, l'excavation du Grimaldi Forum.**

*Monaco is a remarkable example of how underground space and submarine space may be used (this latter descending as much as 18 metres below sea level). Depicted here, excavation in progress for the Grimaldi Forum.*

© Direction de la prospective, Principauté de Monaco.

**D**ensification, un consensus préside actuellement aux destinées de la ville capitale : elle doit croître, polynucléaire ou agglomérée. La ville compacte émerge, reconstruite sur elle-même, sur les ruines de la désindustrialisation et des quartiers insalubres. Le nombre d'habitants au mètre carré va croître avec force, la zone dense s'étendre, la métropole s'affirmer, évolution obligée, dit-on, pour qu'une ville conserve sa place dans le peloton de tête de la course des villes et pays leaders.

Notre objet n'est pas d'analyser le bien-fondé de cette évolution ni les formes à venir. En revanche, il est d'affirmer que, si l'on veut éviter que la vie métropolitaine ne devienne un cauchemar, deux impératifs devront la structurer : ceux liés au développement durable et ceux dictés par la nécessité d'une logistique sur place. Dans ce contexte le sous-sol aura une place décisive.

## Les paradoxes du développement de la métropole

### *La question de l'utilisation des ressources sur place*

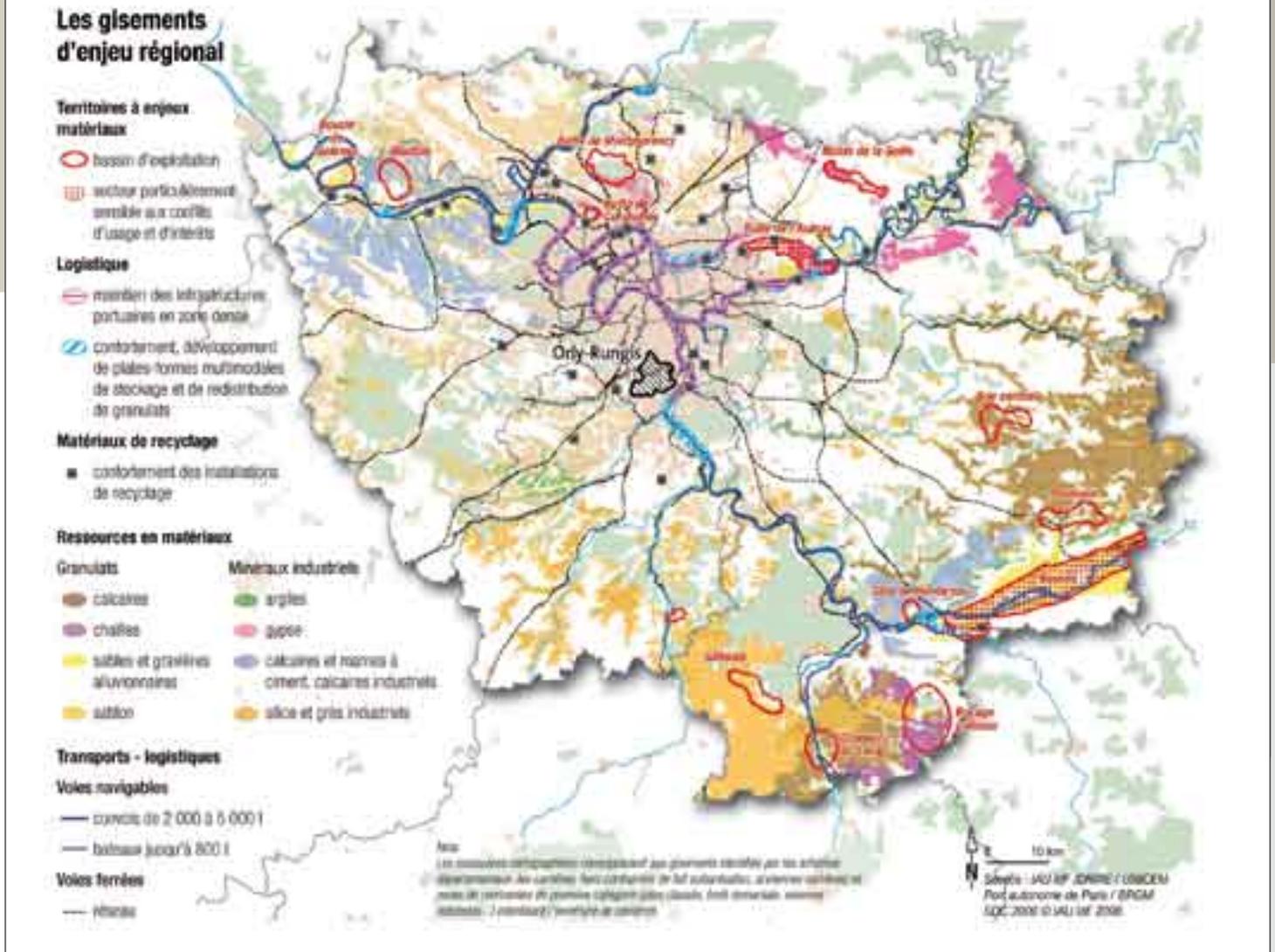
La décision de développer la ville par densification crée un paradoxe fort. C'est alors qu'elle va exploser démographiquement et affirmer son immensité et sa maîtrise technique,

## ► SCHÉMA DIRECTEUR DE L'ÎLE-DE-FRANCE (SDRIF) : LE SOUS-SOL COMME UNE RESSOURCE

« Le sous-sol est trop souvent ignoré, alors que les exigences de compacité et aussi d'insertion des équipements impliquent une réflexion en trois dimensions. De nombreux enjeux de l'aménagement et du fonctionnement du territoire régional sont intimement liés au maintien de la qualité des sols et du sous-sol... »

Le sous-sol doit être considéré comme une ressource stratégique, particulièrement dans les espaces urbanisés... » ■

Citation du Schéma directeur de la région Île-de-France adopté par délibération du Conseil régional le 25 septembre 2008.



que la ville – lieu de la nature domestiquée et de la technique triomphante – va devoir retrouver ses racines pour être viable, renouer avec la nature elle-même, enfin identifier et gérer ses propres ressources pour échapper à une dépendance totale qui la fragiliserait dangereusement. En effet, la ville de ce début du XXI<sup>e</sup> siècle vit comme si les progrès techniques l'avaient définitivement affranchie de toute relation à son milieu. Or les raisons qui ont présidé au choix de son lieu d'implantation, retrouvent avec force une pertinence dont le sens a évolué et doit rencontrer de nouveaux usages : eau potable, nappes phréatiques, terres fertiles, voies de communication, relief protecteur, matériaux pour bâtir, climat, etc.

La mécanisation a effacé le relief en donnant les moyens de le franchir ; les moyens de transport permettent un approvisionnement de la ville en denrées et matériaux depuis les contrées les plus éloignées ; l'eau que l'on sait traiter semble inépuisable... Or le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources non renouvelables contraignent à une réorganisation, à une démarche de développement durable.

Ainsi la ville a-t-elle l'obligation de retrouver un métabolisme équilibré, de renouer avec son territoire dans une approche géomorphologique, géologique, hydrologique, de renouer avec son site et ses ressources naturelles (dont la révolution hygiéniste du XIX<sup>e</sup> siècle l'avait éloignée), en commençant par les identifier. Le sous-sol est l'une de ces ressources (*encadré*).

▲ **Carte des gisements d'enjeu régional de l'Île-de-France. Référentiel territorial du projet de SDRIF adopté par le Conseil régional d'Île-de-France le 25 septembre 2008.**

*A map of deposits representing regional stakes in the Île-de-France region. The territorial system of reference for the SDRIF (Île-de-France regional urban development plan) project approved by the Île-de-France Regional Council on 25 September 2008.*

© IAU ÎdF 2008.

### La question de la logistique urbaine

Autre paradoxe : l'augmentation du nombre d'habitants par la densification. Si elle permet de limiter l'étalement urbain et d'économiser ainsi de l'énergie, elle va cependant engendrer un besoin accru d'espace : espace public « de respiration » pour les habitants, espace de circulation pour accueillir les nouveaux flux, espaces logistiques pour que la ville fonctionne. Pour répondre à ses enjeux vitaux, la ville doit reconsidérer complètement l'ingénierie de ses déplacements et de sa logistique. Pour ses déplacements, la ville compacte a la nécessité vitale d'être fluide, pour les hommes mais aussi pour les matières (les eaux, les marchandises, les matériaux, les produits transformés ou recyclés, les déchets, etc.). La ville compacte, pour atteindre une urbanité humaine, doit garantir la mobilité.

« La ville a l'obligation de retrouver un métabolisme équilibré. »

Une ville vivable doit pouvoir offrir, entre autres civilités, la possibilité de circuler avec son enfant sur un trottoir suffisamment large et sûr pour lui lâcher la main afin qu'il puisse faire l'expérimentation de l'espace extérieur urbain. Or urbanistes et aménageurs ont beau découper en lanières l'espace public de surface pour que vélos, transports en commun en site dédié, piétons, taxis, véhicules individuels raréfiés et camions ou camionnettes de livraison cohabitent, chacun dans sa bande réservée, l'espace public urbain en surface se révèle inexorablement limité.

Quant à sa logistique, la mise en place de circuits courts qui réduisent les déplacements devient une évidente nécessité. Elle induit que la ville traite sur place les produits utiles à son fonctionnement et valorise à la fois les ressources de son site et celles qu'elle-même produit (qu'elle transforme ou qu'elle rejette) [Barles (2006)<sup>(1)</sup>]. Quelle place offrir au nécessaire retour de certains moyens de production et de transformation des ressources que la ville produit elle-même pour subvenir sur place à ses besoins et augmenter son autonomie (déchets, chauffage, climatisation, production d'énergie, data centers...) ? Si des terrains sont mutables, la surface de la ville, elle, n'est pas extensible. Où trouver, alors,

l'espace de ces solutions neuves sinon dans la prise en compte de l'évidence que la ville a un sous-sol ?

Pour répondre au besoin d'espace comme au besoin d'économie d'énergie, dans une perspective de développement durable, le sous-sol se révèle incontournable.

### Une réponse décisive : l'utilisation du sous-sol

#### Une réponse globale

C'est parce qu'il est partout et encore relativement libre, disponible, accessible, qu'il peut devenir un espace privilégié pour la construction de la ville dense. Étant partout, il permet d'intervenir en tout point et ainsi de donner sa cohérence à la ville, à condition de penser son utilisation dès maintenant dans sa globalité, afin d'éviter que ses différents usages n'aboutissent à une multiplication de réseaux inextricables et de penser son aménagement à l'échelle d'un territoire [Labbé (2001), Duffaut (2007)].

#### Un sous-sol fragile

Ainsi, pour les opérateurs, aux questions urbaines posées par la métropolisation, il apparaît de plus en plus que les solutions souterraines sont les plus pertinentes : de nouveaux concepts, de nouvelles idées voient donc le jour tels que la collecte pneumatique souterraine des déchets ou le transport souterrain des marchandises, idées porteuses d'avenir déjà en œuvre dans d'autres pays (*encadré*). Techniquement, il n'est rien d'impossible : les technologies progressent très vite, on peut tout imaginer d'autant que, vu les délais de mise en œuvre, les projets conçus aujourd'hui bénéficieront au moment de leur réalisation de technologies bien plus avancées que celles que l'on connaît au moment de leur conception.

Dans le même temps et paradoxalement, ces solutions et notre capacité technique à les réaliser représentent un nouveau danger pour l'espace souterrain. Le sous-sol en effet est une ressource multiple : eau, énergie, matière, espace urbain disponible, et seule une gestion éclairée peut assurer la longévité de ses qualités intrinsèques. Il ne faut pas compromettre son équilibre et son avenir par des réalisations partielles qui, en avançant au coup par coup, boucheront des possibilités d'extensions de réseaux ou, en ajoutant de nouvelles nappes de réseaux aux nappes précédentes, créeront une succession de résilles de plus en plus profondes qui rendront impossibles à la fois l'accès au tréfonds et l'organisation d'une ville épaisse dont les centres de vie de surface ne soient pas coupés de leurs prolongements souterrains.

(1) « La ville n'est-elle qu'un lieu où se concentrent des nuisances et des consommations qui seraient exportées vers un environnement naturel plus étendu ? N'existe-t-il pas une circulation endogène des flux, une circulation indéniablement et purement urbaine ? » (Barles, 2006)



## ► TRANSPORT SOUTERRAIN DE MATIÈRES ET DE MARCHANDISES

Un système de collecte souterrain des déchets est exploité par la société suédoise ENVAC depuis 1961. Les déchets triés par les utilisateurs dans des bornes sont aspirés dans des conduites souterraines jusqu'à des stations de collectes. Il existe aujourd'hui environ 700 installations dans le monde, dont trois en France.

Le transport de fret en souterrain a fait l'objet de plusieurs recherches : à Amsterdam pour le transport des fleurs vers l'aéroport Schiphol ; aux États-Unis pour le transport intérieur de conteneurs entre les ports ; actuellement, en Allemagne, pour un système ferré souterrain automatique (CargoCap) de transport par des capsules sur rails circulant dans un réseau de pipeline de 1,60 mètres de diamètre, adaptable à différents types de chaînes logistiques. ■



▲ **Schéma du procédé de la société ENVAC de collecte des déchets sous vide (exemple de mise en œuvre pour les centres historiques).**

*Diagram of the ENVAC company's process for refuse collection under vacuum (an example of implementation for historic city centers).*

© ENVAC.

◀ **Simulation du réseau CARGO CAP de transport de marchandises en souterrain.**

*Simulation of the CARGO-CAP underground merchandise transportation network.*

© Visaplan.



## Les éléments clés d'une bonne utilisation du sous-sol

### Connaître, organiser, prévoir

Le sous-sol dans sa richesse est le lieu où des interventions non coordonnées sont à proscrire impérativement ; il souffre de n'être utilisé que pour ses qualités les plus communément connues, alors que l'utiliser de manière partielle revient à être aveugle de ses autres potentialités, au mieux à simplement s'en priver, au pire à compromettre définitivement la valorisation de ses autres richesses. Une démarche durable induit donc de connaître l'ensemble des caractéristiques et poten-

tialités du sous-sol, de choisir, en fonction des buts recherchés, lesquelles seront prioritairement exploitées en interrelations avec les autres, et de prévoir les impacts qu'auront ces interventions sur les composantes du sous-sol.

Il s'agit par exemple de ne pas contaminer des nappes d'eau à l'occasion de forages ou d'excavations, d'éviter les surpompages qui perturbent l'équilibre des terrains ou encore d'évaluer l'impact de la barrière continue que forme un nouveau tunnel pour l'écoulement naturel d'une nappe. Mais il peut s'agir aussi d'organiser le sous-sol pour l'utiliser de manière rentable sans gêner



d'espace. Il est curieux de constater que les critères de rentabilisation des espaces qui ont cours en surface disparaissent en sous-face.

Enfin, il convient de rendre complémentaires les vides et les pleins, de prévoir l'usage des déblais ou des matériaux extraits quand on creuse une cavité, ou de savoir utiliser une cavité lorsque l'on extrait des matériaux. L'exemple de Kansas City est, de ce point de vue, exemplaire. Depuis 1928, les carrières de Kansas City font l'objet d'une double utilisation : exploitation et réutilisation des vides créés. Aujourd'hui, le site accueille différentes fonctions : entrepôts de grains, agrumes et autres marchandises périssables, ateliers, bureaux et business parks. Le site présentait en 2005 plus de 5 millions de m<sup>2</sup> en souterrain.

Ce besoin d'évaluation nécessite de se doter d'outils, car si la surface en dispose, le sous-sol ne les a pas assimilés et n'en a pas encore élaboré de spécifiques.

**Créer des outils d'évaluation et de conception**

**La visibilité et le « porter-à-connaissance »**

Avant tout, comment aborder le sous-sol dans sa globalité si on ne le voit pas ? La méconnaissance de l'immense potentiel offert par le sous-sol représente à l'évidence le frein principal. Aménageurs comme décideurs ne soupçonnent même pas que le sous-sol leur permettrait de restructurer profondément des

“ Organiser le sous-sol pour l'utiliser de manière rentable sans gâcher d'espace. ”

quartiers alors qu'ils sont limités à des interventions interstitielles en surface. Ainsi, parmi les outils à créer, celui de la visibilité est primordial (*encadré*).

Il s'agit à la fois de créer et gérer des banques de données et de construire une visibilité du sous-sol, à l'égal de celle de la surface, qui regroupe les connaissances sur le sous-sol et soit capable d'en faire une représentation visuelle simple à plusieurs niveaux de lecture.

**Le diagnostic des freins à l'utilisation du sous-sol**

De nombreux freins dont le coût, la complexité juridique et réglementaire, inhibent toute velléité. Ainsi est-il nécessaire d'abord de les diagnostiquer, puis de travailler dans chacun des domaines environnemental, socio-économique, juridique et réglementaire, à l'élaboration d'outils d'évaluation et de conception permettant de rendre le sous-sol attractif, tant pour les utilisateurs qu'en amont pour les aménageurs, les décideurs. C'est la démarche très rigoureuse qu'a eue, pour les galeries multiréseaux, le projet national Clé de Sol pour aboutir à l'établissement d'un guide à l'usage des acteurs de l'aménagement.



Plan de lotissement du parc d'activités. SubTropolis (Kansas City) exploite les carrières et aménage l'espace souterrain en fonction des demandes. En bleu, les parcelles disponibles, en gris les espaces loués. Plot layout for the business park. SubTropolis converts the quarries and develops the underground space on demand. The lots still available are shown in blue and those already let, in grey. © SubTropolis, www.subtropolis.com



### Développer de bonnes pratiques

D'ores et déjà, sans attendre qu'une telle étude aboutisse, on peut mettre en évidence des règles qui modifient les habitudes. La première est de comprendre qu'une restructuration respectueuse du cadre bâti existant n'est possible, à l'échelle d'une métropole déjà dense, qu'en aménageant l'espace souterrain en même temps que la surface. Une telle vision globale du dessus et du dessous peut transformer de manière radicale la ville, qui se découvre alors une épaisseur et les espaces supplémentaires qu'elle peine à trouver en aérien (encadré).

Il faut apprendre ensuite à aménager la sous-face comme on aménage la surface, en s'inspirant des outils de conception de l'urbanisme de la surface comme les ZAC, pour aménager le sous-sol sur des

emprises territoriales larges dans une stratégie de programme qui permette la recherche d'un équilibre économique de projet. La mutualisation des équipements, des infrastructures, des chantiers, permet un partage des coûts entre tous les opérateurs. La mixité des programmes permet d'équilibrer ces coûts par la commercialisation d'équipements les plus divers tels que, par exemple, la logistique, les loisirs ou le commerce suivant le caractère économique du secteur et la demande propre au site. Enfin, l'intégration de paramètres sociaux et environnementaux non monétaires rendent caduque la question du coût sec de l'ouvrage souterrain unifonctionnel au profit de la notion d'investissement, voire de rentabilité, dans une logique qui prend pour références les paramètres du développement durable.

### Deux exemples de modélisation 3D du sous-sol.

**Figure de gauche :** Éléments de définition d'ouvrages souterrains. En rouge : infrastructures projetées. Surfaces bleue, jaune et verte : interfaces entre formations géologiques.

© Geodata

**Figure de droite :** À partir de sondages (barres verticales), modélisation 3D de la variation de la perméabilité d'un secteur du nord bordelais.

© BRGM

*Two examples of 3D models of the sub-soil.*

*Left: Elements defining underground structures. In red, planned infrastructures. Blue, yellow and green surfaces are interfaces between geological formations.*

© Geodata

*Right: 3D modelling of variations in permeability for an area north of Bordeaux on the basis of information derived from boreholes (vertical bars).*

© BRGM



## ► RENDRE LE SOUS-SOL VISIBLE

Pierre Thierry – BRGM – Service risques naturels et sécurité du stockage du CO<sub>2</sub> – p.thierry@brgm.fr

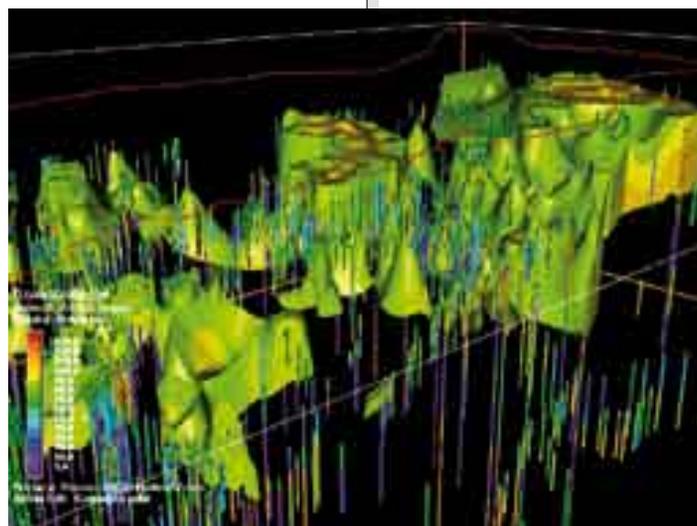
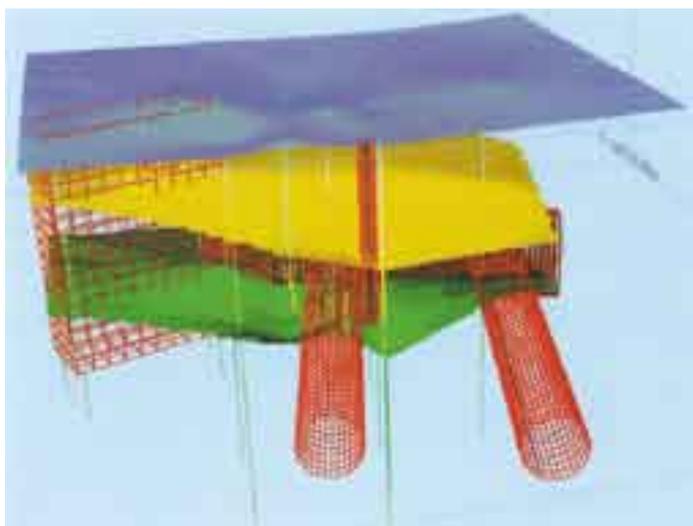
La difficulté de représentation du sous-sol constitue un des freins principaux à une utilisation rationnelle de la ressource qu'il représente. Il y a donc nécessité de rendre ce sous-sol « visible » aux différents acteurs de la ville. Le sous-sol urbain c'est, tout d'abord, un milieu géologique continu qui correspond à un empilement, à première vue anarchique, de terrains divers et d'aquifères souterrains sur quelques dizaines de mètres

d'épaisseur. Mais il s'agit également d'infrastructures enterrées discontinues (réseaux, parkings, métros, etc.). Connaître et visualiser le sous-sol implique d'aborder simultanément ces deux aspects.

Actuellement, les efforts portent essentiellement sur la visualisation du « sur-sol » avec la définition de standards tels que CityGML qui vise différents niveaux de précision,

du territoire au bâtiment. Il s'agit d'assurer l'intégration des caractéristiques du sous-sol dans des modèles 3D de la ville, de type CityGML.

L'intégration au sein d'un même modèle de ces deux types de données n'est encore réalisée que de manière peu convaincante (illustrations ci-dessous). Les outils de visualisation opérationnels restent à concevoir et à développer. ■





► **PÔLE D'ORLY-RUNGIS : POUR UN PROJET D'URBANISME DONT L'ESPACE SOUTERRAIN SOIT LE FACILITATEUR ET LE LIEN**

L'État et le Conseil régional d'Île-de-France déclarent vouloir faire du secteur d'Orly-Rungis le troisième pôle économique de la région parisienne (*carte des gisements d'enjeu régional de l'Île-de-France p. 25*). Ce secteur possède en effet un potentiel de développement important autour de deux grands pôles d'activités : l'aéroport d'Orly et le marché d'intérêt national de Rungis. Or, actuellement, la zone accuse un déficit de liaisons avec les pôles économiques nationaux et les bassins de vie environnants. Le tissu urbain est très fragmenté par les infrastructures de transport viarie ou ferré. Alors qu'une restructuration de ce territoire serait nécessaire, les projets se heurtent aux contraintes d'une zone déjà urbanisée qui dispose de trop peu de foncier disponible pour réaliser une telle restructuration.

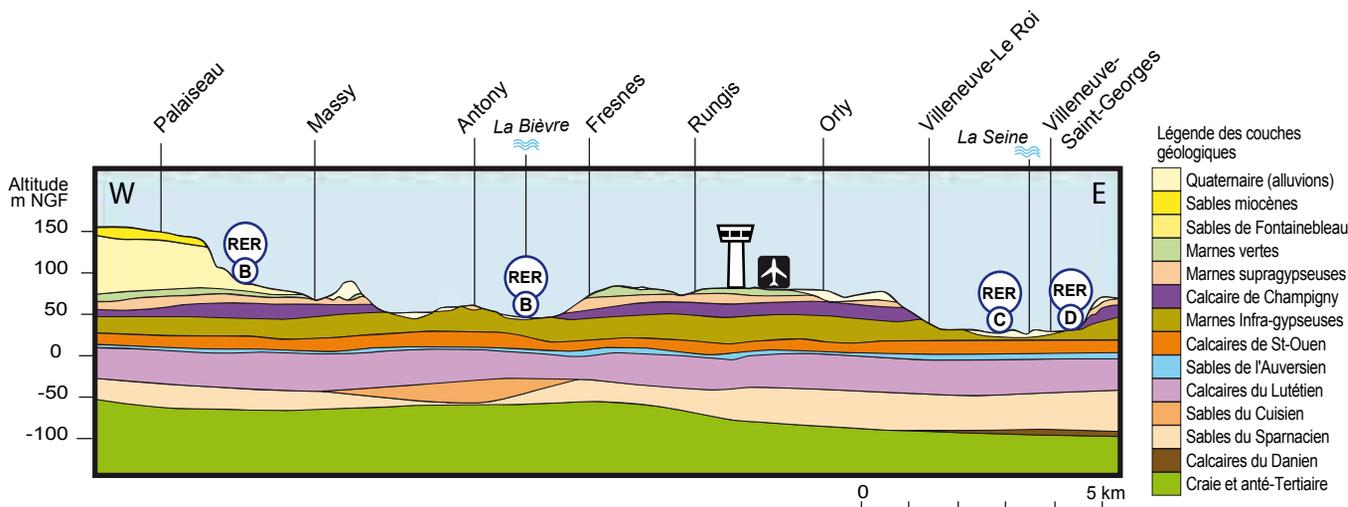
Pierre Duffaut, ingénieur, et Monique Labbé, architecte, résolvent beaucoup de questions posées grâce à l'utilisation de l'espace souter-

rain. Cette réflexion se concrétise dans un projet-concept porté par eux dont l'innovation radicale opère la convergence entre quatre spécificités qui constituent des atouts essentiels pour une restructuration profonde de la zone.

D'abord, dans une approche géomorphologique, les auteurs révèlent que le plateau calcaire sous Orly-Rungis constitue un volume à aménager de 40 mètres d'épaisseur accessible de plain-pied depuis les vallées de Seine, Bièvre et Yvette. Ensuite, situation exceptionnelle, non seulement la propriété foncière et par suite tréfoncière de cette zone de 2 000 hectares est partagée entre seulement six grands opérateurs économiques (dont deux équipements internationaux d'intérêt national), mais encore leurs intérêts peuvent avantageusement entrer en synergie : ce double avantage autorise et appelle la création d'extensions souterraines et la mutualisation de certains aménagements

et d'équipements d'infrastructures connexes sans les inconvénients d'un morcellement du tréfonds. La formule du partenariat public-privé apparaît dans un cas de cette nature particulièrement adaptée. Enfin, atout important, de grands projets d'infrastructure sont programmés dans cette zone : barreau et gare TGV, développement du pôle économique (quartier d'affaires international). Déclencheurs de développement, ces projets permettraient aux équipements existants de s'agrandir en plongeant dans leur sous-sol pour rejoindre les réseaux souterrains.

Ainsi les auteurs proposent-ils d'engager sur Orly-Rungis une réflexion globale dont l'espace souterrain serait le facilitateur et le lien. Avec inventivité ils pensent utiliser pour le sous-sol des outils d'aménagement tels que la ZAC : celle-ci permet en effet de concevoir librement un projet optimisé par rapport aux besoins, au programme et aux équilibres financiers. ■



Coupe géologique du secteur Orly-Rungis

Geological cross-section of the Orly-Rungis sector.

© BRGM

“ Il faut apprendre à aménager la sous-face comme on aménage la surface. ”

Enfin, dès qu'on regroupe des domaines et des compétences si divers, il faut apprendre à anticiper en se posant les questions de l'élaboration des programmes et de la mise en relation des acteurs très en amont du projet. Développer ainsi de bonnes pratiques rendra le sous-sol attractif.

**Enjeux et échéances**

Fondée pour promouvoir les techniques liées aux travaux en souterrain, l'AFTES (Association française des tunnels et de l'espace souterrain) s'oriente



**Monaco : port Hercule et combe de la Sainte-Dévote depuis l'espace souterrain d'accès à la gare TGV souterraine.**

*Monaco: view below from the underground entrance way to the high-speed TGV train station overlooking the Sainte Dévote combe and "the Hercule Port".*

© M. Labbé.

La révolution logistique du XIX<sup>e</sup> siècle, en portant sur une planification urbaine ample de l'assainissement et de l'eau potable, grâce à la création d'un réseau souterrain branché bien au-delà du territoire de la seule ville, puis au développement audacieux d'un réseau de transport des voyageurs en souterrain, a permis qu'un Paris devenu fétide et bloqué se transforme en une capitale mythique au prestige internationalement reconnu.

À l'heure de la densification des villes et de l'érection de tours, une nouvelle échéance s'impose : celle de la nécessaire réorganisation des flux des personnes et des matières en même temps que celle de la réorganisation des services logistiques de la ville. Il ne s'agit donc pas aujourd'hui, comme au XIX<sup>e</sup> siècle, d'une nouvelle révolution hygiéniste mais d'une révolution durable, peut s'appuyer sur une conception globale de la ville et du territoire, travaillant la cohésion du sur-sol et du sous-sol dans des propositions qui réinventent la conception de l'espace urbain. Pour un tel projet, pour une telle ambition, volonté politique forte et engagement de toutes compétences seront utiles !

*“L'espace souterrain comme ressource et espace potentiel de l'évolution de la ville.”*

Des pays comme la Finlande se sont dotés pour leur capitale de schémas directeurs du sous-sol ou, comme la Suisse, l'Italie, le Japon, de lois incitatives pour explorer en priorité les solutions souterraines pour tout projet d'aménagement. Que fera la France du XXI<sup>e</sup> siècle ? ■

aujourd'hui vers l'étude et la promotion de l'espace souterrain comme ressource et espace potentiel de l'évolution de la ville. Elle a décidé, en partenariat ouvert avec le Conseil économique et social d'Île-de-France et avec la participation notamment du BRGM et du CETU, de lancer une réflexion au long cours (qui pourra prendre la forme d'un projet national de recherche et développement) pour identifier les freins à l'usage du sous-sol, mais aussi pour réfléchir aux modes d'approches de son utilisation d'un point de vue socio-économique, environnemental, réglementaire... afin de créer une véritable « boîte à outils ». La visibilité du sous-sol et le « porter à connaissance » étant la base de ce travail.

Et puisqu'un regard global et anticipateur est plus que jamais la règle indispensable, une telle mise en œuvre pourrait servir de base à un schéma directeur du sous-sol<sup>(2)</sup>. Cette réflexion est urgente. En effet, nous nous trouvons devant une seule et véritable alternative : continuer à donner aux nouveaux défis des réponses formellement innovantes mais sur le fond traditionnelles, ou opérer, au XXI<sup>e</sup> siècle, une révolution urbaine aussi profonde et novatrice qu'ont su le faire les hommes du XIX<sup>e</sup> siècle pour Paris.

(2) – Dès 1989, l'association Espace Souterrain, sous l'impulsion de son président le préfet Maurice Doublet, avait fait de la prise en compte de l'espace souterrain dans les politiques publiques un de ses objectifs.



**Underground space, a stabilizing element in urban development**

*Densify – a majority consensus today maps out the destiny of a capital city: multinuclear or agglomerated, it is bound to grow... The compact city concept is emerging, building anew upon itself, on the rubble of de-industrialization and insalubrious quarters. The number of inhabitants per square meter will escalate, and dense areas expand. This is an evolution we are obliged to come to terms with, and this article intends to assert that, in this context of voluntary growth, if we are to avoid having urban living become a veritable nightmare for its inhabitants, two exigencies must underpin this evolution: ones dictated by sustainable development and others imposed by the need for on-site logistics. In this context, the subsurface will have a decisive role to play. In an approach that regards the city as an ecosystem, the subsurface must be conceived as a resource capable of being mobilized: a resource of a material nature, but also a space that can be taken advantage of, notably for logistic purposes. The opportunities for development afforded by the subsurface space of cities can only be discovered and addressed through specific assessment tools. What is more, today's concept of urbanization must incorporate the potential contributions of the subsurface into the prior planning stage of projects and seek to identify possible shared usages amongst the various players involved.*



To guarantee the Barcelona metropolitan area a continuous supply of acceptable quality drinking water, it is crucial that both surface and groundwater sources be tapped. The supply versus demand ratio shows that safety margins are not wide enough and that the area is prone to a water deficit likely to become significant by 2010. Alternative sources of supply currently under consideration by water authorities are water re-use, desalinization and transport from another basin.

The Gaudí dragon fountain, Parc Güell, Barcelona.  
La fontaine dragon de Gaudí, Parc Güell, Barcelone.

© Fotolia



# Water supply for the Barcelona metropolitan area



**Mira Petrovic** <sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup>

ICREA RESEARCH PROFESSOR  
mpeqam@cid.csic.es



**Antoni Ginebreda** <sup>(1)</sup>

SENIOR SCIENTIFIC RESEARCHER  
agmqam@cid.csic.es



**Jordi Martín Alonso** <sup>(3)</sup>

SENIOR SCIENTIFIC RESEARCHER  
jma@agbar.es



**Miren Lopez de Alda** <sup>(1)</sup>

SENIOR SCIENTIFIC RESEARCHER  
mlaqam@cid.csic.es



**Damia Barceló** <sup>(1)</sup> <sup>(4)</sup>

RESEARCH PROFESSOR  
dbcqam@cid.csic.es

(1) Dept. of Environmental Chemistry, Institute of Environmental Assessment and Water Studies (IDAEA), Spanish Council of Scientific Research (CSIC).

(2) Catalan Institution for Research and Advanced Studies (ICREA).

(3) Barcelona's Water Company (AGBAR).

(4) Catalan Institute for Water Research (ICRA), Girona, Spain.

Barcelona's metropolitan area displays a physiographic pattern consisting of a narrow coastal plain, occasionally broadened by river deltas, and a series of mountain ranges roughly parallel to the coastline and separated by rolling plains. Climate is characterized by mild winters and hot summers, with a warming trend observed in the 1990's. Precipitation values oscillate around 500-700 mm a year, although means and averages have little meaning in view of the pronounced inter-annual and intra-annual variations.

An assessment based on data obtained by the supply companies in the Barcelona metropolitan area shows that in 2007 81% of the water input came from surface sources. Of the total water input, 34% (90 hm<sup>3</sup>) came from the Llobregat system and the remaining 47% (124 hm<sup>3</sup>) from the Ter system. The water flow supplied by the Ter and Llobregat Rivers are regulated respectively by three and two reservoirs and purified by one and two filtration plants (figure 1). In addition, the breakdown shows an input of 48 hm<sup>3</sup> of groundwater, representing 19% of all the water resources supplied to the metropolitan area. Within the region, urban consumption shows a decline in the city itself and in neighbouring suburban areas due to population and industrial shifts, while it is growing rapidly in the periphery. Average daily household consumption in the metropolitan area was 113.79 l/inhabitant in 2007.

**Figure 1: Water supply to the Barcelona metropolitan area.**

Figure 1 : L'approvisionnement en eau de l'agglomération de Barcelone.

Source: Catalan Water Agency.



“Between supply and demand safety margins do not meet desirable levels.”

It is important to point out that balance between supply and demand indicates that safety margins do not meet desirable levels and that the area is at risk of a water deficit that is likely to become significant in 2010. In the spring of 2008, for example, during the most acute drought since the 1940's the water shortage in the city of Barcelona was such that the Catalan Water Agency, after many different restrictions (shutting off municipal fountains and beachside showers, prohibiting the filling of swimming pools,

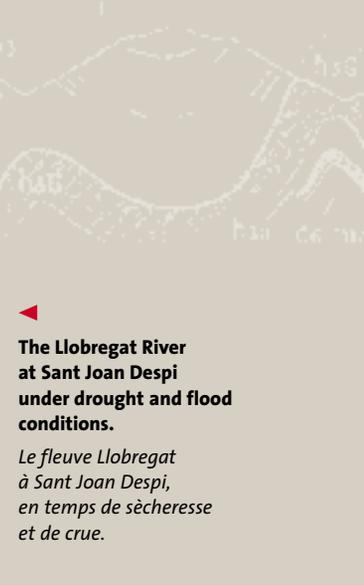
etc.) to no significant effect, decided to install the infrastructure needed to convey water shipped in from other countries (France) and Spanish locations (Tarragona, Almeria) from the industrial port of Barcelona to the filtration plant (Sant Joan Despi). Transport by rail was also considered. However, shortly after work was completed, the rains fortunately came, and the installations were no longer used. Ultimately, few ships actually moored in the port of Barcelona to supply water.

**Photos 1 and 2: Water reserve at the Sau reservoir in April (left) and June (right) 2008.**

Photos 1 et 2 : La réserve d'eau au réservoir de Sau au mois d'avril (à gauche) et au mois de juin (à droite) 2008..

© Catalan Water Agency.





◀ **The Llobregat River at Sant Joan Despi under drought and flood conditions.**

*Le fleuve Llobregat à Sant Joan Despi, en temps de sécheresse et de crue.*

### Water reserve of the Ter-Llobregat system

Floods and droughts are often a common characteristic of Mediterranean regions like that of Barcelona, with major floods in 1962, 1971, 1988 and 1994. Local flash flooding is becoming increasingly severe, especially in the rapidly developing coastal plains north and south of the city. Diffuse inundation after 200 mm/day storms is also becoming widespread. Drought conditions have also increased in frequency in the 1990's and from 2000 to 2008.

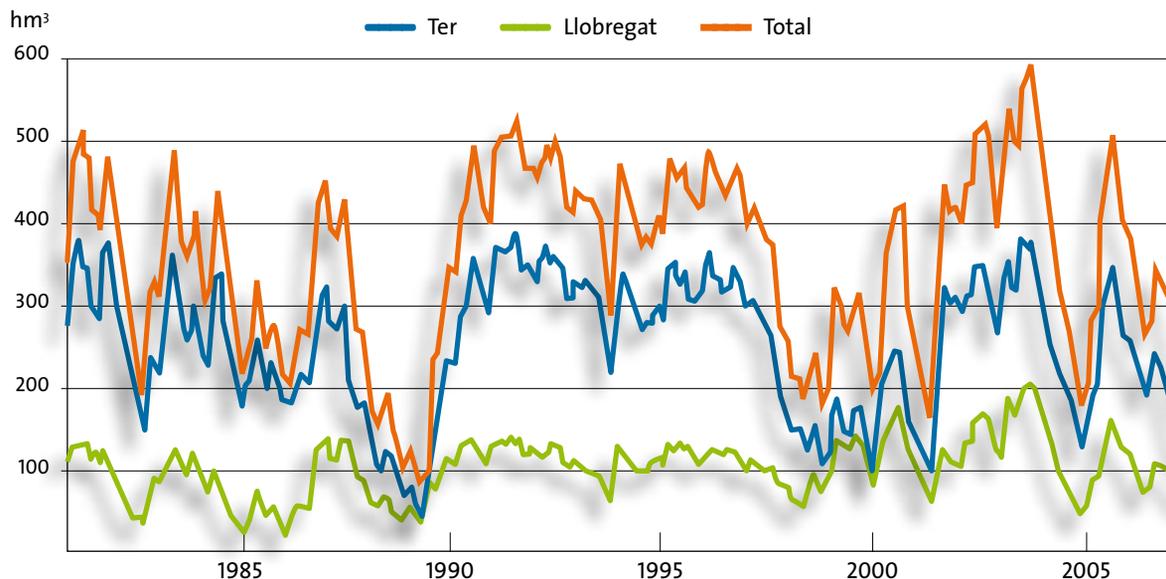
The evolution of water reserves in the Ter-Llobregat system reservoirs is depicted in *figure 2*. In 2007 the level of surface water resources continued the downward trend begun in 2006, although the rains in April and May brought the amount stored in the reservoirs up slightly, to a maximum of 347 hm<sup>3</sup>. The year was thus marked by the onset of a major drought period. This led to the publication of Decree 84/2007 (the Drought Decree),

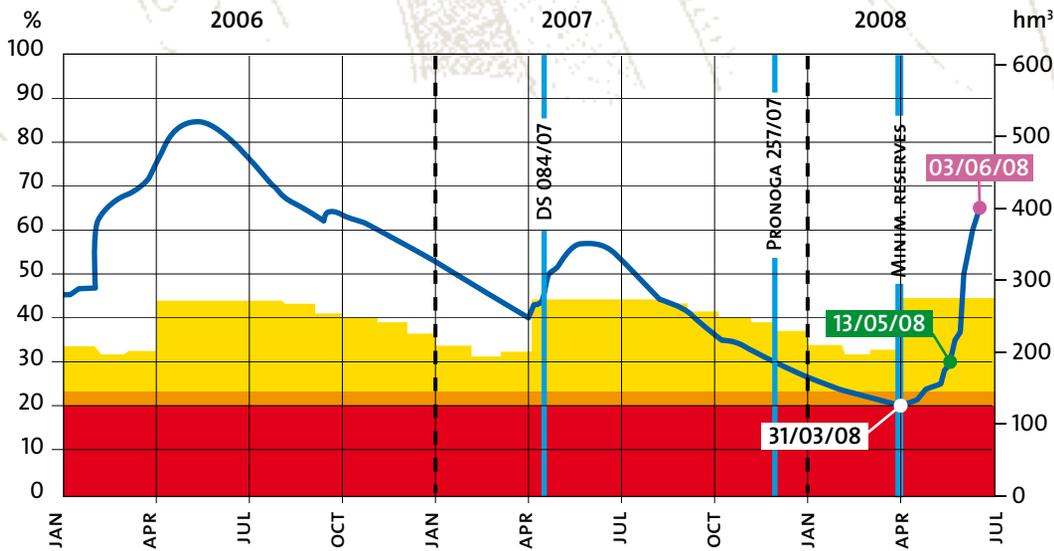
which came into force on 16 April, just when the April rains began (*photos 1 and 2*). However, these rains proved insufficient to compensate for the drop in the amount of water in the reservoirs, which worsened in 2008. As seen in *figure 3*, on 31 March 2008, the lowest value in the Ter-Llobregat system reservoirs was reached (145.9 hm<sup>3</sup>). The warning level was raised from the so-called "exceptionality 1" to "exceptionality 2" and was about to enter the "emergency" situation (application of drinking-water supply restrictions). During this period several management actions were instated including severe limitations on water uses (other than drinking water) like recreational, garden and agricultural irrigation. Other measures such as reutilization were also promoted, and even drinking water supply by ship transport to the city of Barcelona began. In May 2008, the rain started, and hydraulic normality was slowly restored. Thus, for instance, in mid-June the water held in the Ter-Llobregat reservoirs was about 430 hm<sup>3</sup>, which could be considered fully out of the risk zone.

◀ **Figure 2: Evolution of the levels of the reservoirs in the Ter-Llobregat system (1982-2007).**

*Figure 2 : L'évolution des niveaux des réservoirs du système Ter-Llobregat (1982-2007).*

Source: Area Metropolitana de Barcelona (AMB), Metropolitan Environment Data, 2007.





■ Exceptionality 1  
■ Exceptionality 2  
■ Emergency

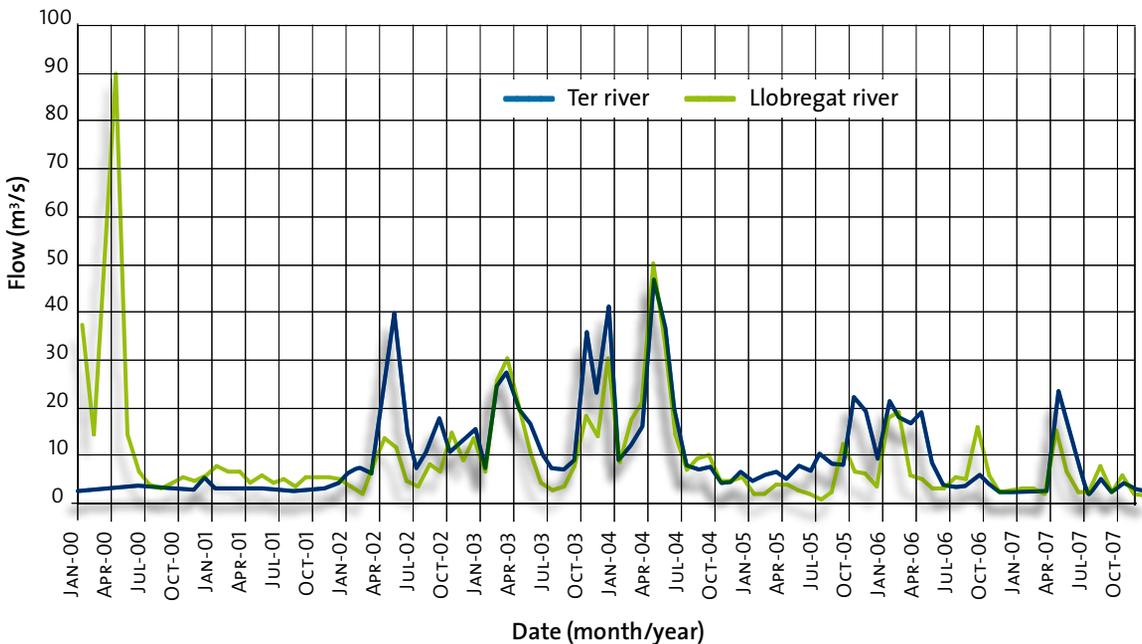
**Figure 3: Levels of the reservoirs in the Ter-Llobregat system on 31 March, 13 May and 3 June 2008 respectively.**  
*Figure 3 : Les niveaux aux réservoirs du système Ter-Llobregat au 31 mars, 13 mai et 3 juin 2008 respectivement.*  
 Source: Catalan Water Agency.

### The hydrological regime of the Llobregat and Ter Rivers

The Llobregat River is 156 km long and comprises a catchment area of about 4957 km<sup>2</sup>. With more than 3 million inhabitants, it is an illustrative example of overexploited watercourse. Together with its two main tributaries, the Cardener and Anoia Rivers, the Llobregat is subject to heavy anthropogenic pressure, receiving extensive urban and industrial wastewater discharges (137 hm<sup>3</sup>/year, 92 % from the wastewater treatment plants), which constitutes a significant portion of its natural flow. As to the Ter River, it shares many of the Llobregat's physical and geographical characteristics. Its headwaters are in the Pyrenees at an altitude of approximately 2000 m and it flows into the Mediterranean Sea some 208 km downstream, covering a catchment area of 2955 km<sup>2</sup>. Although direct anthropogenic pressure

is not as intense as for the Llobregat (ca. 450,000 inhabitants), it supplies drinking water to zones with a heavy tourist trade, such as the Costa Brava, and to the Barcelona metropolitan area (a transfer of about 190 hm<sup>3</sup>/year). In the river's lowest part, agricultural irrigation also accounts for a significant amount of water use.

From a hydrologic standpoint, the Llobregat and Ter are typical Mediterranean rivers, their flow being characterized by high variability governed largely by seasonal rainfall. Mean annual precipitations are respectively 672 mm (3 330 hm<sup>3</sup>) for the Llobregat and 879 mm (2 597 hm<sup>3</sup>) for the Ter, and their corresponding annual average discharges 700 hm<sup>3</sup> and 845 hm<sup>3</sup>. As can be seen in figure 4, the average monthly flow recorded since 2000 for both rivers displays peaks of ca.50 to 100 m<sup>3</sup>/s and minimum values of 1 m<sup>3</sup>/s.



**Figure 4: Monthly flow (monthly mean values) for the Llobregat river at Sant Joan Despí (Barcelona) and the Ter river at Roda, during the period 2000-2007.**

*Figure 4 : Débit mensuel (valeurs moyennes par mois) du fleuve Llobregat à Sant Joan Despí (Barcelona) et du fleuve Ter à Roda de Ter pour la période 2000-2007.*  
 Source: Catalan Water Agency.



◀  
**Reverse osmosis membrane treatment at the Besòs Water Works. This plant treated 124 million m<sup>3</sup> waste water in 2007.**

*Traitement par membrane d'osmose inverse à l'usine de Besòs. Cette usine a traité 124 millions de m<sup>3</sup> d'eaux usées en 2007.*

© DR

## Groundwater resources

Groundwater comes from two aquifers, the Llobregat and the Besòs. Water is extracted from them by wells and is used to supply certain sectors or to cover demand under emergency conditions such as unexpected disturbances in surface waters due to storms or accidental pollutant discharges. Groundwater from beneath the city is also extracted for purposes where quality requirements are less stringent than for human consumption, such as municipal services (watering parks and gardens, street cleaning, public building heating and cooling, ornamental fountains, water plates, etc.), other uses including industrial (heating and cooling buildings and processes like car washing, industrial cleaning, etc.), environmental (regeneration of the Vallvidrera reservoir and the Collserola system, regeneration of the Besòs riverbed) and agricultural. The utilization of such resources has been growing since 2004. Initially, 681,000 cubic metres were used per year by six local councils. By 2007, the amount had risen to more than 1,400,000 m<sup>3</sup>, an increase of 58% over 2003, and 15 councils were tapping this resource from 58 capture points.

A large amount of water is present beneath the city of Barcelona and surrounding area. Over recent years, due to alterations to the hydrological cycle caused by changes in urban patterns and land use and, above all, a decrease in tapping groundwater, formerly employed by many factories in their processes, the groundwater, or phreatic, level has actually gradually risen. This phenomenon is particularly important in areas built on sediments, mostly reclaimed from the sea or marshes, such as the Poblenou district of Barcelona. It has caused a series of problems, among which leakage into the metro and underground railway networks and the basements of buildings and car parks. This water then has to be pumped out at high cost and interferes with the normal operation of metro and underground railway services.

## Combined use of surface and groundwater to obtain drinking water at the Sant Joan Despí water treatment plant

Until 1954, when the first treatment plant for surface water was built in Sant Joan Despí, all the water resources used in Barcelona and its metropolitan area were of underground origin and came from the aquifers in the lower valley and the delta of the Llobregat river. The growing demand for water in the zone of the Llobregat River delta, much greater than the aquifer's resources, brought about a progressive drop in the levels. In 1950, the Sociedad General de Aguas de Barcelona started to force the aquifer recharge artificially by scarifying the riverbed in the zone where the aquifer connects with the river. In 1969, deep artificial recharge also started to be applied to complement natural infiltration and that induced through scarification of the riverbed. However, despite these efforts, the aquifer is still overexploited, with piezometric levels usually below sea level.

Artificial recharge has various benefits: (I) it increases water reserves (for the Llobregat delta, a 3 m increase in



◀  
**An aerial view of the Prat de Llobregat waste water treatment plant. The treated water is used to maintain the environmental flow of the Llobregat river, to form a saltwater intrusion barrier and for agriculture.**

*Vue aérienne de l'usine de traitement des eaux usées du Prat de Llobregat.*

© Google Earth.



*Water restrictions may be alleviated by sensible consumption and desalinization of seawater.*

level procures storage of almost 1 hm<sup>3</sup> of water for each km<sup>2</sup> of surface area); (II) it facilitates water transport and accessibility (because the delta of the Llobregat River's aquifer covers an area of about 110 km<sup>2</sup>, water can be extracted at many different sites close to where it is used, with no need for long pipelines); (III) it improves water quality (since the aquifer acts as a slow filter that retains suspended matter and associated contaminants in the infiltration zones); and (IV) it increases the phreatic level, which in turn saves energy expended in pumping and reduces the intrusion of brine [Martin (2006)].

In-depth artificial recharge is performed through 12 wells: seven pumping wells (already existing when this practice was initiated) with a recharge capacity of about 50 L/s and five new purpose-built wells with a recharge capacity of about 100 L/s. The total infiltration capacity of the system reaches levels of 75,000 m<sup>3</sup> a day. Optimum operation requires periodical unclogging by pumping a flow of 200 or 400 L/s, depending on the well, for 10 minutes, every 15 days of continuous operation [Martín (2006)], although the infiltrated water comes from overflow water from the Sant Joan Despi water treatment plant, and the treated water used requires specification in order to avoid altering the aquifer quality.

## Desalinization

The threat of water restrictions is a latent risk that may hopefully be alleviated by raising public awareness of the need for sensible consumption and adopting alternative measures like the desalination of seawater. The new desalination plant of the Barcelona metropolitan area is slated to begin full capacity operation by mid 2009. With a daily output of 200,000 m<sup>3</sup> (60 hm<sup>3</sup>/year), this plant is at the present one of the largest ones implementing reverse osmosis in Europe, and in the world. Water intake will be done at sea, on a level with the airport, some 2.5 km from the coastline and at a depth of 30 m. At this distance and depth, the Llobregat delta sediments will be avoided, ensuring the water collected will be of good quality and at optimum temperature.

## Water quality and treatment

Due to human pressures, frequent pollution episodes affecting the aquifer have been reported: trichloroethylene, hexavalent chromium, gasoline and polychlorinated naphthalenes [Godé *et al.* (1993); Ventura *et al.* (1997)]. Both priority and emerging contaminants have been shown to pollute the water of the Llobregat River and aquifer to varying extents as a result of the intense and ever-increasing human activities (agriculture, industry, urban) conducted in the Barcelona area and upstream. Examples of organic contaminants found to be present in these waters include pesticides, surfactants, phenols, phthalates, bisphenol A, pharmaceuticals, estrogens, progestogens, and drug-abuse substances [Petrovic *et al.* (2002); Kuster *et al.* (2008); Postigo *et al.* (2008)]. Poor water quality, especially for surface water, and its corresponding effect on aquatic ecosystems, long ago necessitated implementation of exhaustive treatment processes and their continuous improvement over the years by calling on the most recently developed, up-to-date technologies, proven effective in rendering the levels of these contaminants undetectable or insignificant.

However, the main problem is high salt content [Fernández-Turiel *et al.* (2003)], as the quality of the Llobregat River waterhead is deteriorated in the upper-middle part of the catchment due to mining and industrial activities related to potash exploitation. The water contains high Na, K, Mg, Cl<sup>-</sup>, Br, Rb, and Sr concentrations due to daily dumping of salt mining effluents. This saline fingerprint persists downstream and ultimately is responsible for the formation of halogenated by-products during potabilization (chlorination) of water for drinking purposes.

Artificial infiltration of surface water through the riverbed and the deep recharge of treated water into the aquifer have helped ensure water availability at all times, even during the most extreme drought events, with the exception of the one in the spring of 2008. However, overexploitation of the aquifer both for drinking water production and other purposes has resulted in a water table consistently below sea level, thereby fostering marine intrusion and groundwater salinization. At present, the main alternatives available for tackling water shortage during drought events and reducing current pressures on surface and groundwater resources are water desalination and wastewater re-use. ■

## Approvisionnement en eau de l'agglomération de Barcelone

*Une évaluation basée sur des données fournies par les services d'approvisionnement en eau de l'agglomération de Barcelone indique qu'en 2007, 81 % de l'apport provenait d'eaux de surface (fleuves Llobregat et Ter) par rapport à 19 % seulement issu de la nappe phréatique. Du point de vue hydrologique, le Llobregat et le Ter sont des cours d'eau typiques de la zone méditerranéenne en ce que leur débit est caractérisé par une forte variabilité largement gouvernée par la pluviosité saisonnière. Le débit moyen mensuel des deux fleuves enregistré depuis 2000 présente des maxima d'environ 50 à 100 m<sup>3</sup>/s et des minima de 1 m<sup>3</sup>/s. Ces fluctuations peuvent être considérées comme intrinsèques à la climatologie méditerranéenne. Par ailleurs, les scénarios prévus par le GIEC pour cette région semblent présager non seulement un déclin généralisé des précipitations mais aussi une exacerbation des effets saisonniers associés à des événements hydrologiques extrêmes tels qu'inondations et sécheresses. Les principales alternatives envisagées aujourd'hui pour faire face à la pénurie d'eau en cas de sécheresse et réduire les pressions actuelles sur les ressources en eaux souterraines et de surface sont le dessalement et la réutilisation des eaux usées. Cet article fournit une vue d'ensemble de la demande et des ressources disponibles en eau de l'agglomération de Barcelone en fonction des deux sources principales : les fleuves Llobregat et Ter et leurs réservoirs respectifs. Il aborde également l'utilisation conjointe des eaux souterraines et de surface pour puiser l'eau potable, et ses implications vis-à-vis de la qualité et de la quantité d'eau ainsi disponible.*



La reconquête des espaces dégradés <sup>(1)</sup> en milieu urbain et leur retour à un usage économique ont acquis une importance particulière dans l'Union européenne ces quinze dernières années. Mais les espaces à usage agricole situés en périphérie des villes continuent d'être soumis au mitage <sup>(2)</sup>, souvent du fait de la complexité de la reconversion des sites urbains dégradés. Afin de modifier ces pratiques, il est nécessaire d'intégrer les exigences du développement durable et les différentes situations socio-économiques, légales et politiques en réunissant les diverses disciplines et les porteurs d'enjeux.

(1) Les espaces dégradés sont des sites ayant hébergé, par le passé, des activités industrielles qui ont potentiellement impacté la qualité environnementale du sol, des eaux, et/ou de l'air.

(2) Le mitage est une extension non maîtrisée de zones construites à la périphérie d'un espace urbain.



# Gestion intégrée des sols et sites urbains dégradés



**Sandra Béranger**

s.beranger@brgm.fr

**Anne-Lise Gautier**

al.gautier@brgm.fr

**François Blanchard**

f.blanchard@brgm.fr

BRGM

UNITÉ SITES ET SOLS POLLUÉS, SERVICE ENVIRONNEMENT ET PROCÉDÉS INNOVANTS

**Friche industrielle en milieu péri-urbain, commune de Calan, Roumanie**

*Industrial wasteland in an outer-urban setting, Calan township in Romania.*

© Commune de Calan, Roumanie, 2009.

Les premières activités industrielles ont été volontairement implantées à proximité des villes et certaines agglomérations ont été créées et se sont développées autour d'un noyau industriel. L'augmentation de la population urbaine et les révolutions industrielles ont depuis modelé l'urbanisme autour de ces zones, aujourd'hui souvent dégradées et « délaissées ».

Face aux difficultés rencontrées dans la requalification <sup>(1)</sup> des friches industrielles dans les années 1990, les préoccupations environnementales, associées à la prise de conscience des effets négatifs de la périurbanisation, ont modifié les concepts de l'urbanisme et conduit à l'apparition de la « ville compacte ». Ce concept prône l'efficacité économique, une réduction du coût global logement/transport, un gain en termes de qualité de vie, une économie des ressources foncières, la préservation des paysages et des écosystèmes ainsi qu'une réduction des besoins en ressources énergétiques et matières premières. Sur le long terme, tout développement urbain devra être durable et justifier d'un caractère économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement tolérable.

« Le concept de « ville compacte » est étroitement lié à la capacité de la ville à se reconstruire sur elle-même. »

(1) Mise en place des mesures nécessaires pour rendre compatible l'état environnemental du site avec ses usages futurs.



Le concept de « ville compacte » est étroitement lié à la capacité de la ville à se reconstruire sur elle-même, en requalifiant les zones dégradées. La réintégration de telles zones dans le tissu urbain devrait donc conduire au développement de « quartiers durables », définis par l'association des Eco Maires comme « *un territoire qui, pour sa création ou sa réhabilitation, intègre une démarche volontaire, une conception et une gestion intégrant les critères environnementaux, un développement social urbain équilibré favorisant la valorisation des habitants, la mixité sociale et des lieux de vie collective, des objectifs économiques, de création d'activités et d'emplois locaux, les principes de gouvernance que sont la transparence, la solidarité, la participation et le partenariat* ».

Dans ce contexte, les sites dégradés apparaissent comme des ressources potentielles et deviennent, une fois requalifiés, de véritables zones stratégiques pour des projets territoriaux ambitieux (photo 1). La définition et la mise en œuvre de ces projets nécessitent cependant des partenariats efficaces, intégrant l'ensemble des parties prenantes et la définition préalable d'une « vision » commune.

“ Les sites dégradés deviennent, une fois requalifiés, de véritables zones stratégiques. ”

▲  
**Photo 1 : Résultat de la reconversion d'une friche industrielle (ancien site sidérurgique) en milieu urbain : un bâtiment répondant aux critères du développement durable, Essen Allemagne.**

© Projet européen RESCUE, 2005.  
 Photo 1: Result of a brownfield (former iron and steel industry site) redevelopment in an urban setting (Essen, Germany): a building meeting sustainability criteria.

© The European RESCUE Project, 2005.



## La problématique de la gestion des sols et sites urbains dégradés et de grande étendue

La méthodologie française de gestion des sites et sols pollués [MEDAD (2007)] recommande une requalification des sites dégradés en fonction de leur usage futur. Il s'agit de démontrer que les actions prévues pour la dépollution du site (les « mesures de gestion ») le rendront apte à accueillir le projet d'aménagement. De plus, ce cadre méthodologique recommande une analyse comparative des mesures de gestion possibles pour justifier d'un choix optimal. Cette étape rend le choix d'une mesure de gestion plus transparent, notamment dans le cadre des enquêtes publiques, mais peut toutefois s'avérer complexe pour les sites dégradés de grande étendue, et/ou présentant de nombreux enjeux.

Ce contexte, associé à une conscience environnementale accrue, pousse les collectivités et les porteurs de projets à inscrire leurs opérations dans une perspective de développement durable. Pour les assister, une méthodologie de gestion intégrée des sols et sites urbains dégradés est développée par le BRGM et vise à garantir le choix optimal d'une stratégie de requalification et de réaménagement de ces sites. Elle est applicable à des pollutions associant une ou plusieurs familles de polluants organiques ou métalliques.

Ces travaux, ainsi que ceux menés dans le cadre du projet européen RESCUE [RESCUE (2005)], ont été pris en compte dans les séances de préparation et d'élaboration du guide de l'aménageur sur sites pollués, initié par le Meeddat et l'Ademe (<http://www.developpementdurable.gouv.fr/amenagement-et-sites-pollues/accueil.html>).

### Les grandes étapes de la méthodologie de gestion intégrée de sites urbains étendus et dégradés

Cette méthodologie prévoit huit étapes pour assurer une gestion intégrée et durable de sites dégradés (figure 1). L'acquisition de nouvelles données et/ou décisions à une quelconque étape de la méthodologie nécessite la mise à jour des outils d'aide à la décision et donc une rétroaction et itération des étapes.

#### Étape 1. Caractérisation initiale du site et de son contexte

Les parties prenantes associées à la dépollution et au réaménagement du site sont d'abord identifiées en vue de définir le contexte économique et social du site : nature des activités économiques, type d'habitat et usages du site par la population, attachement des usagers et des riverains à l'existence et au passé du site (base de données BASIAS, IHU, cf. encadrés), etc.

**Figure 1 : Méthodologie intégrée de gestion des sites urbains dégradés de grande étendue – Béranger et al. (2007).**

Figure 1: An integrated methodology for managing large-scale degraded urban sites. Béranger et al. (2007).



<b>Étape 1</b>	<p><b>Caractérisation de la situation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Contexte environnemental, économique, social.</li> <li>▶ Étendue/nombre de propriétaires/parties prenantes.</li> <li>▶ Plan d'occupation des sols national/régional/départemental.</li> </ul>
<b>Étape 2</b>	<p><b>Vision du projet</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Idées de réaménagement.</li> </ul>
<b>Étape 3</b>	<p><b>Bilan de l'existant</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Identifier les sources/vecteurs/cibles.</li> <li>▶ Mettre en place un comité de pilotage.</li> </ul>
<b>Étape 4</b>	<p><b>Investigations et caractérisation du site</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Caractériser les risques en fonction des usages futurs.</li> <li>▶ Définir un domaine d'étude et un découpage de ce domaine.</li> <li>▶ Éliminer les risques immédiats, si existants.</li> </ul>
<b>Étape 5</b>	<p><b>Classement des scénarios pour chaque zone du site</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Définir une matrice des scénarios.</li> <li>▶ Définir les critères d'évaluation, leurs poids.</li> <li>▶ Définir les seuils de préférence/indifférence/veto.</li> <li>▶ Hiérarchiser les scénarios.</li> </ul>
<b>Étape 6</b>	<p><b>Classement des combinaisons de scénarios à l'échelle du site</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Définir une matrice des combinaisons de scénarios.</li> <li>▶ Définir les critères d'évaluation et leurs poids.</li> <li>▶ Définir les seuils de préférence/indifférence/veto.</li> <li>▶ Hiérarchiser les combinaisons de scénarios.</li> </ul>
<b>Étape 7</b>	<p><b>Choix final de la stratégie de requalification et réaménagement.</b></p> <p>Pour chaque combinaison retenue :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Planifier la reconversion spatialement et temporellement.</li> <li>▶ Déterminer le choix final en prenant en compte le plan d'occupation des sols/le plan de réaménagement/le budget/la faisabilité technique/l'acceptabilité du public.</li> </ul>
<b>Étape 8</b>	<p><b>Mise en place de la stratégie de requalification et réaménagement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Définir les risques résiduels.</li> <li>▶ Définir les servitudes éventuellement nécessaires.</li> <li>▶ Mettre en place un plan de surveillance, si besoin.</li> </ul>

**Photo 2 : Une friche industrielle avant requalification, commune de Calan, Roumanie.**

Photo 2: An industrial brownfield prior to rehabilitation, Calan township in Romania.

© F. Blanchard, 2009.



### Étape 2. Vision du projet

Point de départ pour la discussion du projet entre le promoteur et les institutions publiques impliquées, la « vision » du projet rassemble les premières idées de réaménagement. Ces idées sont proposées en fonction des contraintes environnementales, économiques et sociales identifiées, ainsi que des stratégies territoriales et plans d'urbanisme existants. La définition de cette « vision » implique la consultation des parties prenantes et peut inclure les premières évaluations de coûts, de financements et de revenus futurs.

### Étape 3. Bilan de l'existant

Un « état zéro » du site est dressé en consultant différentes études et en réalisant des visites de terrain (photo 2). Les sources de pollution sont localisées et caractérisées, les vecteurs de transferts plausibles (eaux de surface et souterraines, air, sols) définis et

## ► BASIAS, LA BASE DES DONNÉES ISSUES DES INVENTAIRES HISTORIQUES RÉGIONAUX (IHR)

L. Callier, J.-P. Gérard – BRGM, service environnement industriel et procédés innovants – l.callier@brgm.fr – jp.gerard@brgm.fr



Il est réalisé sans préjuger d'une éventuelle pollution au droit des sites inventoriés.

La finalité de la base de données BASIAS est de reconstituer le passé industriel d'une région et d'en conserver la mémoire pour fournir des informations utiles à la planification urbanistique et à

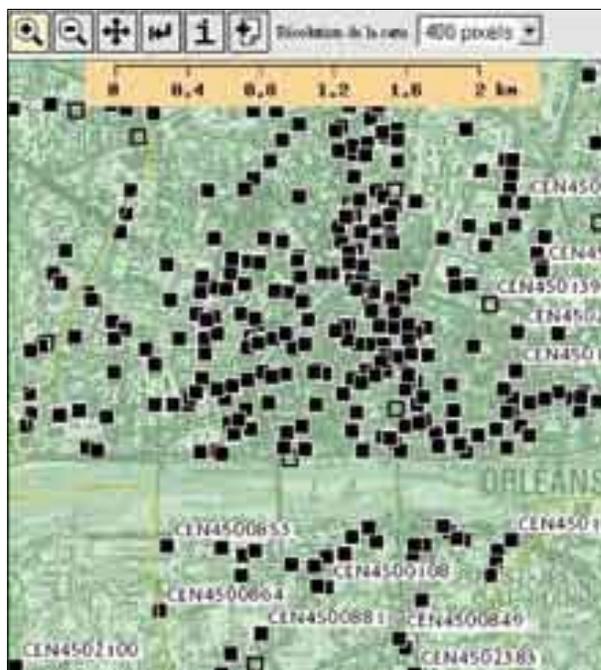
la protection des personnes et de l'environnement. Elle a aussi pour objectif d'aider, dans les limites des informations récoltées, forcément non exhaustives, les notaires et les détenteurs des sites, actuels ou futurs, pour toutes transactions foncières.

Le site internet BASIAS est régulièrement consulté (plus de 40 000 visiteurs par mois). Sa consultation est un atout majeur, avant toute action urbanistique et environnementale. ■

Compte tenu de ses domaines de compétence en ce qui concerne le sol, le sous-sol, les eaux, l'environnement et les bases de données, le BRGM est mandaté par le ministère du Développement durable pour :

- réaliser les Inventaires historiques régionaux (IHR) d'anciens sites industriels et d'activités de service, en activité ou non ;
- créer et gérer la base de données BASIAS, qui en conserve les résultats ;
- afficher gratuitement sur Internet les données acquises (<http://basias.brgm.fr>).

L'inventaire IHR est une démarche nationale appliquée en région et menée par département.



### Exemple de présentation sur Internet des sites géo-référencés de BASIAS sur fond de carte à 1/25 000

An example of presentation on the internet of BASIAS geo-referenced sites on a background map at 1:25,000 scale.

<http://basias.brgm.fr>



les cibles potentielles (populations, écosystèmes, usage des eaux, etc.) identifiées. Des investigations complémentaires peuvent être envisagées.

**Étape 4. Investigations et caractérisation du site**

Après d'éventuelles investigations complémentaires, le domaine d'étude est défini et découpé en zones relativement homogènes, en considérant l'état environnemental du site, les risques sanitaires et environnementaux, les usages. Une carte synthétisant les zones dont l'état est compatible avec l'usage futur et celles nécessitant une requalification pourra aider à ce découpage du site. La dernière phase consiste à définir des scénarios de requalification et réaménagement.

**Étape 5. Classement des scénarios pour chaque zone du site**

Les scénarios précédemment définis pour chaque zone sont classés sur la base de critères permettant d'évaluer le caractère durable du projet. Cette démarche favorise l'acceptabilité, la transparence, la légitimité et la cohérence dans l'évaluation des scénarios.

La reconversion durable est définie comme celle permettant d'optimiser le bien-être des usagers actuels et/ou futurs du site en remplissant un ensemble de conditions : maîtrise du changement global, efficacité économique, répartition équilibrée et équitable des richesses à toutes les échelles. Les critères de hiérarchisation des scénarios sont choisis de manière à évaluer la réponse apportée à ces enjeux et exigences.

**Photo 4 : Excavation au droit d'une zone contaminée par des hydrocarbures flottants dans la zone de battement de la nappe.**

*Photo 4: Excavation directly above an area contaminated by light hydrocarbons at the surface of the aquifer.*

© L. Rouvreau, 2007.



**Photo 3 : Des travaux de requalification de friche – Destruction d'infrastructures bétonnées.**

*Photo 3: Brownfield rehabilitation – The destruction of concrete infrastructures.*

© L. Rouvreau, 2007.



**Étape 6. Classement des scénarios à l'échelle du site**

Les scénarios sont assemblés pour former des combinaisons de scénarios en vue de proposer un réaménagement de l'ensemble du site. Après avoir éliminé les combinaisons redondantes ou incompatibles, les combinaisons restantes sont classées sur la base d'un second jeu de critères optimisant les flux de matières et d'énergie entre le site et l'extérieur et évaluant le caractère durable de la reconversion.

**Étape 7. Choix final de la stratégie de requalification et réaménagement**

Il s'agit de planifier, dans le temps et dans l'espace, la

“ La reconversion durable est définie comme celle permettant d'optimiser le bien-être des usagers du site. ”



reconversion du site pour les combinaisons de scénarios répondant au mieux aux enjeux et exigences du développement durable. La combinaison la plus satisfaisante sera choisie en tenant compte des contraintes et enjeux locaux.

### **Étape 8. Mise en place de la stratégie de requalification et réaménagement**

La combinaison de scénarios choisie est mise en place suivant la planification optimisée identifiée à l'étape précédente et les travaux débutent (*photos 3, 4 et 5*). Ces scénarios entraînent vraisemblablement la présence de pollutions et/ou d'expositions résiduelles. Il s'agit donc de s'assurer que ces expositions résiduelles sont compatibles avec les usages définis, de définir les servitudes éventuelles et de mettre en place un plan de surveillance, si besoin.

### **Les outils d'aide à la décision et leurs fonctionnalités**

B. Roy (cité dans Tille, 2001) définit l'aide à la décision comme : « l'activité de celui qui, prenant appui sur des

*modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution d'un processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part ».*

Plusieurs outils d'aide à la décision peuvent être utilisés : Systèmes d'Information Géographique (SIG), analyse multicritère d'aide à la décision, analyse coût-avantage et analyse coût-efficacité [Béranger *et al.* (2006)]. Ces outils aident à rendre la prise de décision robuste, consistante, transparente et reproductible [Bardos *et al.* (2002)]. Les décisions finales restent cependant du ressort du décideur.

Il est important que ces outils soient compris par les personnes parties prenantes au projet mais non impliquées directement dans leur utilisation, afin que ces dernières valident les résultats.

▲  
**Photo 5 :**  
**La réhabilitation d'une friche industrielle en milieu urbain. Mise en place d'une cellule de confinement de sols pollués.**

*Photo 5:*  
*The rehabilitation of an industrial wasteland in an urban setting. The installation of a confinement cell for polluted soils.*

© L. Rouvreau, 2007.

## ► LES INVENTAIRES HISTORIQUES DE SITES URBAINS (IHU)

L. Callier, J.-P. Gérard – BRGM, service environnement industriel et procédés innovants – l.callier@brgm.fr – jp.gerard@brgm.fr

L'**Inventaire Historique Régional des sites industriels (IHR)**, réalisé par le BRGM, peut être décliné à l'échelle urbaine (IHU) en visant une plus grande exhaustivité des sites inventoriés et leur repérage à l'échelle du parcellaire cadastral.

L'**objectif de l'IHU**, véritable outil de gestion prévisionnelle, est notamment de fiabiliser les actions foncières d'une agglomération

en anticipant les risques de pollutions potentielles d'un ancien site industriel, d'aider à la planification des aménagements/réaménagements en milieu urbain, et de prendre en compte la protection des biens et des personnes en amont du montage des projets.

Dès lors que les sites industriels sont repérés par des coordonnées X et Y, les données qui leur

sont associées peuvent être utilisées, par croisement dans un SIG, avec toutes autres données, par exemple pour rechercher :

- les populations potentiellement exposées au risque saturnin autour d'une ancienne activité industrielle utilisant du plomb ;
- les captages d'alimentation en eau potable qui seraient proches d'un ancien site industriel potentiellement polluant ;

– les établissements sensibles (écoles, établissements de soins...).

Les données peuvent aussi être couplées avec celles relatives aux risques naturels, aux cavités souterraines, aux remontées de nappe, à la sensibilité des sols au retrait/gonflement des argiles... ■

**Illustration de la finalité d'un IHU.**  
Illustration of the end result of an IHU process.

Projet initial



Comparaison Projet/Activités passées



Réaménagement final après diagnostic



**Conclusion :** la connaissance et l'anticipation ont permis d'éviter un surcoût, notamment par adaptation du projet.

### Les outils SIG

Les SIG sont des outils communément utilisés pour le croisement des données, la localisation des enjeux, la détermination d'un zonage, les analyses spatiales ou la visualisation d'indicateurs territoriaux. Dans les processus décisionnels, le recours aux SIG permet de diffuser les connaissances, mais aussi de faciliter le suivi ou la visualisation interactive des impacts du choix des décideurs sur la région d'étude.

### L'analyse multicritère d'aide à la décision

L'analyse multicritère est principalement utilisée pour fournir aux décideurs un outil permettant de progresser dans la résolution d'un problème décisionnel faisant intervenir plusieurs points de vue, même contradictoires. Elle implique la participation des acteurs du projet et permet de porter un jugement entre des scénarios hétérogènes, sur la base de plusieurs critères. Son principal intérêt réside dans sa capacité à simplifier des situations complexes grâce à une décomposition et une structuration de l'analyse.

L'analyse multicritère nécessite au préalable de disposer d'un ensemble de scénarios « en compétition » avant de bâtir successivement :

- des critères permettant d'évaluer ces scénarios ;

- un tableau de performance des scénarios par critères ;
- une agrégation des résultats aboutissant à un classement par préférence ;
- une étude de sensibilité.

Quatre familles de méthodes d'analyse multicritère existent : sans compensation, par agrégation complète, par agrégation partielle et par agrégation locale. Ces méthodes sont encore peu utilisées pour la gestion des sites et sols pollués [Linkov *et al.* (2004)].

### L'analyse coût-avantage ou coût-bénéfice

L'analyse coût-avantage est d'abord un outil d'analyse économique permettant de vérifier si les bénéfices d'un projet dépassent l'ensemble de ses coûts [Pearce *et al.* (2006)]. Un des points clefs réside dans la monétarisation de tous les éléments à considérer. Elle comprend trois étapes :

- identification des coûts et des avantages de la politique ou du projet considéré, au sens large ;
- monétarisation de ces éléments ;
- identification du projet présentant le rapport avantages/coûts le plus élevé.

La principale difficulté réside dans l'évaluation monétaire des différents coûts et avantages, qui nécessite de donner un prix à des biens et services qui n'en ont pas explicitement.

“ Une condition essentielle à la méthodologie intégrée proposée est la mise en place d'une équipe de projet pluridisciplinaire. ”

**Exemple de réhabilitation d'un site minier dans la Ruhr. Aujourd'hui, le site abrite des administrations, des entreprises et un café.**

*An example of rehabilitation of a former mining site in the Ruhr region. Today, the site accommodates administrations, companies and a café.*

© F. Blanchard



### L'analyse coût-efficacité

Plus simple que l'outil précédent sur le plan conceptuel et opérationnel, l'analyse coût-efficacité est mieux adaptée à l'évaluation et à la mesure du rendement de programmes. Elle correspond au concept d'optimisation des ressources et consiste à rechercher les solutions les moins coûteuses pour atteindre un objectif. Elle évite ainsi le problème de l'évaluation monétaire des dommages et avantages.

### Les actions en cours et les futurs développements

Les grandes étapes de la méthodologie de gestion intégrée ont été développées et les outils d'aide à la décision identifiés, mais les détails et conditions de la mise en œuvre de cette méthodologie sont à l'étude, en particulier, les critères associés à l'évaluation de la durabilité de tels projets. Ces critères permettront de mesurer le bien-être des usagers potentiels du site et d'analyser la manière dont ces projets répondent aux enjeux (maîtrise du changement global, efficacité économique et la répartition équilibrée et équitable des richesses).

Obtenir au sein de la profession un consensus sur de tels critères peut être un exercice délicat. Des projets en cours de montage ou d'évaluation sur des sites pilotes et associant un groupe d'acteurs de la dépollution et du réaménagement de sites constitueront un bon préliminaire à la mise en œuvre d'une gestion participative des sites urbains dégradés. Une condition essentielle à la méthodologie intégrée proposée est la mise en place d'une équipe de projet pluridisciplinaire qui gèrera toutes les étapes du projet de réaménagement et assurera une relation pérenne avec ses parties prenantes. ■



### **Integrated management of degraded urban soils and sites**

*Brownfields located in urban areas once were derelict land, but urban sprawl combined with the sustainability concept development and rising property taxes, among other factors, have motivated the redevelopment such land.*

*The French methodology for managing contaminated sites is based on risk evaluation and acceptability associated with future uses of the site.*

*It requires that a cost-benefit analysis be conducted to choose the most efficient remediation option.*

*These recent developments encouraged the development of a methodology for managing large brownfield sites and the use of decision-support tools such as Geographic Information Systems (GIS) and multicriteria analysis. The first tool is commonly used in visualizing data, impacts, etc., while the second contributes to the decision process by simplifying complex situations, breaking down and structuring the analysis.*

*The methodology developed consists of eight steps:*

- define the context;

- define a “project vision” with the stakeholders;
- gather “baseline” data;
- characterize the site, define the area of study and clusters, define remediation and rehabilitation options for each cluster;
- rank remediation and rehabilitation options for each cluster based on a list of agreed criteria;
- rank the combinations of options at the site scale based on a list of agreed criteria;
- choose the most appropriate combination of options;
- set up the combination of remediation and rehabilitation options, analyse residual risks, define appropriate land-use restrictions and a monitoring plan.

*Criteria used to rank remediation and rehabilitation options are defined to evaluate the impact of these options based on the well-being of current and/or future users, on global change, on a balanced and fair sharing of resources and on economic efficiency. To take into account different stakeholders' opinions, a participatory approach may be chosen in establishing an accepted and validated list of criteria.*



The origin of particles in the atmosphere has long been subject to debate. The problem is more critical yet in urban areas, due to their negative impacts on public health. Recently, isotope tools have proved their great added value for unambiguously deciphering the origin of particles (both  $PM_{2,5}$  and  $PM_{10}$ ), which could help to better design management plans for reducing aerosol levels in the atmosphere. A review of several isotope systems shows that they may certainly aid in distinguishing between natural and anthropogenic, or mineral and organic origins of these particles.



# Urban Aerosols



**David Widory**

PROJECT MANAGER  
d.widory@brgm.fr

**Philippe Négrel**

HEAD OF THE UNIT "ISOTOPE TRACERS AND DATING"  
p.négrel@brgm.fr

## Particulate matter (PM): source and characteristics

All urban areas have particles suspended in their atmosphere. Large cities tend to reach high levels of atmospheric pollution if the emissions-reduction measures taken are insufficient. *Figure 1* shows the relation between city size (in terms of population) and suspended particle levels: although Tokyo's population is higher, its atmosphere is less polluted than that of Beijing, Mexico or Bombay.

The sources of this particulate matter fall into three groups: (a) sea salt aerosols, (b) terrestrial aerosols (soil dust, biological emissions), (c) anthropogenic sources (industry, agriculture, burning of vegetation and fossil fuels, fertilizers). Therefore particles typically consist of a mixture of inorganic and organic chemicals, including carbon, sulfates, nitrates, metals, acids, and semi-volatile compounds.

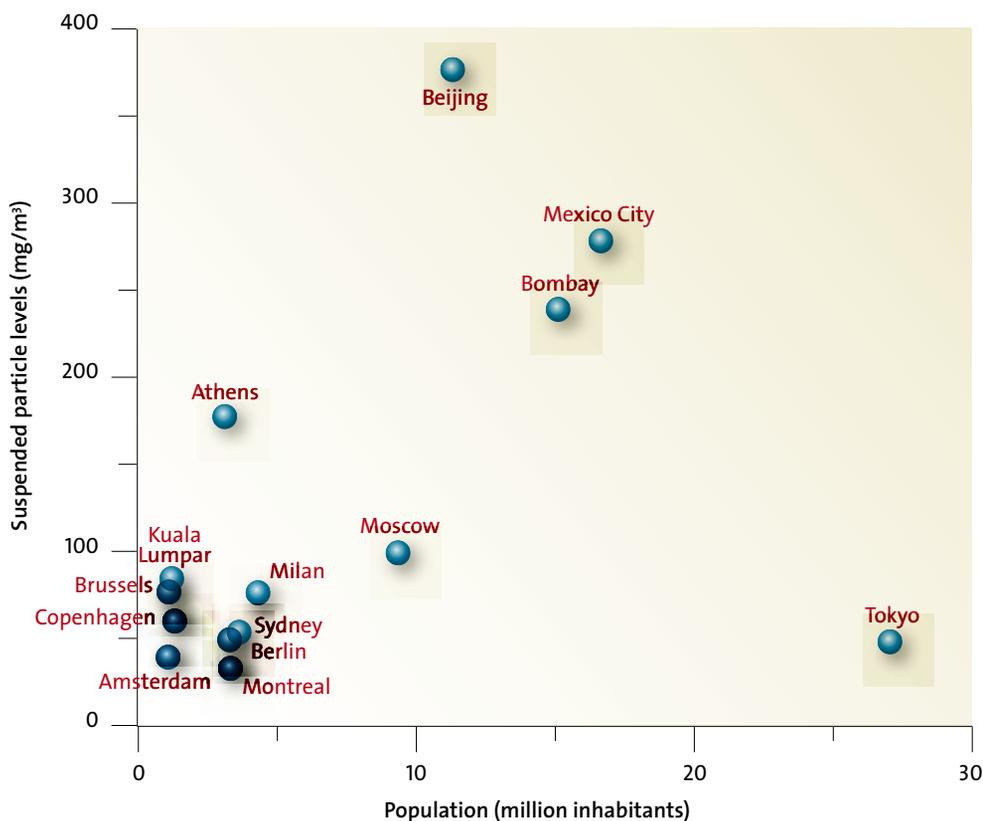
“*Anthropogenic particles typically consist of a mixture of inorganic and organic chemicals.*”

Sea salt aerosols form in urban areas near the coast, notably harbour cities. Terrestrial aerosols may come from soil erosion near the collector (local source) as well as from intracontinental (external) or even intercontinental (exogenic) sources. Anthropogenic aerosols may likewise originate in the vicinity of the collector (local source) or at far greater distances (distant source). The relative abundance of particles thus depends on the scale of the production processes and the source distance. Coarser material has a shorter

**The effects of atmospheric pollution on visibility in Beijing.**

*Les effets de la pollution atmosphérique sur la visibilité à Pékin.*

© X. Liu, 2007.



**Figure 1: Relation between population size in large cities and suspended particle levels.**

Figure 1 : Rapport entre la taille des populations des mégapoles et le niveau des particules en suspension.

Source <http://www.portfolio.mvm.ed.ac.uk/studentwebs/session4/27/citydiff.htm>



lifetime while  $PM_{10}$  may remain airborne for periods ranging from a few hours to several weeks.

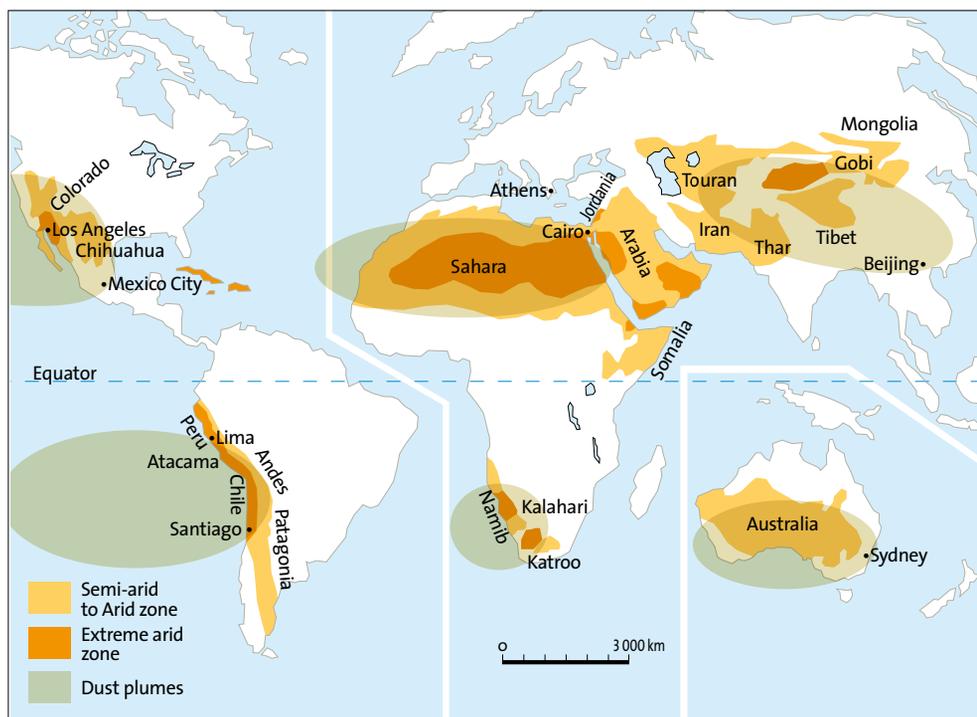
### Urban particles in the context of global climate change

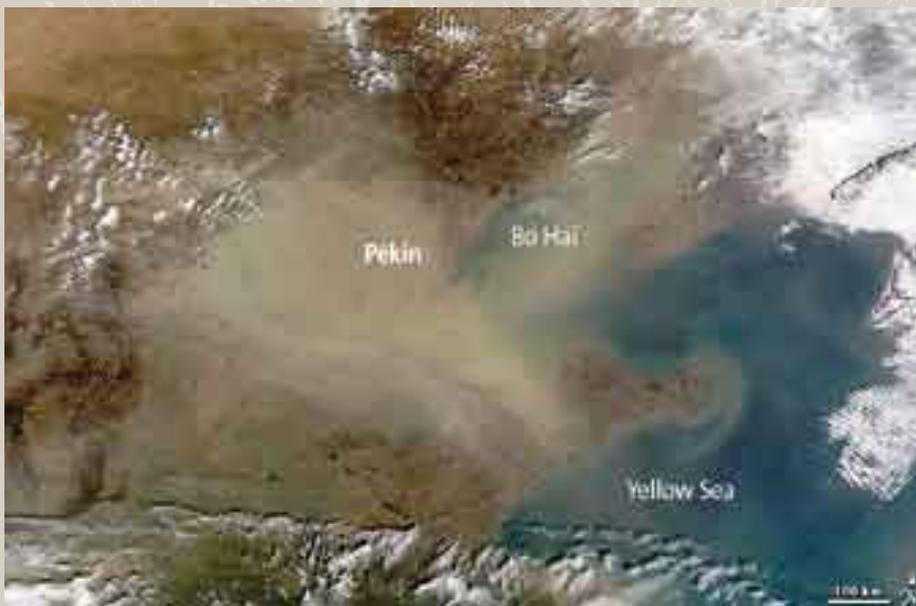
Recent information points to changes in dust events (Sahara, Australia, China) and stresses their impact on some urban areas. Climatic forcing parameters linked with global changes (draughts, deflational wind power, eolian erosion...) may be responsible for these changes, as may anthropogenic activities (figure 2). For example, dust events in 2006 generated 300 000 t of sand over Beijing, resulting directly from desertification coupled with extensive tapping of groundwater increasing soil dryness. Among the arid zones that are the main source of particles, the Sahara and Gobi deserts are the greatest contributors, although the former's impact on urban areas (in terms of number of inhabitants affected) is fairly minor (figures 3 next).

Earlier studies generally consider particle quantity (i.e., concentrations in g per  $m^3$ , e.g. the review by Harrison, 2004), basic particle chemistry [Lenschow *et al.* (2001)] or both [Artiñano *et al.* (2003)]. Recent work shows that it is difficult to unravel the different atmospheric particle sources without analyzing their isotope content [Widory & Fiani (2008)].

**Figure 2: Location of the world's main arid areas and the extension zones of dust plumes.**

Figure 2 : Localisation des zones arides et zones d'extension des panaches de poussière.





## Urban particles and health issues

Health impacts of particles in urban atmospheres have long been well documented [Pryor & Barthelme (1996); Harrison (2004)]. Particulate matter in the air including  $PM_{10}$  (particles with an aerodynamic diameter  $<10 \mu m$ ) directly influences mortality levels and respiratory-disease-related hospital admissions. Aerosols vary in size up to ten microns in diameter and exhibit a wide range of chemical compositions. Their origin may be either primary (direct emission into the atmosphere through processes of combustion or natural alteration) or secondary (post-emission formation in the atmosphere, e.g. nitrate in aerosols which results mainly from the degradation and conversion of gaseous nitrous oxides).

*“Particulate matter in the air directly influences mortality levels and respiratory-disease-related hospital admissions.”*

The air in many big cities contains high concentrations of fine particles. Concentrations of  $PM_{10}$  particles can reach  $300 \mu g \cdot m^{-3}$  [Seinfeld & Pandis (1997)]. Fine atmospheric particles harmful to public health have recently raised major concern (e.g., the ERPURS project for Paris; [Dab (1998)]). Little stable-isotope work has been devoted to atmospheric particles in urban environments, and fewer studies yet have used nitrogen isotopes, despite preliminary evidence they could be a potential tracer [Widory & Fiani (2008)].

Particles  $10 \mu m$  or less in size often display a bimodal distribution: fine particles (diameters  $<2.5 \mu m$ ) and

coarse particles (diameters  $2.5-10 \mu m$ ). The origins of these two size fractions, their chemical and physical properties, spatial distributions and deposition processes generally differ.  $PM_{2.5}$  results primarily from combustion processes and gas-to-particle conversions, while particles in the coarse size fraction ( $PM_{10}$ ) may be linked to mechanical processes (e.g. airborne dust).

## Isotopes: applications for characterizing urban atmospheric particles

Isotopes can be used in two ways to trace the source and processes of particles in urban atmosphere. The first involves sampling, analysis and characterization of the particles in an overall context, while the second samples particles either in central or outlying areas of the city and characterizes sources (diesel, central heating, industries...). The first approach was developed in Lyon (France) using lead isotopes, while the second was applied in Paris (France) using carbon and lead isotopes and Beijing (China) using lead and strontium isotopes.

### *Physical characterization and lead isotopes in the Lyon atmosphere*

Aerosols were collected at regular intervals in metropolitan Lyon over a 5-month interval in 1999. Their size distribution obtained by laser grain-size analysis shows that 50 % have diameters of less than  $7.5 \mu m$  and at least 10 %, diameters of less than  $1.5 \mu m$ . These latter present the greatest threat to human health, for particle size strongly influences what happens to them. Coarser particles ( $2.5 - 10 \mu m$ ) deposit mainly in the upper respiratory tract due to impaction, interception, gravitational sedimentation, and dispersion. Fine particles (less than  $2.5 \mu m$ ), like those generated by combustion processes, are quite liable to penetrate the deeper areas of the respiratory tract due to their high diffusivities.

▲ **Figure 3:** (left) Influence of the Gobi desert on a dust event in China; and (right) of the Sahara over southern Europe.

Figure 3 : (gauche) Influence du désert de Gobi sur les tempêtes de poussières en Chine ; et (droite) du Sahara en Europe méridionale.

Source : NASA.



“Following the phase-out of leaded petrol, industrial activities have now taken over as the major source of atmospheric lead.”

The most common particle in Lyon consists of gypsum of unknown origin, with organic matter present in large quantities. Smaller particles rich in heavy metals and small minerals such as micas, feldspars and some clays make up the remainder. Lead isotopes and lead content in the aerosol samples vary little. Lead isotopes occur as three distinct end-members: natural Pb (the lead isotope signature in pre-industrial period sediments), industry (all industrial activities), and road traffic (regular and unleaded petrol are isotopically distinct, while lead concentrations in diesel emissions are below the detection limit of  $1 \text{ mg L}^{-1}$ ). Simple binary calculations in 1999 found that a substantial proportion (40 to 70 %) of the lead in aerosols came from road traffic, as for other cities in France at the time. Since then, however, with the phase-out of leaded petrol, industrial sources have taken over as the main source of atmospheric lead.

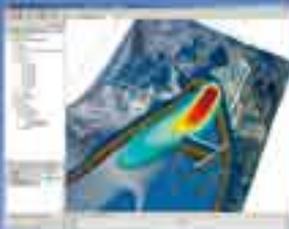
Matériels d'étude, surveillance et diagnostic pour:

**Eaux souterraines et superficielles, sols, sédiments, déchets...**

... Mesure - Télémessure - Acquisition et Interprétation de données



Mix/Micro/Cona/CTD-Diver



Logiciels: Visual Modflow, HydroGeo Analyst, AquiferTest Pro...



Humidimètres TDR



Stations Météo GPS

... Echantillonnage



Pompes immergées



Bailers



Sieues à sédiments



Corotiers manuels et sur chenilles



Z.I. de la gare 37310 Reignac sur Indre (France-Europe)

Tél : 00 33 (0)2 47 94 10 00

Fax : 00 33 (0)2 47 94 17 13

WEB : [www.sdec-france.com](http://www.sdec-france.com)

Mail : [info@sdec-france.com](mailto:info@sdec-france.com)



▲  
**Atmospheric particles in the Paris air.**  
*Particules atmosphériques dans le ciel de Paris.*  
 © PhotoAlto

**Stable carbon and lead isotopes in the Paris atmosphere**

The main sources of atmospheric particles in the Paris air are road traffic, heating and waste incineration. Sources were extensively sampled including motor vehicles (regular or unleaded petrol and diesel), central heating sources using all types of fuels (fuel oil and natural gas), and emissions from distinct waste incinerators. In parallel, ambient PM<sub>10</sub> particles were collected in the Paris atmosphere.

Carbon concentrations fluctuate considerably (1% to 96%, figure 4), and the corresponding δ<sup>13</sup>C, ranging from -22.6‰ to -38.0‰, also discriminate among the different pollution sources. Stable carbon isotopes effectively distinguish emissions from waste incineration, also discriminating diesel emissions from the rest of road traffic. While chemically similar diesel and fuel oil yield particles with comparable isotope compositions, diesel emissions contain more carbon). Waste incineration has no visible influence on particulate matter.

**Improving air quality in Beijing: the added value of isotopes**

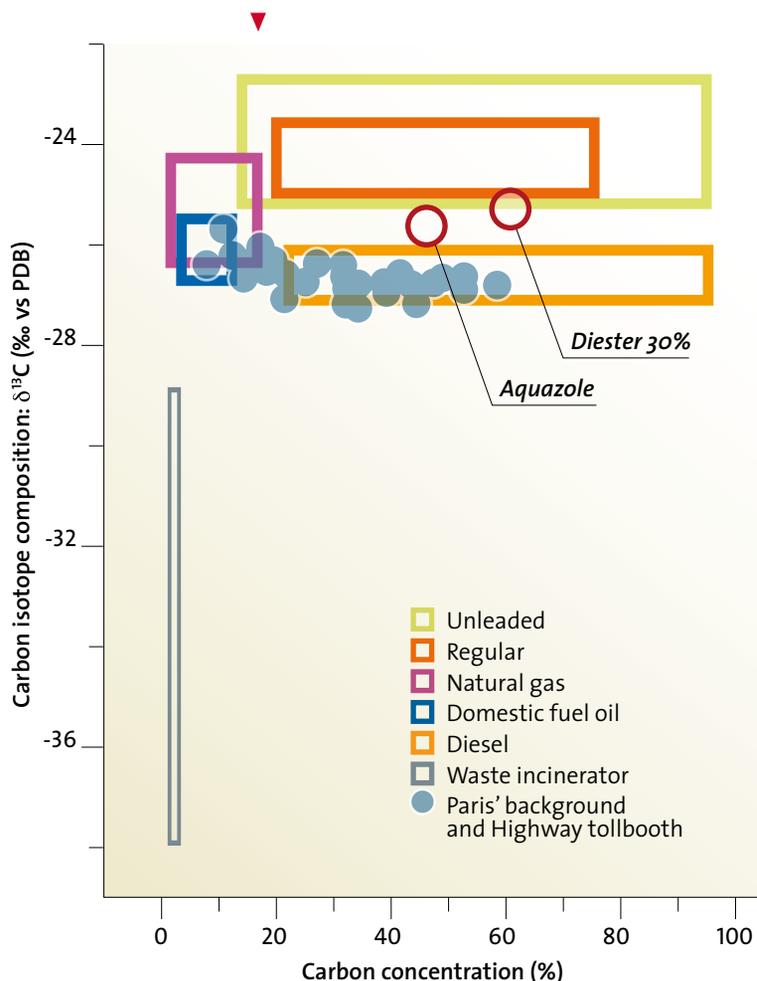
Traffic is progressively being eliminated as one of the main vectors of lead air pollution due to the prevalence of unleaded gas. The shift in the aerosol signature in the Paris atmosphere towards the industrial one (cf. boxed text) suggests that it is a reliable tracking tool for aerosol sources.

**Figure 4: Tracking the origin of particles in the atmosphere of Paris and its vicinity via a coupled approach between carbon concentrations and isotope compositions (δ<sup>13</sup>C).**

From Widory and Fiani, 2008.

*Figure 4 : Traçage de l'origine des particules dans l'atmosphère de la région parisienne par une approche couplée entre les teneurs en carbone et les isotopes (δ<sup>13</sup>C).*

D'après Widory et Fiani, 2008.



With the 2008 Olympics on the horizon, Beijing awoke to the need to improve its air quality. Lead gas was phased out in 1997. However, while its atmospheric concentrations have decreased slightly, levels can still reach  $0.3 - 0.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Industrial emissions such as non-ferrous metal or coal-combustion industries are typical suspects, but so far classical chemical methods have been unsuccessful in determining respective source contributions.

To this end, we adopted a two-step methodology to test lead and strontium isotope systematics: 1) characterization of all potential pollution sources, i.e. typical Chinese soils, coal combustion fly ash, cement factories, smelters and lead refining plants and 2) dual-isotope characterization of ambient air samples (total suspended particles and fine fractions) to identify their main source and determine respective contributions.

### ► ISOTOPES: A METHOD TO CHARACTERIZE AND MONITOR PARTICLES IN URBAN ATMOSPHERES

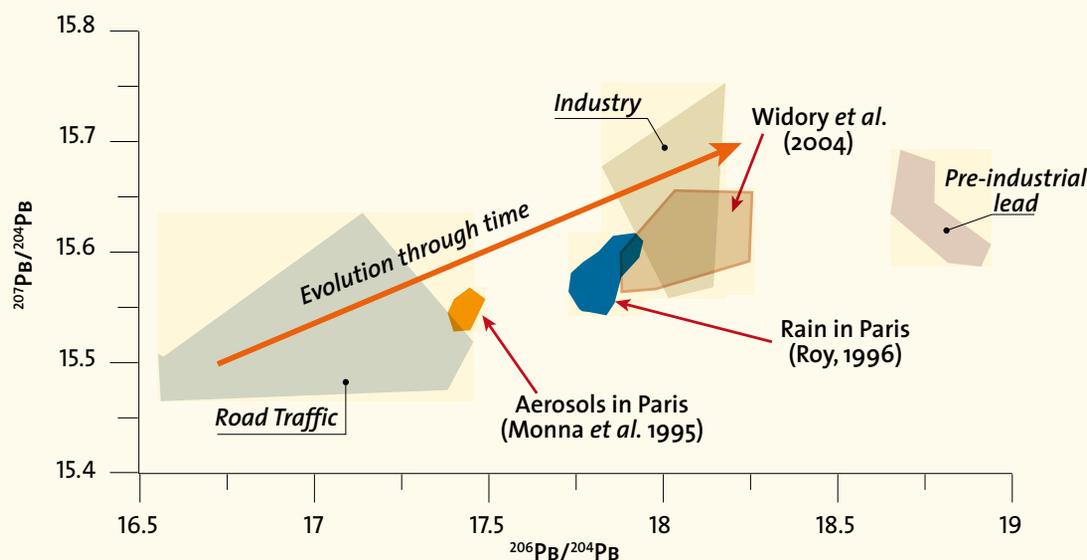
Atoms consist of a nucleus surrounded by electrons that are negatively charged; the nucleus is composed of neutrons with no electric charge and positively charged protons. The number of protons is equal to the number of electrons, so the atom as a whole is electrically neutral. The sum of protons and neutrons is the nuclear mass number. In the most abundant nuclides of the light elements, the numbers of protons and neutrons are equal, while for the heavy elements the number of neutrons far exceeds the number of protons. Thus, instabilities are caused by an excess of protons or neutrons: for instance  $^3\text{H}$  or  $^{14}\text{C}$  are unstable (or radioactive).

All the isotopes of a chemical element have the same atomic number (same number of protons), the same name and are located at the same place in the periodic table of the elements: only their atomic mass ( $p+n$ ) differs.

In the case of radioactive isotopes, isotopic proportions change over time, whereas with stable isotopes, proportions remain constant unless modified by isotope fractionation processes. Such modifications can be detected by isotopic ratio measurements, thus highlighting specific processes, which then helps reconstruct the element's "story". Radiogenic isotopes of heavy elements, on the other hand, are not fractionated by these processes. For such isotopic tools, there is therefore a direct link between the source and the receptor (Sr for  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , Pb for  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ).

An illustration can be drawn from the use of lead isotopes in the Paris atmosphere. Since the mid 90's, emissions from many atmospheric-Pb sources in France have been isotopically characterized. Results distinguish three end-members,

corresponding to 1) road traffic, 2) industry, and 3) pre-industrial sediments. Lead in aerosols in Paris (*see figure*) is mainly industrial in origin, although specific samples may reflect a natural input. Lead-isotope ratios can also be used to monitor the evolution of atmospheric-Pb origin over approximately the past decade in Paris. Aerosols collected in 1995 unquestionably designate road traffic as the main pollution source, while data after 1996 suggest that samples are moving from petrol towards the industry end-member. This trend is confirmed by recent results [Widory *et al.* (2004)], the contribution of road traffic being proven to be minor. In nearly ten years' time, the main source of atmospheric lead in Paris shifted from road traffic to industry, clearly due to the phasing out of tetraethyl lead from gasoline. ■



► Discriminating lead sources in the Paris atmosphere based on isotope ratios. Evolution of the impact of Pb sources in the atmosphere over time.

In Widory *et al.*, 2004.

Utilisation des isotopes du plomb pour discriminer les sources de plomb dans l'atmosphère de Paris. Evolution de l'impact des sources de Pb dans l'atmosphère au cours du temps.

D'après Widory *et al.*, 2004.

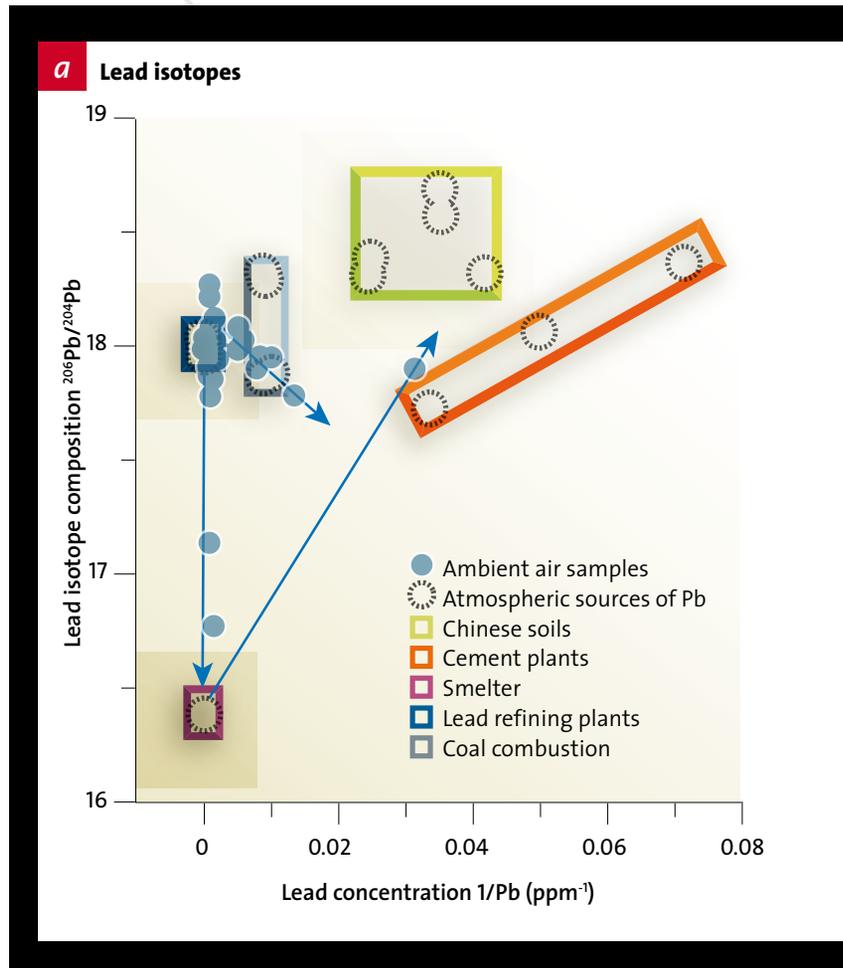
Pollution sources are significantly discriminated by lead and strontium isotope ratios (figures 5a and 5b), confirming that these are reliable tools usable as direct tracers of pollution vectors. Ambient air samples from three different locations in and around the capital city (Chegongzhuang, Liangxiang and Changping) show that the atmospheric lead budget is mainly controlled by a ternary mixing relationship, indicating that:

– Emissions from lead refineries are the main vector of lead in the air (total suspended particles or fine fraction), followed by coal combustion in the total suspended particle fraction. Emissions from smelters are isotopically detectable under specific weather conditions in both total suspended particles and fine fractions.

– The strontium isotope systematic confirms the implication of the studied sources in the overall aerosol budget. Coal combustion and emissions from cement plants are major contributors to Sr levels in the city’s atmosphere, but emissions from both smelters (fine fraction) and “Chinese soils” (total suspended particles fraction) are isotopically detectable.

This confirms that aerosols must be seen as a potential integrator of emissions from distinct origins depending on the studied isotope systematics. These results should help local authorities define an improved air-quality management plan to lower aerosol lead levels.

*“Aerosols must be considered as a potential integrator of emissions from several distinct origins.”*

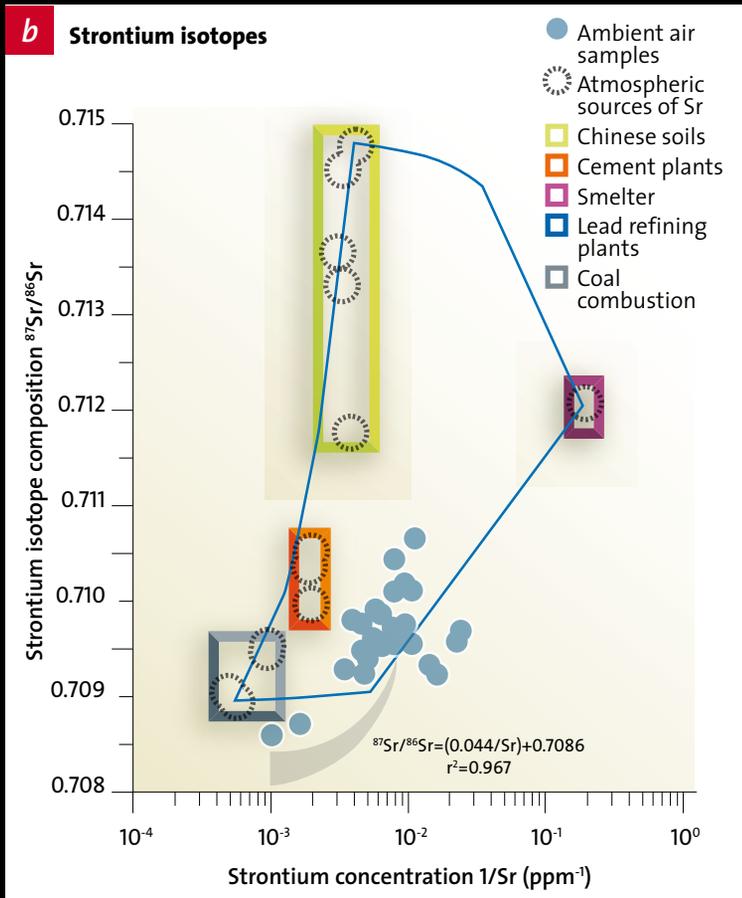


“Classical” carbon and lead isotopes emerge as useful tools both for discriminating sources of aerosols in the urban atmosphere and the semi-quantification of their respective contributions at any given time and location:

– Carbon isotope ratios relate directly to pollution sources. While emissions from diesel traffic are still subject to debate, carbon isotopes emerge as a major vector of pollution in the PM<sub>10</sub> fraction, and the only one in PM<sub>2.5</sub>, whatever the sampling environment (background or influenced by road traffic).

– Before its phase-out in 2000, lead isotopes were able to discriminate road traffic from industrial sources and “terrigenous” lead (in sediments), but discrimination between these pollution sources is now no longer possible. In some cases like China, however, their use is still valuable, especially in identifying the environmental impact of industrial emissions.

– The heterogeneity of pollution origins evidenced by different isotope systematics (for identical samples)



**Figure 5a and 5b:**  
Improving knowledge  
of air quality in Beijing  
in view of the '08 Olympics  
using the dual-isotope  
approach (lead & strontium).

From Widory and Fiani, 2008.

**Figure 5a-5b :**  
Améliorer la connaissance  
de la qualité de l'air à Pékin  
dans le cadre des Jeux  
Olympiques de 2008 par une  
approche isotopique couplée  
(plomb et strontium).

D'après Widory et Fiani, 2008.

confirms the idea that aerosols are atmospheric integrators of various scenarios. For example, in the same  $\text{PM}_{10}$  sample,  $\delta^{13}\text{C}$  may identify diesel as the main source of carbon, while another systematic, such as  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , may show that strontium is from waste incineration. Different size fractions from distinct origins can coagulate, post-emission, within a single final particle size. Furthermore, conclusions about differences between carbon- and lead-isotopes (e.g. Paris) underline differing behaviours of organic and inorganic phases in aerosols. These may have various origins and their own specific isotope compositions. Post-emission processes in the atmosphere then form particles with distinct isotope signatures. The isotope combination initially believed to be a unique tracer of atmospheric particle sources actually turns out to be a combination of two distinct tracers, each procuring a better definition of the origin of both organic and inorganic phases in the aerosols.

This probably paves the way for a wider field of investigation based on the study of other isotope systematics. Recent developments, particularly in the field of MC-ICP-MS analyses, now allow precise isotope analyses (with an analytical precision of a few nanograms, compatible with levels observed in ambient air) of elements such as Cr, Hg, Zn or Cd (species recognized as deleterious to public health). First results show that Cd and Zn isotope systematics (and their coupling [Widory and Fiani (2008)]) are excellent discrimination tools to track the origin of these metals in the atmosphere. ■



### Particules atmosphériques urbaines

L'origine des particules dans l'atmosphère urbaine ainsi que les impacts des multiples sources potentielles prêtent toujours à débat, de nos jours, dans la communauté scientifique. L'approche chimique « classique » (généralement utilisée dans cette problématique) ne peut permettre de lever sans ambiguïté l'incertitude sur l'origine des particules, mettant ainsi en exergue le besoin pour de nouveaux paramètres et outils. Cet article balaie l'ensemble des méthodes isotopiques récemment employées et d'intérêt fort dans la problématique du traçage des sources de particules dans l'atmosphère des villes. Leur application dans des villes d'importance comme Paris, Lyon et Pékin est présentée, et les outils mis en œuvre dans ces études discutés en termes de potentiel et de limites. Ces nouveaux outils permettent de tracer les sources majeures de particules impliquées dans la pollution des zones urbaines (origine naturelle, industrielle, liée aux véhicules, au chauffage collectif...), mais également de mieux caractériser et quantifier les processus secondaires pouvant affecter le budget des particules atmosphériques. Les systématiques isotopiques discutées sont celles du carbone ( $^{12}\text{C}$  &  $^{13}\text{C}$ ), de l'azote ( $^{14}\text{N}$  &  $^{15}\text{N}$ ), du plomb ( $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  &  $^{208}\text{Pb}$ ) et du strontium ( $^{87}\text{Sr}$  &  $^{86}\text{Sr}$ ).



# Le passé des villes pour comprendre leur futur

Entre le Néolithique et la fin du Moyen Âge, les civilisations urbaines qui se sont effondrées uniquement à cause de crises environnementales sont rares.

Le bilan des expériences du passé peut aider à trouver des solutions pour assurer la « durabilité des villes du futur ».

Mais le changement majeur d'échelle entre le fait urbain d'aujourd'hui et les villes de l'Antiquité et du Moyen Âge ne nous dispensera pas de réponses technologiques originales et de choix de société.



**Éric Fouache**

PROFESSEUR À L'UNIVERSITÉ DE PARIS OUEST NANTERRE LA DÉFENSE EA 375 GECKO (PARIS 10) ET CHERCHEUR ASSOCIÉ À L'UMR 8591 (PARIS1/PARIS 12/CNRS) eric.g.fouache@wanadoo.fr

Aborder les villes anciennes, de l'Antiquité au Moyen Âge, sous l'angle du développement durable, concept élaboré dans les années 1970, est-il pertinent ? La conscience de crises environnementales provoquées par l'homme n'a réellement été conceptualisée qu'au XIX<sup>e</sup> siècle et surtout au XX<sup>e</sup> siècle aux États-Unis. Il serait donc illusoire de penser trouver dans les villes du passé des recettes de « durabilité » qui permettraient la gestion durable de nos villes actuelles, surtout si l'on prend en compte le changement d'échelle entre villes anciennes et actuelles. L'argument le plus fort pour justifier l'intérêt d'étudier l'insertion environnementale des villes du passé est notre connaissance des dynamiques environnementales holocènes qui a considérablement progressé ces dernières années. Par ailleurs, nous sommes la première civilisation à avoir conscience de ces fluctuations et de l'impact croissant des sociétés humaines sur les processus d'érosion, la biodiversité, les dynamiques géomorphologiques et le climat. Des idéologies accusatrices du rôle joué par les sociétés humaines et par les avancées

“ Il serait illusoire de penser trouver dans les villes du passé des recettes de durabilité. ”

▲ La porte des lions à Mycènes (Péloponnèse, Grèce).  
The Lion Gate in Mycenae (Greek Peloponnese).

© É. Fouache, 2009.

## ► CRÉATION ET DISPARITION DES VILLES GAULOISES

Olivier Buchsenschutz – UMR 8546, CNRS/ENS Paris – buchs@ens.fr

Depuis 150 ans, les archéologues ont identifié de véritables villes (*oppida*) au II<sup>e</sup> siècle avant J.-C. dans le domaine celtique de l'âge du fer, à l'ouest de l'Europe et au nord des Alpes, des îles britanniques à la Hongrie occidentale. Ces villes qui se sont développées en moyenne durant un siècle ont souvent été précédées par un regroupement dense et désordonné d'artisans et de commerçants. Tout se passe comme si l'aristocratie terrienne et militaire avait récupéré ces groupes d'artisans pour les installer sur les sites jusque-là consacrés à des manifestations épisodiques de la sphère religieuse (exemple de Levroux, Indre, *figure*) ou pour les « protéger » par une enceinte. Cette formule connaît au début du I<sup>er</sup> siècle avant J.-C. un succès extraordinaire et favorise la conquête romaine qui n'aurait pas pu contrôler une population dispersée. Les *oppida* subsistent en Gaule après la guerre des Gaules, leurs bâtiments en bois sont progressivement remplacés par des constructions en pierre. Cependant, la politique d'Auguste les condamne à la fin du I<sup>er</sup> siècle avant J.-C. au profit de villes nouvelles calquées sur le modèle romain. En Berry, le site en hauteur de La Groutte est ainsi abandonné au profit de la ville de Drevant sur la rive du Cher. En Bourgogne, l'*oppidum* du mont Beuvray – la Bibracte de César – est abandonné sous Auguste au profit d'Autun. La création et l'abandon de ces quelques milliers d'*oppida* sont donc entièrement régis par l'évolution de la société gauloise, puis par la politique impériale romaine.

Les fouilles des dix dernières années ont révélé, du Wurtemberg au Berry, des agglomérations des VI<sup>e</sup> et V<sup>e</sup> siècles avant J.-C. qui présentent indéniablement déjà des caractères urbains : planification de l'espace, activités artisanales, importations lointaines. À Bourges, le centre-ville recouvre un habitat très riche, tandis que des faubourgs artisanaux s'étendent aux alentours sur plusieurs kilomètres carrés. ■



▲  
**Levroux (Indre) résume les étapes de l'urbanisation gauloise. Au II<sup>e</sup> siècle avant J.-C. se forme un village artisanal et commerçant dans le quartier des Arènes au sud de la ville actuelle. Un oppidum est fondé sur la Colline des Tours au début du I<sup>er</sup> siècle avant J.-C. Il est abandonné à la fin du siècle au profit de l'espace intermédiaire, sous la ville actuelle.**

*Levroux, in the Indre Department, sums up the successive stages of Gallic urban development. In the 2<sup>nd</sup> century B.C., a village of craftsmen and tradesmen grew up in the "Arènes Quarter," south of the present-day town. Subsequently, a fortified oppidum was erected on the "Colline des Tours" in the early 1<sup>st</sup> century B.C. This in turn was abandoned by the century's end, to be replaced by the intervening area under today's town.*

© O. Buchsenschutz.

◀  
**Habitat de Bourges, structures artisanales en cours de fouille. Settlement in Bourges, workshops of craftsmen in the process of being excavated.**

© O. Buchsenschutz



technologiques apparaissent. Étudier le passé pour valider ou invalider les modèles d'interaction entre l'environnement et les sociétés du passé présente un intérêt certain. Il devrait être possible d'en tirer des leçons profitables.

### Apparition des villes

Historiquement, la ville apparaît après la néolithisation et la maîtrise par les sociétés humaines de l'agriculture et de l'élevage associés à un habitat sédentaire, et de la structuration d'états organisés, de sociétés hiérarchisées et d'échanges économiques. Les premières villes naissent entre 3 500 et 1 500 ans av. J.-C. le long de grands fleuves en Mésopotamie, sur les territoires actuels de la Syrie et de l'Irak, dans les vallées du Nil, du Jourdain, de l'Indus, du Gange et du fleuve Jaune. La ville se différencie du village par l'importance de la population. Ainsi, Xi'an – dans la province chinoise de Shaanxi – aurait compté plus d'un million d'habitants en l'an 1000 av. J.-C. La ville est également plus étendue. Uruk occupait une sur-

face de 400 hectares. L'aspect monumental et architectural, comme le palais assyrien de Nimrud sur les bords du Tigre ou la porte d'Ishtar à Babylone, et l'existence fréquente d'un mur d'enceinte constituent des éléments importants. Mais ce qui dote une ville de ses véritables attributs, aujourd'hui comme hier, est lié au fort pourcentage de non-agriculteurs qui y réside : marchands, fonctionnaires, prêtres, soldats... Dès l'origine, l'impact d'une ville sur son environnement est important. La forte concentration d'hommes a toujours favorisé les épidémies, les pollutions, ainsi qu'une consommation accrue de ressources naturelles et énergétiques. La ville est bien sûr vulnérable aux cataclysmes naturels.

### Les villes et les cataclysmes

Avec la connaissance de la tectonique des plaques, notre civilisation est la première à avoir une compréhension scientifique de la genèse des éruptions volcaniques, des séismes et des tsunamis. Notre compréhension des phénomènes climatiques extrêmes a également

“ Les premières villes naissent entre 3500 et 1500 av. J.-C. le long de grands fleuves en Mésopotamie. ”

**Photo 1 : Citadelle de Bam (Iran) en cours de restauration en 2008 après le tremblement de terre du 26 décembre 2003.**

*Photo 1: The Citadel of Bam in 2008, in the process of being restored after the earthquake of 26 December 2003.*

© É. Fouache.



**Photo 2 : Thermes d'époque romaine au sud du site d'Olympie (Grèce), site fossilisé sous 6 mètres d'alluvions, suite à l'arrivée des pasteurs slaves entre le VI<sup>e</sup> et le IX<sup>e</sup> siècles apr. J.-C.**

*Photo 2: Roman baths on the site of Olympia, in Greece, archaeological site fossilized beneath 6 metres of alluvia, following the settlement of Slavic herders between the 6<sup>th</sup> and 9<sup>th</sup> centuries A.D.*

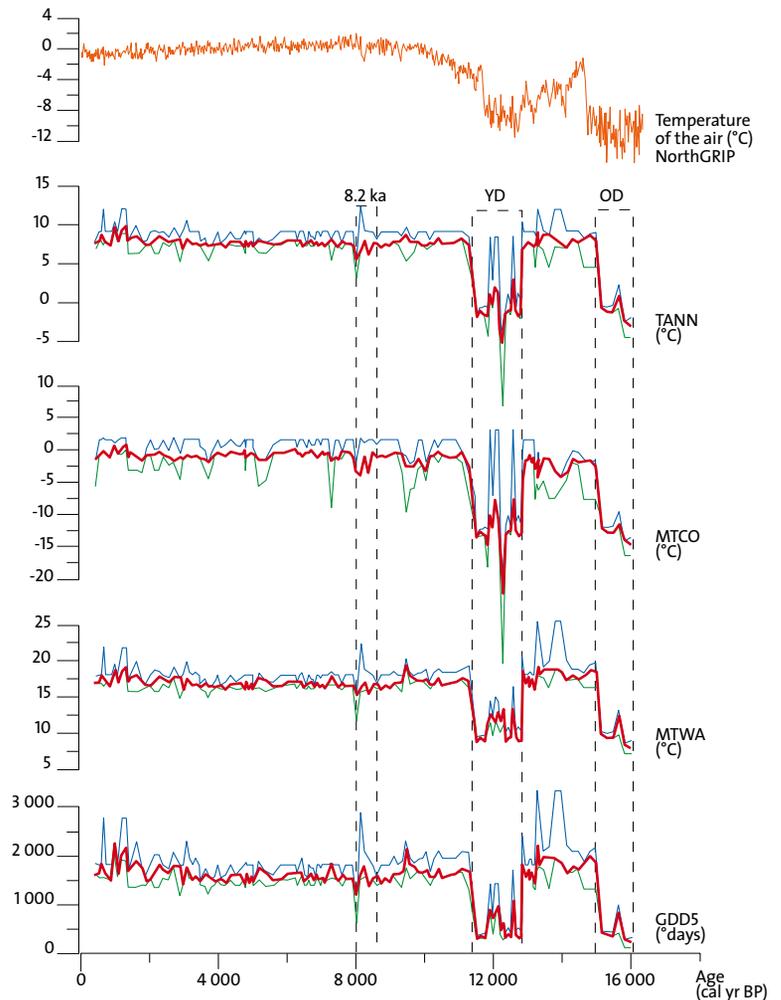
© É. Fouache, 2009.



bien progressé même si cela ne permet pas toujours d'éviter la catastrophe, du fait d'un manque d'estimation des enjeux et des risques, d'une absence de politique de prévention ou de système d'alertes ou de gestion des crises. Les conséquences du tsunami du 26 décembre 2004 ou celles du séisme de Bam le 26 décembre 2003 (*photo 1*) suffisent à s'en convaincre. Des villes sont donc souvent rayées de la carte : Pompéi, Herculaneum, Stabies en Campanie lors de l'éruption du Vésuve en 79 après J.-C., Akrotiri à Santorin entre 1635 et 1628 av. J.-C., Héliké emportée en 373 av. J.-C. dans le golfe de Corinthe. C'est aussi le cas au XX<sup>e</sup> siècle de Saint-Pierre lors de l'éruption de la montagne Pelée en Martinique le 8 mai 1902 ou de San Francisco lors du tremblement de terre du 18 avril 1906.

Qu'une ville soit définitivement rayée de la carte constitue une exception, car hier comme aujourd'hui, la ville renaît de ses cendres et est reconstruite au même endroit. Même après l'éruption de 79 apr. J.-C., la Campanie est restée un lieu de villégiature pour l'élite romaine. À l'exception des mythes, comme celui de l'Atlantide ou du déluge, il n'existe pas de civilisation disparue après un cataclysme naturel. Même quand un site porte les stigmates d'un tremblement de terre, ce dernier s'est souvent produit postérieurement à l'abandon de la cité : c'est vrai des palais minoëns qui ont été détruits près de 200 ans après l'éruption du volcan de Santorin.

*“ Il n'existe pas de civilisation disparue après un cataclysme naturel. ”*



▲ **Figure 1 : Reconstitution des paléo-températures à partir du diagramme pollinique du lac Maliq (Albanie) sur les 15 000 dernières années.**

Adapté de Bordon, Peyron *et al.* (2009).

*Figure 1: Reconstruction of paleo-temperatures from the pollinic diagram of Lake Maliq (Albania) covering the past 15,000 years.*

Adapted from Bordon, Peyron, *et al.* (2009).

Les cataclysmes constituent donc le risque majeur susceptible de menacer les villes. L'existence nouvelle du risque technologique qui peut être lui-même induit par une catastrophe naturelle fait que la prévention des risques majeurs doit être une priorité absolue. Cependant, les relations entre une ville et son environnement ne se limitent pas à l'analyse des cataclysmes.

### La disparition d'une ville du fait de dynamiques environnementales non cataclysmiques

La localisation fréquente des villes le long des cours d'eau ou en bord de la mer les rend vulnérables aux inondations et à l'évolution du trait de côte. Le déboisement et la mise en valeur de l'arrière-pays par les hommes lors de la deuxième moitié de l'Holocène ont fréquemment généré l'érosion responsable d'un exhaussement des lits fluviaux, d'une progradation deltaïque et d'une amplification des inondations. Les

## ► CHANGEMENT CLIMATIQUE, *Qanât/kâriz* : SYSTÈME D'IRRIGATION POUR UN DÉVELOPPEMENT DURABLE

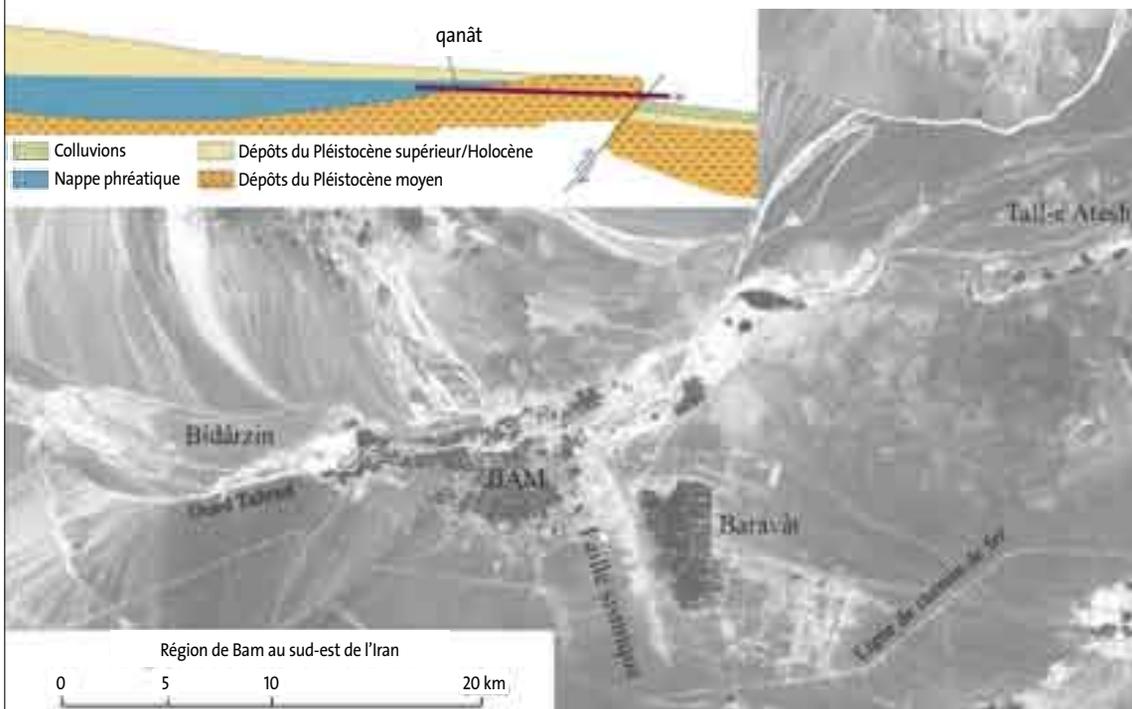
Chahryar Adle – CNRS – cadle1944@yahoo.com

La déchéance d'un certain nombre de sites dès la fin du III<sup>e</sup> millénaire av. J.-C. a poussé les experts à en chercher les raisons : invasions, surpopulation, changement climatique... Le cas de la région de Bam dans le sud-est iranien milite plutôt pour la dernière raison. Le changement climatique, manifesté par une chute des précipitations atmosphériques, aurait contraint les hommes à Bam, mais aussi au nord de l'Arabie, à chercher des solutions techniques durables et rentables pour vivre. Cette quête a conduit à l'invention dès le I<sup>er</sup> millénaire av. J.-C. des *qanâts/kârizs* qui

irriguent les palmeraies. L'homme a compris dès cette époque qu'en creusant une galerie souterraine en pente, l'eau des entrailles de la terre allait jaillir à la surface par gravité.

À Bam, il semble que l'affaiblissement des précipitations atmosphériques a causé l'abandon des établissements néolithiques-chalcolithiques et d'âge de bronze. Si le changement hypothétique d'un cours d'eau peut expliquer l'abandon du site de Tall-e Âteshi et de ses satellites, on ne peut pas en dire autant pour l'ensemble des sites de

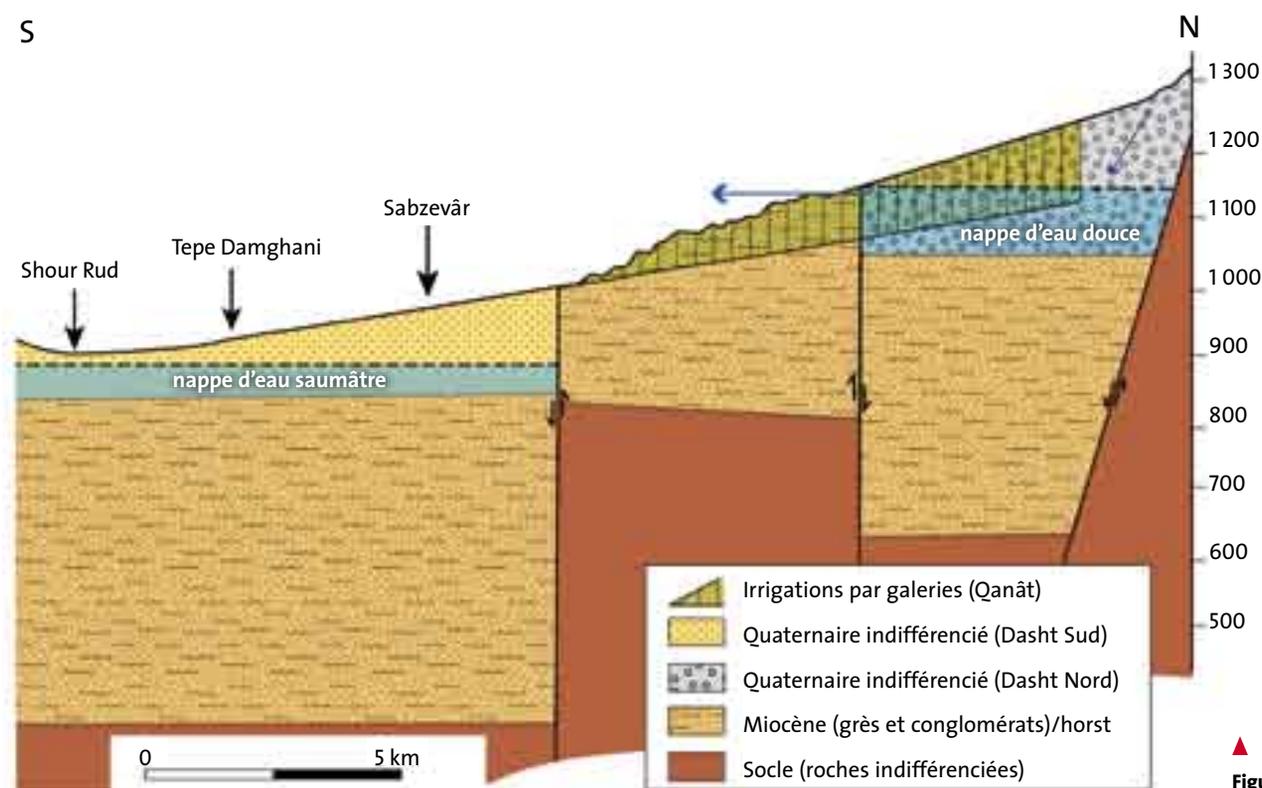
Bidârzin, positionnés plus haut que les cours d'eau. Des questions restent en suspens. Ces cours d'eau, nécessairement alimentés par davantage de précipitations atmosphériques, ont-ils pu arroser ici Bidârzin et là Tall-e Âteshi ? L'eau de ces rivières, qui devait être utilisée plus en amont par les usages agricoles, a-t-elle pu atteindre ces sites ? Ce sont là quelques-unes des recherches actuellement menées à Bam par plusieurs équipes franco-iraniennes lors de missions coordonnées par l'Institut de recherche en Iran (Ifri). ■



◀ Coupe schématique d'un qanât de l'escarpement de ligne de faille sismique de Bam, sud-est de l'Iran.

Cross-section diagram of a qanât cutting through the active fault-line scarp in Bam, south-eastern Iran.

© C. Adle.



**Figure 2 :**  
Rôle du horst  
miocène  
de Sabzevâr  
dans le maintien  
d'une nappe  
phréatique non  
saumâtre (Iran).

Figure 2:  
*The role of  
the Sabzevâr  
Miocene horst  
in preventing  
the aquifer from  
becoming brackish.*

© E. Fouache, 2009.

fluctuations climatiques naturelles ont bien sûr inter-féré avec ces dynamiques anthropiques, ce qui légitime les études géohistoriques, géoarchéologiques et paléoclimatologiques [Fouache (2006)].

La ville d'Éphèse en Asie Mineure tout comme Apollonia d'Illyrie en Albanie ont ainsi perdu leurs fonctions portuaires, ce qui participa, en partie, à leur déclin. C'est très certainement l'apparition d'une activité pastorale pratiquant le brûlis pour la régénération des pâtures qui est responsable de la fossilisation du site d'Olympie sous 5 à 6 mètres d'alluvions (*photo 2*), même si le site était déjà abandonné après la christianisation de l'empire Byzantin.

Les fluctuations climatiques naturelles holocènes (*figure 1*) ont également pu jouer un rôle important. Mais que sait-on de l'impact exact de ces fluctuations, plus importantes pour les précipitations (quantité et répartition annuelle) que pour les températures ?

### Quel impact des crises climatiques sur l'effondrement des civilisations urbaines ?

La littérature scientifique donne de nombreux modèles d'effondrements de civilisations urbaines du fait d'une crise climatique amplifiée par l'activité humaine.

On attribue ainsi l'effondrement des civilisations urbaines, comme celle du royaume d'Akkad en Mésopotamie [Weiss *et al.* (1993)], de l'Indus ou de Jiroft, aux conséquences d'une crise d'aridité majeure qui se serait produite à la fin du III<sup>e</sup> millénaire av. J.-C. [Kuzucuoglu et Marro (2007)]. L'idée est séduisante même si leur effondrement est globalement contemporain. Les études régionales sur le plateau iranien montrent ainsi que certains secteurs comme Sabzevâr (*figure 2*) avaient permis le maintien de ressources en eau et de populations sédentaires entre l'âge du bronze et l'âge du fer. Les sociétés se sont simplement adaptées à la diminution de la ressource en déplaçant les zones cultivées puis en adoptant de nouvelles techniques d'irrigation, comme celle du qanat.

La prise en compte de la ressource hydrogéologique montre ainsi clairement que l'abandon à la fin du III<sup>e</sup> millénaire av. J.-C. du site de Konar Sandal Sud, dans le bassin de Jiroft, drainé par la rivière Halil Rud, ne peut s'expliquer par un affaiblissement des ressources en eau [Fouache *et al.* (2005)]. Ce bassin – entouré de hautes montagnes – a une nappe sub-affleurante qui jaillit même en puits artésien naturel entraînant la présence de palmeraies endémiques. L'abandon du réseau de sites urbains dans cette vallée s'explique plutôt par l'effondrement du réseau commercial et d'échanges.

▲ **La grande citerne du sanctuaire d'Héra (époque classique) à l'est du golfe de Corinthe montre comment les sociétés antiques s'étaient adaptées à la sécheresse méditerranéenne en récupérant les eaux de ruissellement. Cette pratique mériterait d'être systématiquement appliquée aujourd'hui, au moins pour les eaux d'arrosage, mais elle ne permettrait pas d'équilibrer les besoins qui sont ceux des sociétés modernes.**

*The great cistern in the Heraion sanctuary, east of the Gulf of Corinth, reflects how ancient societies had learned to cope with Mediterranean aridity by retrieving runoff water. This practice would deserve to be systematically implemented today, at least for watering purposes, although it could not make up for all the needs of modern societies.*

© É. Fouache

Les études paléoclimatiques régionales réalisées à partir d'approches multi-proxies (pollens, spéléothèmes, diatomées, etc.) démontrent que les dynamiques environnementales et les fluctuations climatiques jouent incontestablement un rôle, même si d'autres facteurs sont également à considérer.

### Les 5 causes de disparition des villes

Jared Diamond, chercheur, est allé le plus loin dans cette réflexion. Il identifie cinq causes d'effondrement d'une civilisation pouvant être considérées dans l'optique réduite d'une civilisation urbaine et susceptibles d'interagir entre elles :

– la hausse excessive de la démographie par rapport aux ressources alimentaires disponibles ;

– la déforestation trop importante générant une crise érosive ;  
 – les guerres endémiques ;  
 – la crise climatique ;  
 – l'absence de réponses appropriées apportées à une crise environnementale.

Ce modèle repose sur une comparaison très fouillée d'études de cas. Il démontre qu'il existait toujours une solution même si elle n'a pas toujours été retenue.

Un des exemples est l'effondrement de l'économie des Pueblos des Indiens Anasazis au sud-est des États-Unis. Le plus célèbre effondrement dans le canyon de Chaco s'amorce au début du XI<sup>e</sup> siècle apr. J.-C. et s'achève au début du XIII<sup>e</sup> siècle. Jared Diamond l'explique d'abord par une déforestation intense qui provoque l'apparition de ravines et de ravins d'érosion (les arroyos) ainsi que par une intense érosion des sols entraînant un rabattement important des nappes. Par ailleurs, les diagrammes polliniques démontrent qu'entre 800 et 1350 apr. J.-C. les périodes de sécheresse sont de plus en plus marquées. Tant que les Anasazis gardent une suprématie religieuse et politique, ils parviennent à maintenir leur approvisionnement en maïs. L'effondrement des échanges commerciaux, dans un contexte de démographie non contrôlée, sera catastrophique et aboutira à l'abandon des Pueblos.



## The past of cities to understand their future

The environmental crisis concept emerged in the United States during the 19th century and was conceptualized with the dust bowl during the 1930's. Our civilization is the first to identify environmental dynamics and to become aware of the mounting impact that human activities have on these dynamics. This realization engenders ideological currents that idealize Nature and the relationship between man and his surroundings that prevailed in the societies of the past, including urban ones. Today, as in yesteryear, cities prey upon their environment, and the major risk of natural disaster has always weighed upon them. As long as the concerned societies still have the requisite response capability to do so, the cities are rebuilt, often on the same spot. Yet certain environmental dynamics such as soil erosion may cause urban sites to be abandoned. Cities of the past also provide us with examples of optimization of natural resources, notably water, reposing on technical innovations only surpassed with the 20th century's urban explosion. Few civilizations indeed have vanished due to an environmental crisis, although paleoclimatology yields evidence of climate variations and recurrent droughts. Jared Diamond (2006) has established that the contributing factors behind the collapse of a given civilization are often complex, challenging strict environmental determinism and revealing the need for more case studies. The past should be examined in a multi-disciplinary way that reinstates an investigative approach based on a cross-fertilization of the social sciences.

## ► DES CRISES CLIMATIQUES ATTESTÉES PAR LA PALYNOLOGIE

Anne-Marie Lézine – Laboratoire des sciences du climat et l'environnement – Institut Pierre-Simon Laplace – Anne-Marie.Lezine@lsce.ipsl.fr

La variabilité du climat à la fin de la période humide holocène a souvent été évoquée pour expliquer les grandes crises culturelles observées dans l'ouest de l'Asie, telles que la disparition de l'empire d'Akkad dans le golfe Arabo-Persique ou l'abandon des villes harrapéennes dans la vallée de l'Indus. Il s'agirait soit de fluctuations d'échelle millénaire ou centennale, soit d'événements abrupts ou encore d'une évolution progressive du climat vers l'assèchement en relation avec l'affaiblissement de la mousson indienne. Dans un secteur dominé par l'aridité du climat, les archives naturelles du changement climatique sont extrêmement rares et souvent discontinues avec plusieurs millénaires d'enregistrement absent au sommet des accumulations sédimentaires lacustres, ou l'arrêt de la formation de spéléothèmes. Seuls de rares environnements sédimentaires comme le centre de la zone de minimum d'oxygène au large du Pakistan ou les mangroves du littoral omanais ont fourni des enregistrements continus et précis de l'évolution du climat et de l'environnement au cours des derniers 6 000 ans.

L'analyse pollinique de ces sédiments révèle que la fin de la période humide holocène, liée à l'affaiblissement des flux de la mousson indienne d'été, se situe autour de 4700-4200 BP<sup>(1)</sup>. Deux périodes de forte activité de la mousson d'été sont identifiées entre 5400 et 4200 BP, puis entre 2000 et 1000 BP au cours desquels l'activité fluviatile de l'Indus était importante. ■

(1) BP : Before Present.

## Quelles leçons pour le présent et pour le futur ?

La gestion des villes anciennes et de leurs ressources naturelles – notamment en eau – peut inspirer des aménagements contemporains qui améliorent la durabilité. C'est le cas de la récupération des eaux de ruissellement en milieu aride et semi-aride, aujourd'hui pratiquement abandonnée, car ces solutions sont plus facilement applicables à l'échelle d'une maison ou d'un immeuble qu'à celle d'un quartier, plus adaptées également à de nouveaux projets qu'à la réhabilitation d'opérations anciennes mal conçues. Le changement d'échelle entre ville ancienne et ville actuelle fait qu'il est illusoire de revenir à des consommations de l'ordre de 5 à 10 litres d'eau par jour et par personne.

Notre civilisation est la première à comprendre la genèse des crises environnementales du passé et à concevoir de la prospective. Nous devons faire face à un enjeu majeur de communication et de pédagogie. Cela implique de rétablir la primauté de l'analyse scientifique et donc de lutter contre les représentations millénaristes irrationnelles. C'est pourquoi il faut privilégier une approche interdisciplinaire qui croise l'apport des sciences humaines et des géosciences dans l'étude des dynamiques environnementales.

Pour nos villes, cinq chantiers sont clairement prioritaires :

- la prévention des risques majeurs ;
- la diminution des rejets polluants et la gestion des déchets ;
- l'optimisation de la gestion des ressources en eau ;
- la maîtrise de la croissance des mégapoles ;
- l'équité sociale de nos mégapoles.

Mais le plus grand danger pour nos villes, du fait des masses humaines qui y sont de plus en plus concentrées, est en réalité social et politique. ■

“ Le plus grand danger pour nos villes est en réalité social et politique. ”

L'analyse de l'effondrement des cités mayas, comme Coba dans le Yucatan, qui s'échelonne entre 790 et 900 apr. J.-C. et fait suite à un premier effondrement des cités entre 125 et 250 apr. J.-C., donne lieu au même type de conclusion. Les deux épisodes sont mis classiquement en relation avec une intensification (*encadré*) de fortes sécheresses, notamment entre 760 et 800 apr. J.-C. La crise climatique n'est que l'un des facteurs, combinée avec une hausse excessive de la démographie, une déforestation trop importante, des guerres endémiques et une absence totale de gestion de la crise.

**Bibliographie** : J.-P. Bavouzet, A. Bongiu., O. Buchsenschutz, P. Gablin, M. Gratier, M.-P. Horard-Herbin, S. Krausz, M. Levéry, P. Nivet., R. Pécherat, A. Querrien, I. Ralston, J.-P. Saint-Aubin, C. Soyer, M. Vibier (2003) – Histoire et archéologie du pays de Levroux (Indre). Levroux : Association pour la défense et l'étude du canton de Levroux, 2003. 144 p. A. Bordon, O. Peyron, A.-M. Lézine, S. Brewer, E. Fouache (2009) – Pollen-inferred Late-Glacial and Holocene climate in southern Balkans (Lake Maliq). *Quaternary International*. 200, 1-2, 19-30. J. Diamond (2006) – Effondrement. Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie. Gallimard, Essais, 648 p. E. Fouache, D. Garçon, D. Rousset, G. Sénéchal (2005) – Dynamiques géomorphologiques dans la vallée de l'Halil Rud (Bassin de Jiroft, Iran) : perspectives géoarchéologiques. *Paléorient*, 21/2, p. 107-122. S. J. Ivory, A.-M. Lézine (in press) – Climate and Environmental change at the end of the Holocene Humid Period: a pollen record off Pakistan. *C.R. Geoscience*. C. Kuzucuoglu, C. Marro eds. (2007) – Sociétés humaines et changements climatiques à la fin du troisième millénaire : une crise a-t-elle eu lieu en Haute Mésopotamie ? Actes du colloque de Lyon, 5-8 décembre 2005. *Varia Anatolica* 19, Institut français d'études anatoliennes Georges Dumézil (Istanbul), De Boccard (Paris), 590 p. A.-M. Lézine (in press) – Timing of vegetation changes at the end of the Holocene Humid Period in desert areas at the northern edge of the Atlantic and Indian monsoon systems. *C.R. Geoscience*. A.-M. Lézine, J.-J. Tiercelin, C. Robert, J.-F. Saliège, S. Cleuziou, M.-L. Inizan, F. Braemer (2007) – Centennial to millennial-scale variability of the Indian monsoon during the early Holocene from sediment, pollen, and isotope record from the desert of Yemen. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 243, p. 235-249. H. Weiss, M.-A. Courty, W. Wetterstrom, F. Guichard, L. Senior, R. Meadow, A. Curnow (1993) – The Genesis and Collapse of the Third Millennium North Mesopotamia Civilization. *Science* 261, p. 995-1004.



# Les gisements énergétiques du sous-sol urbain

Dans le secteur du bâtiment, les défis énergétiques et environnementaux de la gestion urbaine concernent l'organisation de l'agencement spatial des villes en regard de la ressource géothermale conditionnée par la géologie locale. Pour que cette énergie devienne une réponse à la crise énergétique qui s'annonce, il faut un travail, le plus en amont possible, entre urbanistes, architectes, géotechniciens et installateurs, voire chauffagistes.



**Mindjid Maizia**

PROFESSEUR À L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
DE L'UNIVERSITÉ DE TOURS  
[mindjid.maizia@univ-tours.fr](mailto:mindjid.maizia@univ-tours.fr)

## Le Facteur 4 dans l'habitat : un défi pour la géothermie

La quasi-totalité des acteurs concernés par la gestion urbaine admettent que les défis énergétiques et environnementaux auxquels la métropolisation doit répondre concernent plus l'organisation des activités et l'agencement spatial des villes que la mobilisation ponctuelle de solutions strictement technologiques. L'ampleur de la demande énergétique dans les secteurs du bâtiment et des transports et des effets afférents sur l'environnement (notamment des émissions de CO<sub>2</sub>) est telle qu'elle implique de considérer la technologie comme un moyen complémentaire et non exclusif de penser notre mode d'urbanisation au regard de la crise énergétique qui s'annonce.

Valable pour tout type de réponse technique, cette affirmation se légitime par certaines caractéristiques structurelles propres à la demande d'énergie engendrée par le développement urbain. Quelle que soit l'échelle de leur mise en œuvre, les techniques d'économie d'énergie, de production locale ou de substitution sont tributaires de la structure de la demande, de sa dynamique et de la disponibilité des gisements. Les réponses faites aux enjeux environnementaux sont en effet totalement conditionnées par la nature du rapport qui lie la charge énergétique à la disponibilité et à l'exploitabilité des gisements.

▲  
**Forage pour la Compagnie parisienne de chauffage urbain (CPCU).  
Porte d'Aubervilliers, Paris 19<sup>e</sup>, avril 2009.**

*Well drilled in April 2009 for CPCU  
(the Paris firm for urban heating) at the Porte  
d'Aubervilliers, 19<sup>th</sup> Arrondissement of Paris.*

Cela est particulièrement vrai pour les techniques d'exploitation du sous-sol urbain et de ses ressources géothermales : ces gisements souterrains correspondent-ils à la demande du sur sol urbain ? Un rapport imparfait, non bijectif entre demande et ressources, peut-il être corrigé par des techniques géothermiques spécifiques ou par une orientation contrôlée du développement urbain avec l'objectif de maximiser le recours à ce type d'énergie ?

### La densité de la demande urbaine détermine les solutions

La demande d'énergie dans l'habitat est fortement corrélée à la structure du parc bâti. Les besoins de chauffage, en eau chaude sanitaire (ECS) et en rafraîchissement, postes auxquels la géothermie peut répondre raisonnablement (et qui représentent encore actuellement près des 3/4 des consommations dans un logement et du tiers dans un bureau), sont d'autant plus élevés que le parc est composé de logements anciens (mal ou non isolés) et de maisons individuelles (surface à chauffer importante et enveloppe du bâti fortement déperditive). À l'inverse, un territoire composé en majorité d'immeubles collectifs récents nécessitera peu d'énergie pour le chauffage. Les villes illustrent ainsi ce qui peut apparaître comme un paradoxe : elles concentrent la demande d'énergie en valeur absolue et réduisent, en même temps, le bilan individuel de chaque ménage. Ces avantages sont néanmoins légèrement contrebalancés par un âge de construction plus ancien dans les centres. Leur forte densité est, du point de vue énergétique et géothermique, contradictoirement un atout et une faiblesse. En effet la mitoyenneté des immeubles de centre-ville permet de réduire les surfaces d'enveloppes déperditives mais limite fortement la disponibilité de sol ensoleillé, ce qui restreint d'autant le stockage de chaleur par la subsurface foncière et donc son exploitation par les techniques géothermiques.

Le périurbain résultant de l'extension urbaine des années 1970 est, quant à lui, composé majoritairement de maisons individuelles, plus récentes et mieux isolées car répondant à la première réglementation thermique (1974). Le pavillon en lotissement est généralement mieux isolé mais plus grand, donc plus difficile à chauffer qu'un logement en immeuble collectif. La faiblesse des mitoyennetés dégrade sa performance déperditive

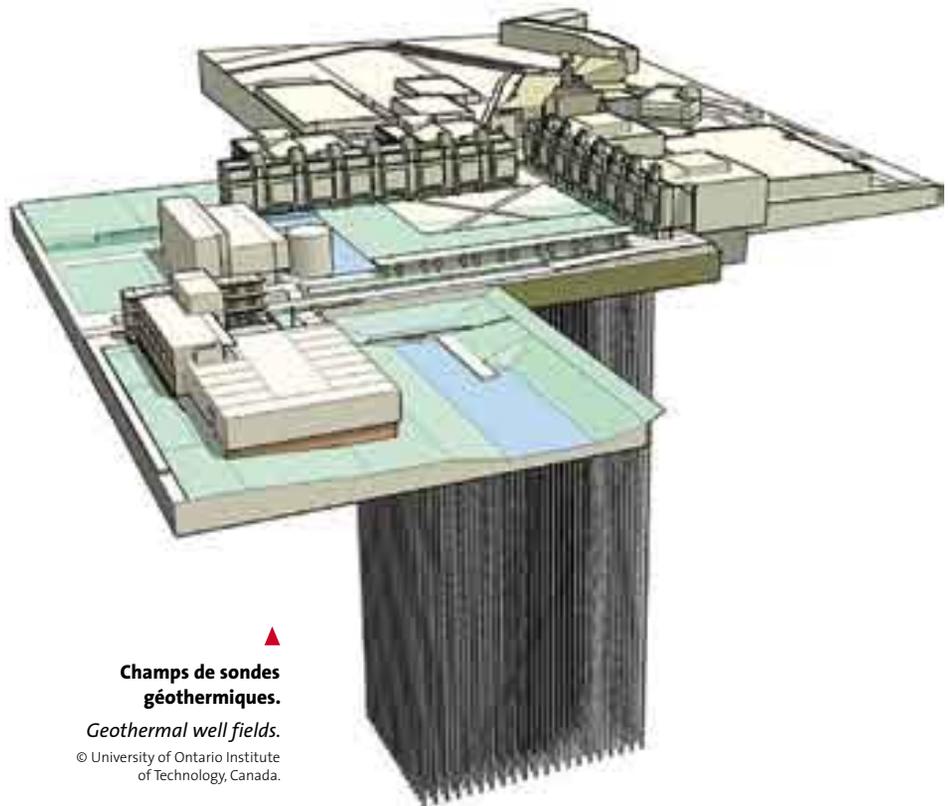
mais améliore le rayonnement solaire sur le sol des jardins et favorise donc le recours à la géothermie de surface par capteurs horizontaux.

La maison rurale accumule, quant à elle, des inconvénients : une grande surface habitable et une isolation moins importante. Mais elle compte statistiquement peu et dispose potentiellement d'une surface foncière généreuse pour l'exploitation géothermique.

### La diversité des solutions géothermiques disponibles

#### *La géothermie superficielle avec PAC : solution pour l'individuel et le petit collectif*

La demande est confrontée à la disponibilité de la ressource, qui doit être appréciée au regard d'une exploitabilité conditionnée par la technique géothermique. Il existe principalement deux ressources : d'une part, la chaleur contenue directement dans les terrains, accumulée à partir du rayonnement solaire et de l'infiltration des eaux pluviales, jusqu'à celle des grandes profondeurs provenant de l'activité géologique de la



**Champs de sondes géothermiques.**

*Geothermal well fields.*

© University of Ontario Institute of Technology, Canada.



**Photo 1 : Mise en place d'une corbeille géothermique (jusqu'à 10 m de profondeur), plate-forme BRGM, Orléans.**  
*Photo 1: Installation of an innovative compact exchanger (down to depths of 10 m), BRGM platform, Orléans.*

© BRGM

terre ; d'autre part, la chaleur de l'eau des nappes d'eau souterraines situées dans des terrains favorables au stockage et à la circulation de l'eau. D'un point de vue technique, ces ressources sont principalement puisées par deux types de captages : soit au au moyen d'échangeurs enterrés (capteurs horizontaux), soit à partir de sondages verticaux. De nouveaux capteurs enterrés, les corbeilles, commencent aussi à se

*“ Les pompes à chaleur permettent d'accroître considérablement la diversité des solutions géothermiques. ”*

développer (*photo 1*). Les rendements globaux des systèmes (énergie utile apportée sous forme de chaleur à l'habitant rapportée à l'énergie indispensable au fonctionnement du système) ont la particularité d'être toujours supérieurs à 1 (entre 2,5 et 3,5<sup>(1)</sup>), ce qui signifie que le service rendu est toujours supérieur à la consommation en énergie finale<sup>(2)</sup>.

Les pompes à chaleur, dont les performances s'améliorent d'année en année, permettent d'accroître considérablement la diversité des solutions géothermiques (*encadré*).

(1) Ce rendement global est plus faible que le rendement machine pris isolément (COP machine), car il intègre l'ensemble du système de distribution et d'émission de la chaleur à l'intérieur du bâtiment.

(2) Les systèmes fonctionnant généralement à l'électricité. Cette affirmation n'est plus toujours vraie en énergie primaire. En effet, 1 kWh en énergie finale électrique est considéré égal à 2,58 kWh en énergie primaire.

### ► LES POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUES : UNE

Fabrice Boissier – chef du département Géothermie du BRGM –  
f.boissier@brgm.fr

Dès que l'on s'enfonce sous la surface, les variations saisonnières sont effacées et la température est stable (12 °C en moyenne en France métropolitaine). Les pompes à chaleur géothermiques puisent cette chaleur pour produire du chaud ou du froid.

La pompe à chaleur est une machine thermodynamique qui puise la chaleur d'un milieu naturel dont la température est inférieure à celle du local à chauffer. Le cycle thermodynamique fonctionne de la manière suivante : la chaleur prélevée dans la terre est captée par le fluide caloporteur au niveau de l'évaporateur. Le fluide y change d'état et se transforme en vapeur qu'un compresseur comprime en augmentant ainsi sa température. En se condensant, la vapeur transmet ensuite sa chaleur au milieu à chauffer. La température de ce milieu s'abaisse fortement dans un détendeur, le rendant prêt pour une nouvelle absorption de chaleur, et le cycle peut recommencer. Il existe des pompes à chaleur réversibles qui fournissent du froid en été, certaines peuvent même assurer une production simultanée de chaud et de froid.

Plusieurs méthodes de captage des calories dans le sous-sol ont été développées et adaptées aux différents types de bâtiment et aux configurations géologiques du site, soit par échange avec le sous-sol, soit en utilisant des aquifères peu profonds. Les *échangeurs horizontaux*, nécessitant une surface d'environ 1,5 fois la surface à chauffer, sont parfaitement adaptés aux pavillons individuels. Les *échangeurs verticaux*, appelés sondes géothermiques, peuvent être utilisés pour des maisons individuelles, mais aussi pour du tertiaire et petit collectif, dans des dispositifs dits de *champs de sondes* (*illustration page 63*), qui associent jusqu'à plusieurs dizaines de sondes. Ces deux premiers types de pompes à chaleur peuvent être installés pratiquement partout. Les *pompes à chaleur sur aquifère* peu profond peuvent atteindre des puissances importantes (pour un débit pompé de 100 m<sup>3</sup>/h, on obtient environ 1 MW thermique). On peut les implanter là où les aquifères existent, dans les bassins sédimentaires ou dans les zones altérées des régions de socle.

Quelles que soient les configurations géologiques, les pompes à chaleur géothermiques peuvent donc être adaptées au chauffage et au refroidissement de tous types de bâtiments.

On assiste aujourd'hui à une large diffusion des pompes à chaleur géothermiques chez les particuliers, mais aussi dans le tertiaire et le collectif. En Suisse, un tiers des maisons neuves est équipé de pompes à chaleur géothermiques contre 8 % en France. Mais les objectifs du Grenelle de l'environnement offrent des perspectives ambitieuses : près d'un million de tonnes équivalent pétrole renouvelable produit par des pompes à chaleur géothermiques en 2020 ! Les enjeux sont donc énormes pour les filières professionnelles. ■

## ÉNERGIE RENOUVELABLE UTILISABLE PARTOUT !

### Les ressources superficielles de la France

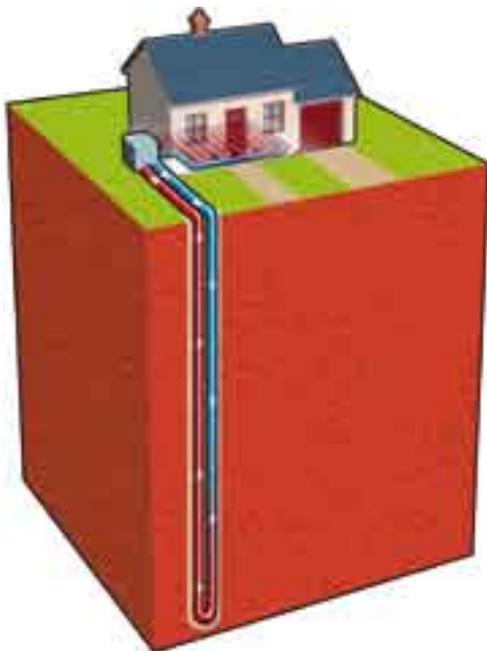
- Alluvial
- Dominante sédimentaire
- Imperméable localement aquifère
- Socle
- Édifice volcanique
- Domaine intensément plissé



#### Capteurs horizontaux enterrés. Type d'installation adapté à l'ensemble du territoire français.

*Buried horizontal heat exchangers. A type of installation suited to all regions in France.*

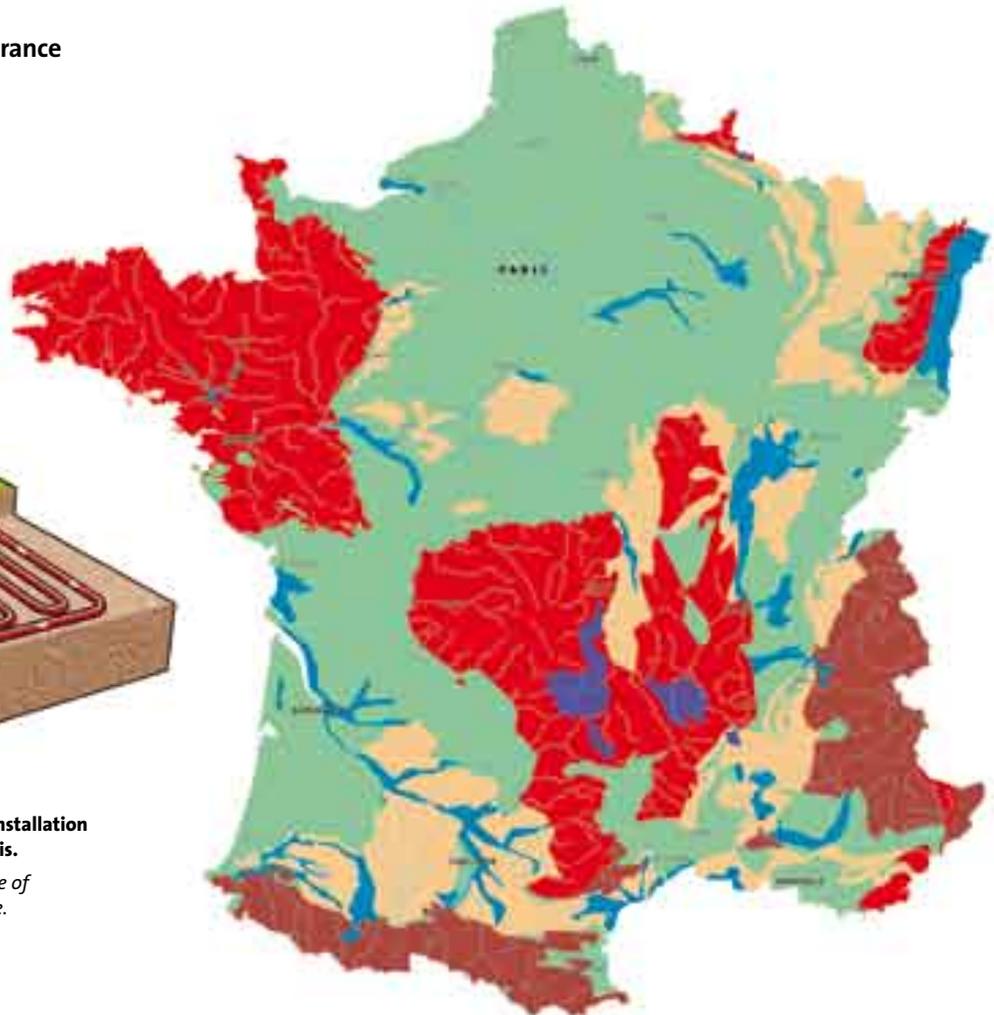
© BRGM



#### Sondes géothermiques verticales. Type d'installation adapté aux zones en rouge (absence de nappes) sur la carte ci-dessus.

*Vertical heat exchangers. A type of installation suited to the red zones on the map above (those without aquifer).*

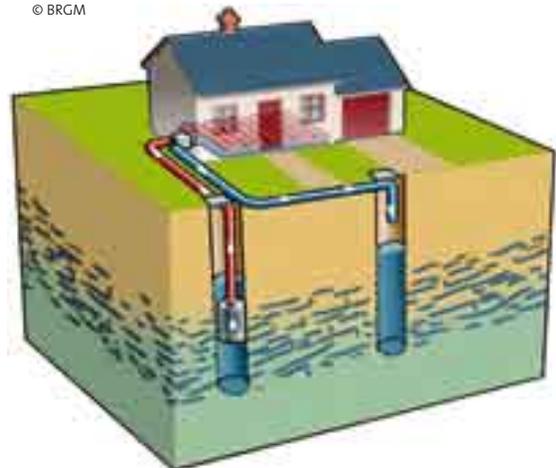
© BRGM



#### Forages sur nappe aquifère. Type d'installation adapté aux zones en vert et jaune sur la carte ci-dessus (bassins sédimentaires).

*Geothermal wells tapping an aquifer. A type of installation suited to the green and yellow zones on the map above (sedimentary basins).*

© BRGM



Ces rendements spectaculaires rendent de telles techniques très attractives. Pourtant, la géothermie n'est efficace, notamment pour les installations individuelles avec pompe à chaleur, que si les systèmes de diffusion de la chaleur des bâtiments sont adaptés au bas niveau de température délivré par les ressources géothermales que ce soit les pompes à chaleur (T maximum avec la technologie actuelle et des coefficients de performances adaptés de 60 °C) ou par la géothermie profonde qui se contente d'un simple échangeur de 80 °C. L'isolation des bâtiments contribue à diminuer la puissance thermique nécessaire et augmente l'efficacité de la géothermie. Elle peut nécessiter un appoint pendant les périodes de grand froid et participe de fait à l'accroissement des pics de consommation électrique lorsqu'elle vient en remplacement de systèmes au gaz ou au fioul. Leur généralisation ne serait donc possible que si cela n'entraîne pas un recours plus important aux énergies fossiles pour produire l'électricité indispensable à leur fonctionnement. L'isolation préalable des bâtiments permettrait bien sûr de limiter la consommation d'énergie thermique, donc d'électricité nécessaire à sa fourniture.

Mais il est tout à fait envisageable d'examiner les gisements du sous-sol au regard des principales techniques géothermiques, car il existe presque toujours une solution géothermique.

### L'exploitation des nappes géothermales pour alimenter les réseaux urbains

Les tissus urbains des centres-villes ont l'avantage d'être contigus et de réduire par le jeu des mitoyennetés les déperditions de chaleur causées par l'enveloppe des bâtiments. Cette configuration autorise des techniques de captation verticale, à partir des aquifères ou directement des terrains. De l'immeuble à l'ilot urbain, les forages peuvent y être réalisés à une profondeur moyenne (plusieurs dizaines de mètres) à condition que l'espace sous-terrain ne soit évidemment pas trop encombré (ce qui est assez fréquent dans les centres historiques). Dans ce cas, il est néanmoins envisageable de délocaliser le sondage dans des lieux plus favorables et de distribuer la chaleur puisée par l'intermédiaire de micro-réseaux ou de réseaux urbains (figure 1).

**GÉOTHERMIE BASSE ÉNERGIE**  
 Chauffage urbain collectif. Le niveau élevé de la température de l'eau permet son utilisation directe pour alimenter des réseaux de chaleur.

**GÉOTHERMIE TRÈS BASSE ÉNERGIE**  
 Chauffage par pompe à chaleur. La température de l'eau insuffisante pour le chauffage direct de locaux, nécessite de recourir à des pompes à chaleur sur eau souterraine ou à des sondes géothermiques.  
 Chauffage de maisons individuelles. Les calories nécessaires au chauffage sont prélevées par un dispositif associant une pompe à chaleur et un capteur enterré dans le sous-sol superficiel.

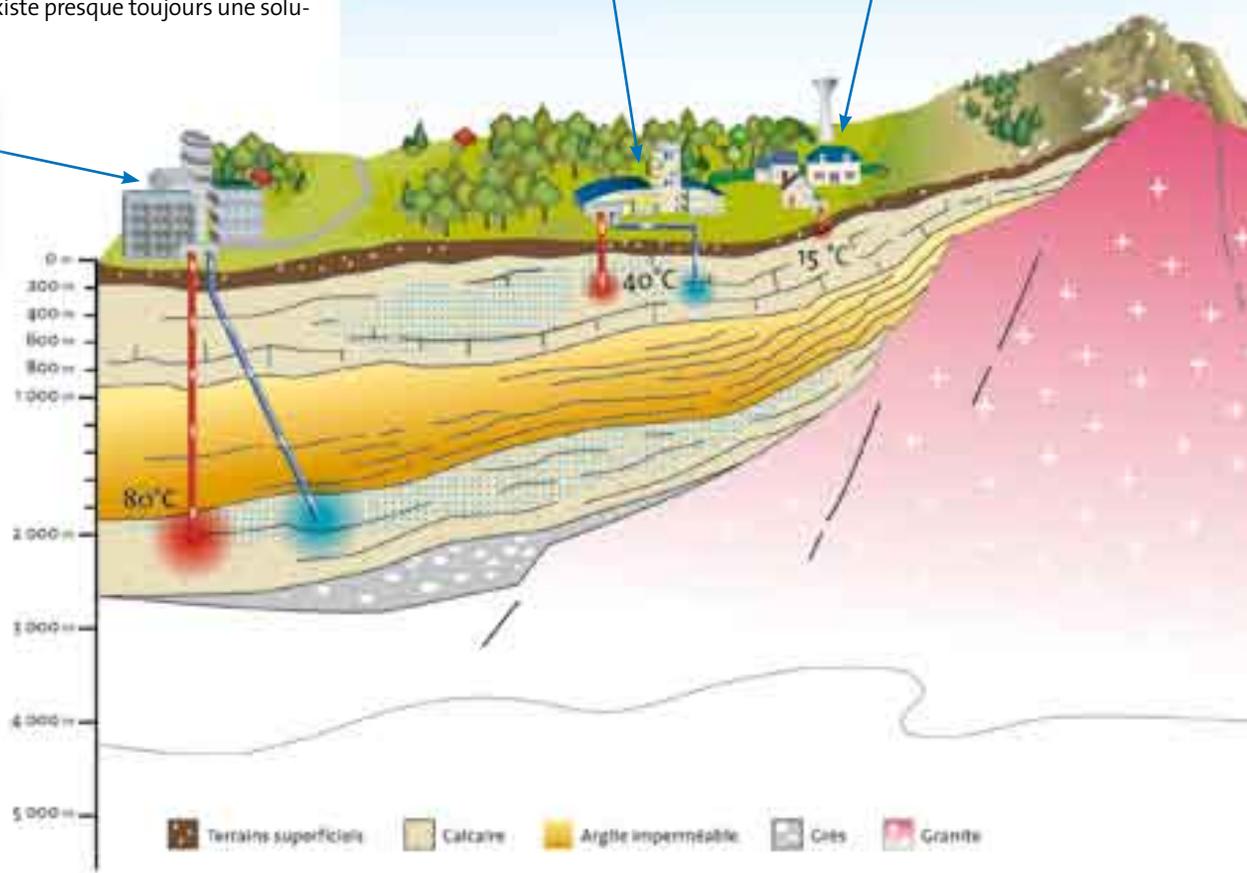


Figure 1 : Réseaux de chaleur urbains.  
 Figure 1: Urban heating systems.  
 © BRGM

Quand les besoins sont très importants et si la ressource géothermale existe, il est alors possible de mutualiser la production et d'adopter des forages de grande profondeur. La densité et la contiguïté des tissus urbains facilitent alors cette mutualisation, tant du point de vue de la rentabilité énergétique qu'économique. Ainsi, 29 réseaux de chaleur urbains chauffent 150 000 logements ou équivalents en région parisienne. Ce type de schéma en réseau autorise un fonctionnement en cascade qui permettra un épuisement efficace de la ressource (*encadré*).

Une telle mutualisation sera d'autant plus rentable économiquement qu'elle remplacera des chauffages collectifs déjà présents que l'on conservera comme appoint/secours. Il est néanmoins possible, comme cela a été réalisé dans les années 1980, de créer des réseaux de chaleur urbains alimentés par la géothermie, d'autant plus que des encadrements financiers ont été mis en place (TVA 5,5 %).

Outre la structure de la demande d'énergie en termes de besoins reposant sur la typologie des bâtiments

## ► LA GÉOTHERMIE PROFONDE

Fabrice Boissier – chef du département Géothermie du BRGM – f.boissier@brgm.fr

Une chaleur diffuse est emmagasinée depuis plusieurs millions d'années dans les empilements de sédiments des bassins sédimentaires français. Certaines de ces couches sont aquifères. On en exploite les eaux entre 1 000 et 3 000 mètres de profondeur, à des températures comprises entre 50 °C et 110 °C, ce qui permet d'alimenter des installations de grandes dimensions (plusieurs mégawatts en général), comme des réseaux de chaleur, des process industriels ou agricoles, ou des équipements tertiaires.

### Le Bassin parisien

Il compte cinq grands réservoirs géothermaux, dont le Dogger qui offre des températures variant entre 56 °C et 85 °C et assure le fonctionnement de 29 réseaux de chaleur géothermiques en région parisienne, représentant plus de 150 000 logements. Le réservoir du Trias, plus profond, n'est pas encore exploité. Les trois autres, à plus faible profondeur, le sont encore peu.



◀  
**Tête de puits  
d'un forage  
géothermique  
dans l'aquifère  
du Dogger.**

*Wellhead tapping  
geothermal energy  
from the Dogger  
aquifer.*

© BRGM im@gé

### Les ressources profondes de la France

© BRGM



### Le Bassin aquitain

Les formations aquifères sont nombreuses mais moins étendues. Deux zones sont particulièrement favorables : l'une au nord-est de Bordeaux, l'autre entre Arcachon et Bayonne. Les principales exploitations géothermiques se trouvent dans les régions de Bordeaux, Mont-de-Marsan et Dax.

### Et ailleurs...

D'autres bassins sédimentaires, l'Alsace, la Limagne, la Bresse, le Couloir rhodanien, le Midi méditerranéen, l'Hainaut sont encore peu exploités, quoique présentant des potentiels localisés importants.

Le Grenelle de l'environnement prévoit, d'ici à 2020, une multiplication par trois de ce type d'opérations de géothermie. ■



composant les centres urbains et malgré la disponibilité de ressources souterraines abondantes, la structure du parc en termes d'équipement de chauffage conditionne et limite l'exploitabilité des gisements. Il ne suffit pas de disposer d'une ressource et d'une technologie pour réduire significativement les consommations d'énergie et les effets sur l'environnement, encore faut-il tenir compte des propriétés structurelles entrant en jeu dans la composition spatiale et typologique des villes.

Marne où tout l'espace de la ressource du Dogger disponible a été occupé. Avec le développement des opérations captant la ressource superficielle, cette limitation de la densité d'opération se posera également plus ou moins rapidement en fonction du potentiel de la ressource.

L'espace périurbain est plus facile à appréhender. Grâce à sa faible densité, ce type de tissu dispose de gisements facilement accessibles. Les jardins qui accompagnent le bâti facilitent les captages horizontaux et les dispositifs individuels. À condition d'être significativement réhabilitées, les maisons individuelles rurales sont susceptibles de profiter des mêmes solutions.

▲  
**Forage de  
Sucy-en-Brie,  
juillet 2008**

*Geothermal well being  
drilled in July 2008  
in Sucy-en-Brie.*

© Elyo

“*La densité des opérations géothermiques sera limitée par les ressources.*”

Il faut également tenir compte de la densité des opérations géothermiques, qui sera limitée par les ressources, à l'image de certains secteurs du Val-de-Marne où tout l'espace de la ressource du Dogger disponible a été occupé. Avec le développement des opérations captant la ressource superficielle, cette limitation de la densité d'opération se posera également plus ou moins rapidement en fonction du potentiel de la ressource.

Il faut également tenir compte de la densité des opérations géothermiques, qui sera limitée par les ressources à l'image de certains secteurs du Val-de-

**Pour une approche prospective de la géothermie urbaine**

D'un point de vue prospectif, à quels enjeux les solutions géothermiques doivent-elles répondre ?

La métropolisation résulte, du strict point de vue énergétique, de la conjonction de plusieurs phénomènes. L'étalement urbain conjugue l'accroissement de la surface foncière artificialisée avec celles des surfaces de logements. De l'échelle du territoire à celle du bâtiment, cette double croissance contribue à l'augmentation de la demande énergétique : l'étalement urbain agit principalement sur les transports alors que l'élévation de la surface habitable alourdit la facture de chauffage. Une généralisation de la géothermie dans

les logements neufs arriverait juste à stabiliser les consommations finales (et ne pourrait pas limiter leur croissance en énergie primaire) et les émissions de CO<sub>2</sub> (à condition que le mix énergétique de la production électrique ne soit pas modifié, ce qui paraît difficilement probable avec un marché du neuf totalement électrifié). Rappelons que les engagements européens à l'horizon 2050 sont de diviser par quatre la production de CO<sub>2</sub> (par rapport à leur niveau de 1990) avec, dès 2020, une diminution de 20 % des consommations d'énergie et des émissions.

La cible du Facteur 4 dans le secteur résidentiel est tout à fait atteignable à partir de la géothermie dans le cadre strict des conditions déjà énoncées, d'autant plus qu'une réhabilitation massive des logements anciens (au rythme d'environ 300 000 par an) aura permis la substitution d'équipements de chauffage adaptés à la géothermie lorsque cela est possible.

*“ Les engagements européens à l'horizon 2050 sont de diviser par quatre la production de CO<sub>2</sub> ”*

Cependant, l'exploitation des ressources du sous-sol urbain ne doit pas être considérée comme un but en soi dans les opérations d'urbanisme, car aucune dimension, qu'elle soit énergétique, environnementale ou économique, ne doit apparaître comme un primat conditionnant toutes les autres dimensions. La tendance actuelle dans le domaine de l'urbanisme et de l'aménagement est de limiter le grignotage progressif des territoires agricoles et naturels, de réduire les déplacements, d'améliorer l'offre de transports en commun, de réaliser des écoquartiers et de valoriser le parc bâti existant.

À tous points de vue, la géothermie offre une solution intéressante, totalement compatible avec ces objectifs même si elle ne doit pas être considérée comme une solution universelle. La complexité et la diversité des situations urbaines, présentes et futures, interdira une telle simplification. Le développement de la géothermie nécessitera en tout cas une gestion rigoureuse de la ressource géothermale profonde ou superficielle.

### Des conditions pour atteindre le Facteur 4 de l'habitat grâce à la géothermie

Équiper de pompes à chaleur l'ensemble des logements neufs ne suffirait pas pour atteindre les cibles définies dans les engagements européens en matière énergétique

# SOLS MESURES

Instrumentation scientifique

## ■ ■ ■ GÉOTECHNIQUE



Profil de raideur, G<sub>max</sub>  
Contrôle de compactage



Essais Géo-mécaniques :  
stabilité, déformabilité,  
liquéfaction



ELDYN

## ■ ■ ■ AGRONOMIE



Lysimètre & capteurs

Profils hydriques &  
Transferts de polluants



Monitoring & Control

Assainissement  
& Infiltration

[www.sols-mesures.com](http://www.sols-mesures.com)

Sols Mesures, 17, rue Jean Monnet  
Z.A. Des Côtés, B.P. 44, 78990 Blancourt

Tel. : 33 (0)1 30 50 34 50

Fax : 33 (0)1 30 50 74 49

E-mail : [info@sols-mesures.com](mailto:info@sols-mesures.com)

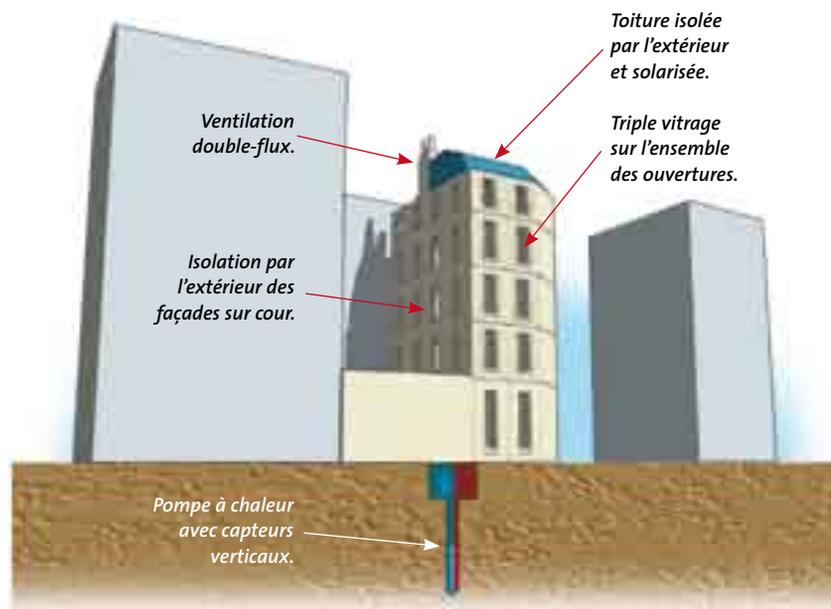


► SOLUTION INNOVANTE : SOURCES COMBINÉES ET DIVERSIFIÉES

Les contraintes liées à l'implantation des bâtiments, la valeur architecturale des façades, la faiblesse relative des gisements solaires en milieu urbain, etc., sont autant de difficultés supplémentaires dans les opérations de réhabilitation énergétique (figure 1). En couplant l'énergie solaire avec les systèmes de sondes géothermiques, il serait possible d'atteindre des cibles proches du BBC (50 kWh d'énergie primaire par m<sup>2</sup> de plancher) pour de nombreux bâtiments anciens, grâce à la recharge de l'énergie du sous-sol par l'énergie solaire.

Les galeries du métro et de réseaux de transport urbains enterrés sont également des sources non négligeables d'apports énergétiques pouvant faire l'objet d'une exploitation. De l'ordre de 18 °C, la température des tunnels entretient en hiver des écarts pouvant aller jusqu'à 12 °C avec l'extérieur (figure 2). Deux opérations ont été menées à Paris, où un dispositif de pompes à chaleur installé sur des puits de ventilation des galeries du métro alimente, par des puissances de 22 kW et 90 kW, un groupe de logements et un gymnase couplé à des bâtiments médicaux. D'autres exemples existent, notamment à Vienne et à Munich, où des locaux de l'opérateur de transports sont chauffés avec des pompes de puissance allant de 30 à 60 kW. Il est également envisageable de réaliser des extractions par conduction à partir des parois internes des

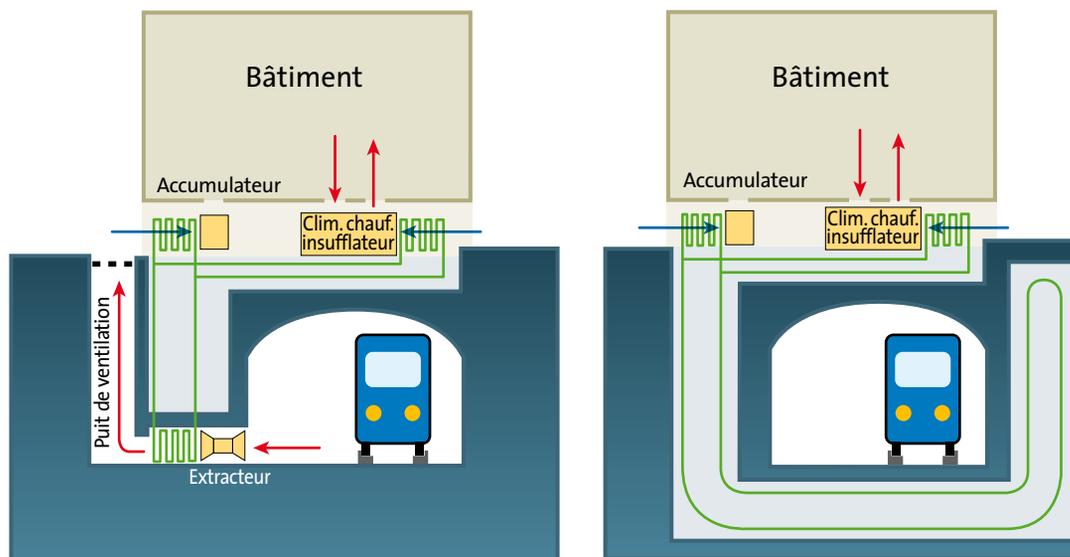
tunnels ou de leur voisinage enterré grâce à des pompes à chaleur sol. À Oslo, une extraction par pompe de la chaleur des réseaux d'assainissement est opérationnelle. La température des eaux usées avoisine les 14 °C et permet de mobiliser des puissances pouvant aller jusqu'à 18 MW ! Bien entendu, tous ces systèmes fonctionnent en basses températures afin de ne pas réduire l'efficacité du réseau d'assainissement. ■



▲ **Figure 1 : Source combinée solaire/géothermie dans l'habitat ancien.**

Figure 1: A combined solar and geothermal energy source in an older home.

© M. Maizia.



◀ **Figure 2 : Diversification de la géothermie : le captage de l'énergie thermique perdue en sous-sol (ici, chaleur du métro).**

Figure 2: Diversification of geothermal energy: retrieving thermal energy dissipated in the subsurface (here, heat from the underground railway).

© M. Maizia, 2008.



## Energy Deposits in Urban Subsurfaces

Today's cities are concentration points in terms of energy stakes, both for transportation and housing. Energy for heating, cooling and domestic hot water production account for half the energy expended. Climate-related policies impose reducing greenhouse gas emissions by a Factor 4. This objective can be achieved by 2050 thanks to geothermal energy, provided the means are ensured to implement all available solutions (deep geothermal technology for system supply in highly concentrated cities and shallow geothermal technology with heat pumps for suburban residential areas), not only in new buildings, but also as restoration measures to retrofit older homes.

“ La géothermie est susceptible de répondre à l'essentiel des enjeux du Facteur 4 de l'habitat. ”

(figure 2) car le taux de renouvellement du parc de logements est bien trop faible. Cela permettrait, au mieux, de conserver les consommations de chauffage et les émissions de CO<sub>2</sub> à leur niveau actuel. On est ainsi loin de la cible du Facteur 4 en 2050.

Une réhabilitation massive accompagnée d'une installation de pompes à chaleur appropriées permettrait d'atteindre ces cibles sous deux conditions (figure 3). D'une part, analyser la situation en énergie finale alors qu'il est indispensable de la regarder en énergie primaire (rappelons qu'1 kWh électrique en énergie finale est en effet égal à 2,58 kWh en énergie primaire). D'autre part que la généralisation de systèmes géothermiques fonctionnant à l'électrique n'impose pas,

pendant les périodes de forte demande, la mobilisation de centrales de production fonctionnant aux combustibles fossiles, ce qui militerait pour la coexistence de la géothermie avec un appoint conventionnel.

### Un double défi

La géothermie est susceptible de répondre à l'essentiel des enjeux du Facteur 4 de l'habitat. Seule, ou le plus souvent avec appoint, notamment par pompe à chaleur, elle peut répondre aussi bien aux contraintes de l'urbanisme dense qu'à celles de l'habitat périurbain. Pour atteindre ces objectifs en 2050, il faudra, non seulement une pénétration massive dans le neuf, mais aussi dans la réhabilitation de l'habitat existant. ■

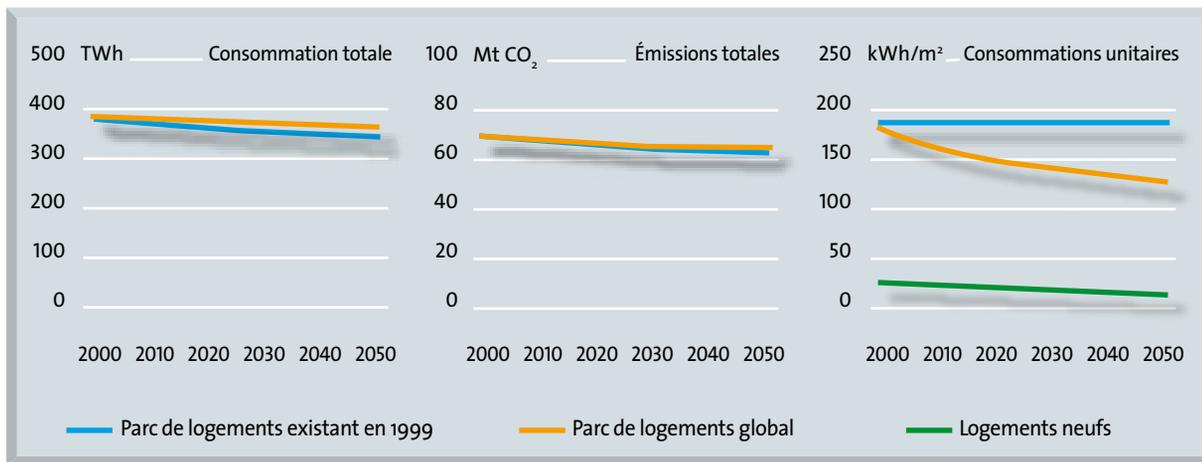


Figure 2 : Scénario d'équipement en pompes à chaleur de la totalité des logements neufs construits après l'année 2000.

Figure 2: Scenario for equipping all new housing built since 2000 with heat pumps.

© M. Maizia, 2007.

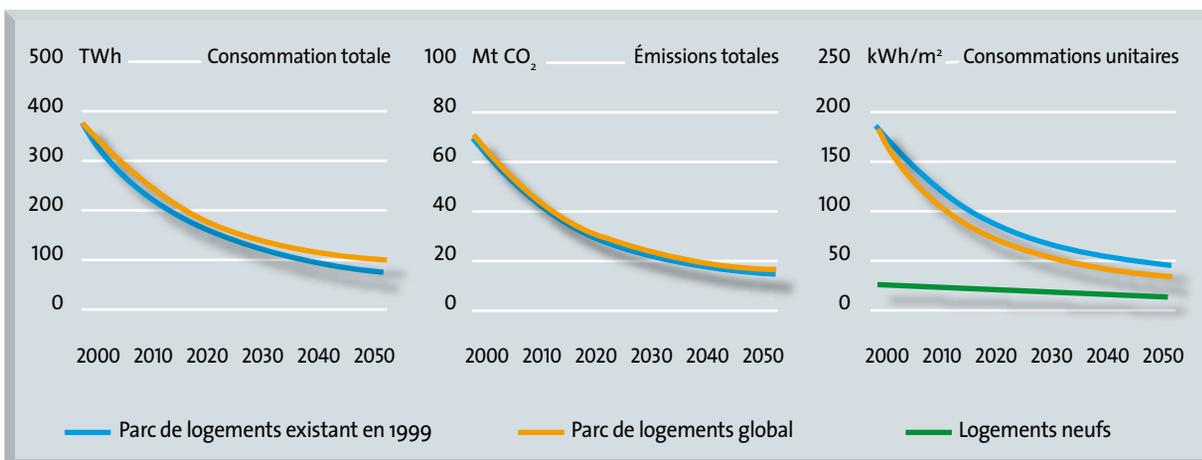


Figure 3 : Scénario F4. Résultats pour un scénario d'équipement en PAC et de réhabilitation du parc total permettant d'atteindre le Facteur 4 à l'horizon 2050.

Figure 3: Scenario F4. Results for a scenario entailing upgrading and equipping all housing with heat pumps that would enable a Factor 4 to be achieved by 2050.

© M. Maizia, 2007.



La banque de données BISMUTH (Banque d'Informations du Sous-sol en Milieu Urbain de Toulouse en géologie et Hydrogéologie) permet l'accès direct des services techniques de la ville de Toulouse aux informations géologiques et hydrogéologiques disponibles pour gérer l'impact des travaux aériens ou souterrains. Ce programme constitue une première étape pour une politique environnementale cohérente et durable en milieu urbain.



# Gestion des données géologiques en milieu urbain

Le centre-ville de Toulouse et la Garonne (vue aérienne).  
Downtown Toulouse and the Garonne River (aerial view).  
© Ville de Toulouse.



**Isabelle Bouroullec** <sup>(1)</sup>  
*i.bouroullec@brgm.fr*



**Éric Bouteloup** <sup>(2)</sup>  
*eric.bouteloup@grandtoulouse.fr*



**Sabine Chardavoine** <sup>(2)</sup>  
*sabine.chardavoine@grandtoulouse.fr*



**Jean-Marie Gandolfi** <sup>(1)</sup>  
*jm.gandolfi@brgm.fr*



**Philippe Roubichou** <sup>(1)</sup>  
*ph.roubichou@brgm.fr*

(1) BRGM, Service géologique régional Midi-Pyrénées.

(2) Direction environnement, service urbanisme et environnement, communauté urbaine Grand Toulouse.

Les contextes géologique, hydrogéologique et environnemental en milieu urbain sont généralement complexes, fortement influencés par de multiples facteurs anthropiques : politiques d'aménagement, décaissements sous nappe, zones imperméabilisées, modifications des écoulements, etc. Dans le cadre de sa politique d'aménagement de l'espace urbain, la ville de Toulouse a souhaité se doter d'un outil pour mieux anticiper et maîtriser ses programmes d'action et appréhender les éventuels impacts de ses décisions.

La ville avait fixé un double objectif au BRGM : disposer d'une base de données unique qui intègre tous les résultats des travaux de reconnaissance réalisés dans le sol et sous-sol mais aussi bénéficier d'une visualisation 3D du sous-sol. Cette base de données intitulée BISMUTH (Banque d'Informations du Sous-sol en Milieu Urbain de Toulouse en géologie et Hydrogéologie) constitue une première étape pour s'engager dans une politique de long terme dans un esprit de développement durable.

La démarche mise en œuvre comporte trois étapes principales : structuration de la base de données, collecte des données et travail de modélisation du sous-sol.



## Géologie et hydrogéologie de Toulouse

Le proche sous-sol de Toulouse est constitué de molasses tertiaires, de formations alluviales quaternaires et de diverses formations quaternaires mais d'occurrence plus rare (figure 1).

- ▶ Les molasses, produits de démantèlement des Pyrénées, sont formées d'une alternance de grès, argile et calcaire déposées dans un environnement fluvio-lacustre.
- ▶ Les formations alluviales comprennent les alluvions de la Garonne et de l'Hers, les principaux cours d'eau qui traversent Toulouse. La séquence élémentaire de ces alluvions comprend à la base un niveau de 3 à 5 mètres d'épaisseur constitué de galets et graviers mélangés à des sables plus ou moins argileux et, au sommet, un niveau plus fin d'argile et de limon pouvant atteindre 3 mètres d'épaisseur. Pour les alluvions de la Garonne, l'origine des galets et graviers est principalement pyrénéenne, au contraire de ceux de l'Hers qui résultent de l'érosion locale de la molasse.
- ▶ Les autres formations quaternaires comprennent le sol historique de Toulouse, les dépôts fins d'origine éolienne, les limons argileux de surface des réseaux hydrologiques secondaires et les alluvions du seuil de Toulouse.

Au niveau hydrogéologique, la principale nappe profonde est celle de l'Éocène située à plusieurs centaines de mètres sous Toulouse. Peu connue, non exploitée, elle doit être considérée comme stratégique, avec de très bons débits d'exploitation. Les nappes « profondes » de l'intra-molassique, contenues dans les puissantes formations tertiaires, sont constituées par de petits aquifères discontinus et de faible extension, généralement peu productifs.

Les nappes alluviales sont incluses dans les alluvions de la Garonne et de l'Hers et sont organisées en deux aquifères : la basse plaine et la basse terrasse. Ces nappes sont alimentées par les eaux météoriques et par le déversement des nappes anciennes vers les terrasses récentes par le biais d'écoulements diffus souvent masqués par les colluvions de pente. Elles se déversent dans le fleuve et ont un rôle de soutien d'étiage. Les inversions de flux du fleuve vers la nappe ne sont qu'exceptionnelles en période de crue. Ces nappes sont vulnérables aux pollutions, mais leurs ressources hydrogéologiques ne sont pas utilisées pour les besoins en eau potable puisque la Garonne assure l'alimentation de la ville. BISMUTH ne concerne que les nappes alluviales.

**Figure 1 :**  
Les formations géologiques synthétiques régionales (Gandolfi et al., 2008) et vue perspective de la morphologie de la commune de Toulouse (Bouroullec et al., 2004).

Figure 1:  
The synthetic regional geological formations (Gandolfi et al., 2008) and a view in perspective of the morphology in the Toulouse metropolitan area (Bouroullec et al., 2004).

© BRGM.



## Structuration de la base de données

La base de données urbaines a été élaborée à partir de trois bases complémentaires : ACCESS pour la saisie des données issues des résultats des sondages, MAPINFO pour l'interface cartographique et GDM (logiciel BRGM) pour le traitement des données et leur modélisation. Les données qui ont permis de « nourrir » les bases de données ont été recueillies à partir de la Banque de données du sous-sol (BSS) gérée par le BRGM ou ont été fournies par la ville.

Ce sont au total près de 8 000 sondages de reconnaissance (figure 2) qui ont été exploités pour une surface urbaine d'environ 119 km<sup>2</sup>, soit une densité moyenne d'un point d'observation pour 1,5 hectare. Le contenu et la qualité des données recueillies sont très variables. C'est pourquoi leur exploitation a dû intégrer les incertitudes liées à la nature des informations et à la difficulté de leur interprétation. En effet, la qualité des descriptions géologiques des ouvrages de reconnaissance du sous-sol dépend en grande partie des objectifs des travaux. L'information issue d'un sondage géotechnique est plus précise que celle issue d'un sondage qui recherche le niveau d'eau. De même, un sondage carotté permet une description plus précise qu'un sondage destructif.

## Organisation des données

L'inventaire des documents disponibles a révélé une très forte hétérogénéité dans les descriptifs, ce qui a exigé une uniformisation des appellations utilisées pour décrire les caractéristiques géologiques d'une même formation. Cela a permis d'aboutir à une codification en limitant la perte d'information initiale.

Ce regroupement des caractères lithologiques au sein d'une même entité géologique a abouti à un référentiel géologique qui conserve les caractéristiques lithologiques pouvant servir à des applications d'aménagement et réduit le nombre de faciès décrits.

Ce travail de synthèse a permis d'individualiser et de caractériser 24 unités lithostratigraphiques homogènes au sein des deux formations alluviales « basse plaine » et « basse terrasse » et de la formation molassique. Pour chacune de ces unités, une description lithologique précise les principales caractéristiques de la roche rencontrée.

Ces données ainsi recueillies et validées ont été intégrées dans la base ACCESS. À partir de celle-ci et du logiciel MAPINFO, une sélection des sondages les plus représentatifs a été réalisée pour construire le modèle géologique du sous-sol. Cette sélection a conservé 3 000 sondages sur les 8 000 disponibles.

## Constitution du modèle

L'outil retenu pour construire le modèle est GDM, logiciel du BRGM qui permet la modélisation géologique type « multicouches » et qui est bien adapté à l'organisation des principales formations sédimentaires, notamment les aquifères alluviaux (figure 1).

L'image numérique de terrain (MNT) qui visualise la surface topographique a été construite à partir d'un semi de points fourni par la ville comprenant 360 000 points photogrammétriques et 1,7 million de points de nivellement.

La maille calculée du MNT est de 20 x 20 mètres et la précision statistique altimétrique varie entre 0,5 et 0,8 mètre.

Ce nouveau MNT (figure 1) calculé est utilisé principalement pour trois applications :

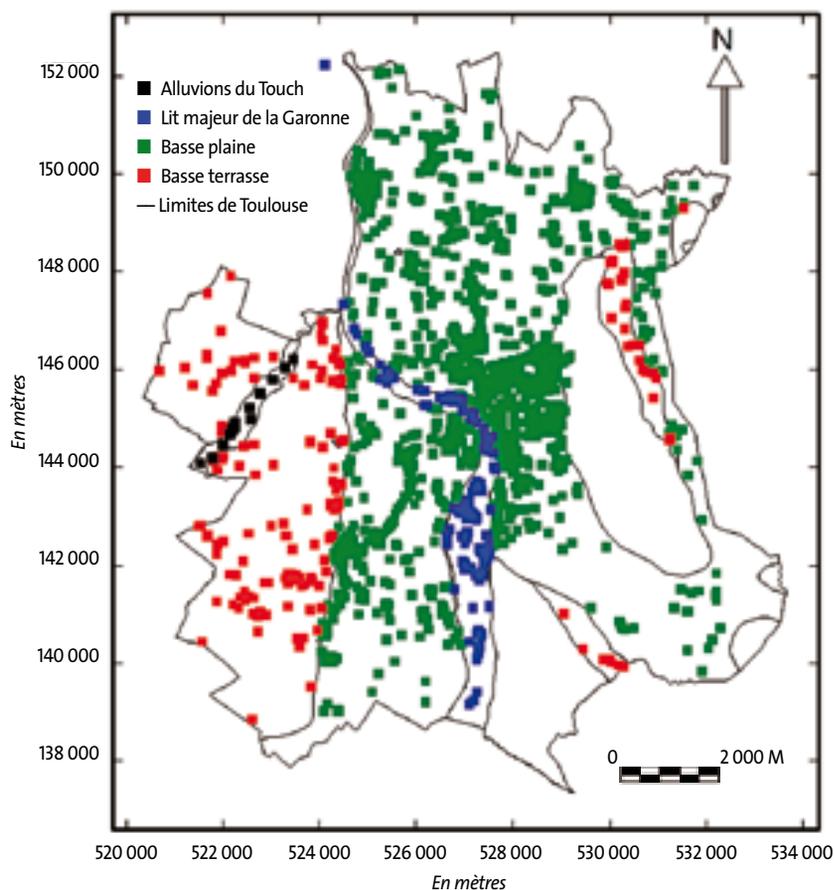
- la visualisation en 3D de la zone d'étude ;
- l'attribution d'un niveau altimétrique cohérent avec le MNT pour chaque ouvrage ;
- la limitation des interpolations à la surface topographique du MNT.

Ce sont au total près de 8 000 sondages de reconnaissance qui ont été exploités.

**Figure 2 : Sondages sélectionnés pour la modélisation (Gandolfi et al., 2008). Les axes de graduation sont en Lambert III en mètres.**

Figure 2: Drillings selected for modelling purposes (Gandolfi et al., 2008). The axes of graduation are expressed in metres in the Lambert III system.

© BRGM.



**Figure 3 : Cartographie de l'épaisseur des formations sablo-graveleuses sur la commune de Toulouse. Les zones blanches ne sont pas modélisées (Gandolfi et al., 2008). Les axes de graduation sont en Lambert III en mètres.**

Figure 3: Mapping of the thickness of sand-gravel formations in the Toulouse metropolitan area. White zones have not been modelled. (Gandolfi et al., 2008). The axes of graduation are expressed in metres in the Lambert III system.

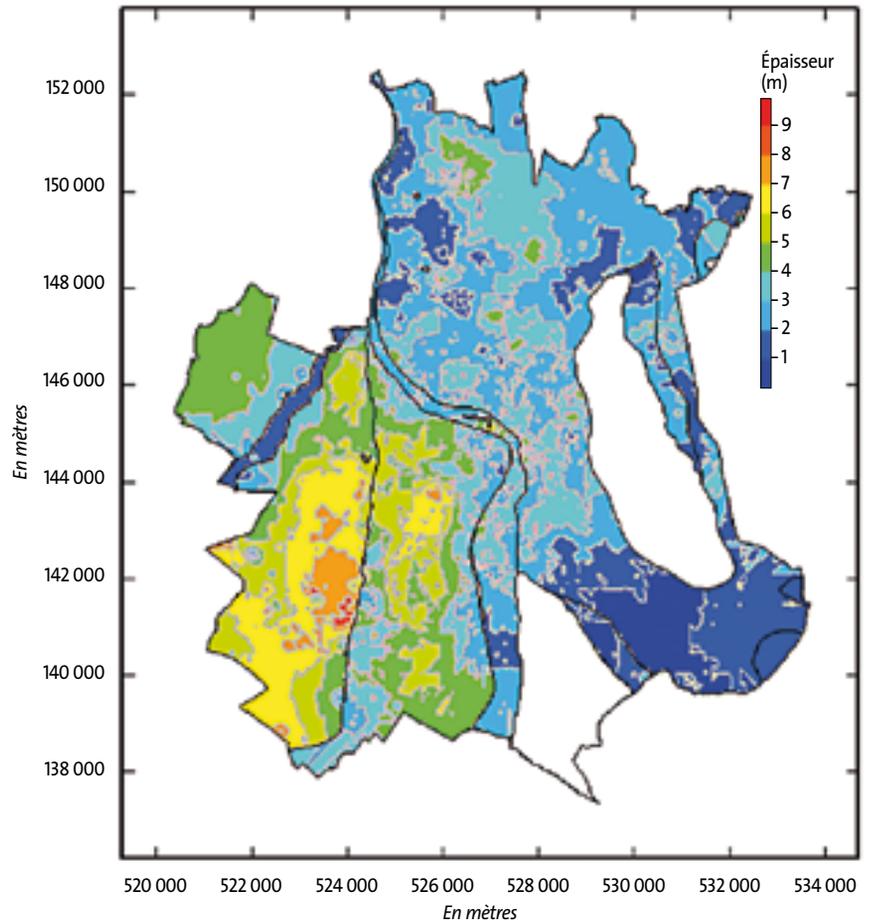
© BRGM.

“ Différentes coupes géologiques ont permis de tester le modèle, qui paraît satisfaisant. ”

Différentes coupes géologiques ont permis de tester le modèle, qui paraît satisfaisant. Dans certains cas il apporte des précisions pour certaines formations et dans d'autres il précise les zones où, du fait de l'hétérogénéité des données de sondages, la connaissance est insuffisante, ce qui nécessite des informations complémentaires.

Pour les services techniques de la ville, le modèle géologique constitue un outil appréciable :

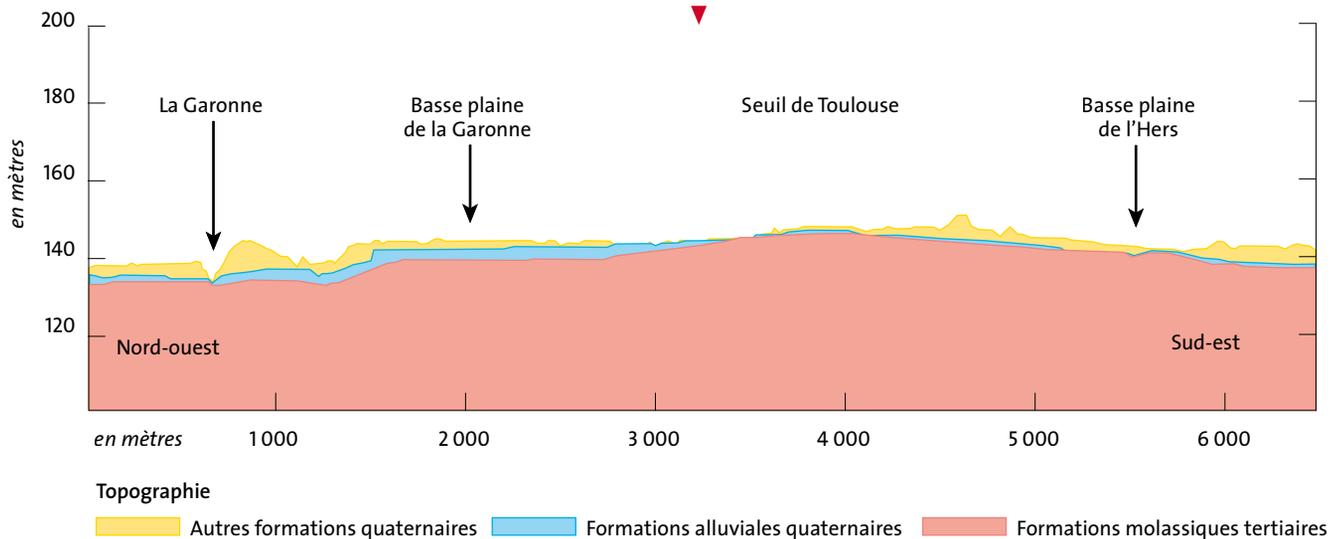
- il permet de cartographier et caractériser les corps lithologiques alluviaux continus à forte porosité (figure 3) ;
- il confirme le caractère discontinu de la lithologie des molasses et précise la répartition des différents faciès ;
- il permet d'obtenir des coupes indicatives du sous-sol (figure 4) qui peuvent être utilisées en amont de tout projet d'aménagement pour optimiser la nature et la quantité des travaux d'exploration préalables à réaliser, voire pour aider à sa localisation.



**Figure 4 : Coupe nord-ouest/sud-est au niveau du seuil de Toulouse. Les formations sablo-graveleuses sont en bleu (Gandolfi et al., 2008).**

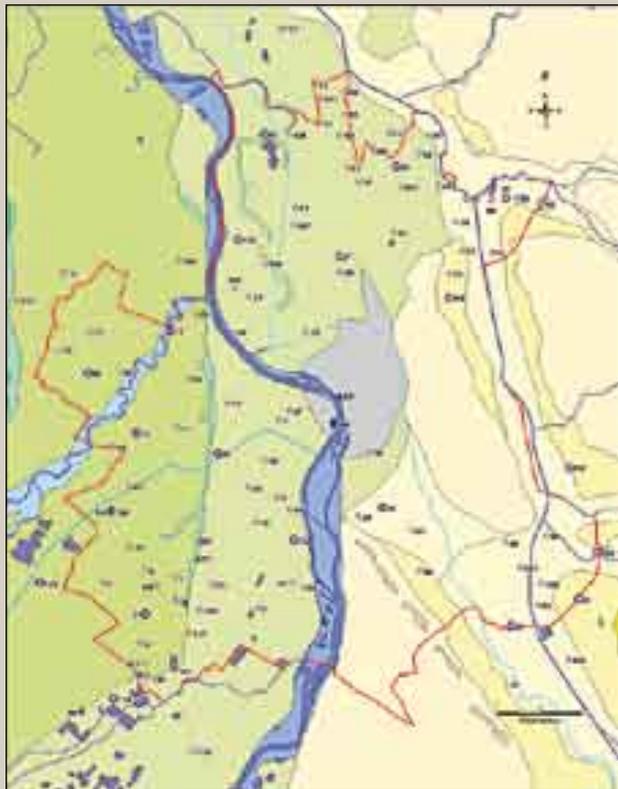
Figure 4: A north-west/south-east cross-section on the level of the Toulouse sill. The sand-gravel formations are indicated in blue (Gandolfi et al., 2008).

© BRGM.



### Formations géologiques

- Sol historique de la ville de Toulouse
- Dépôts à faciès de lœss
- Lit majeur de la Garonne
- Basse plaine de la Garonne
- Basse plaine de l'Hers
- Alluvions modernes du Touch
- Alluvions modernes des cours d'eau secondaires
- Alluvions du seuil de Toulouse
- Basse terrasse de la Garonne
- Basse terrasse de l'Hers
- Éboulis et solifluxions des alluvions
- Formations molassiques



▲ **Figure 5 : Carte des réseaux quantité (101 points) et qualité (27 points) établis à juin 2008 (Gandolfi et al., 2008).**

Figure 5: Map of quantity and quality networks (101 and 27 points respectively) installed as of June 2008 (Gandolfi et al., 2008).

© BRGM.

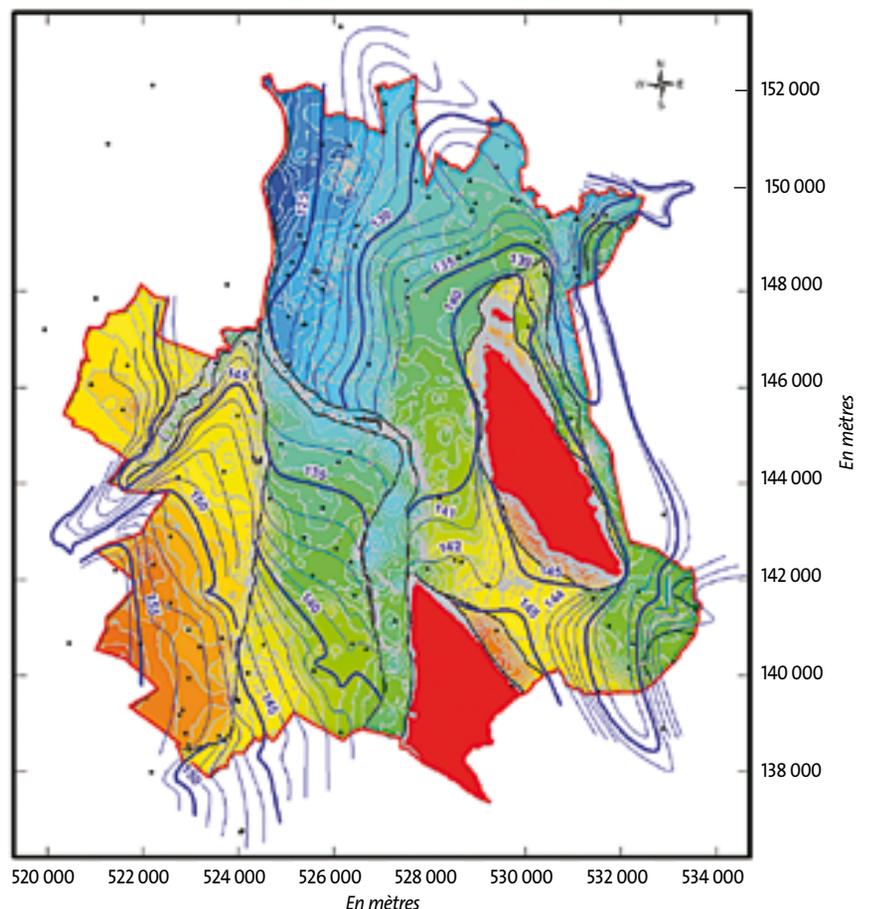
## Réseau de suivi hydrogéologique

Parmi les résultats de la construction du modèle géologique du sous-sol de Toulouse figure la carte de répartition géographique des deux principaux niveaux lithologiques, susceptibles de contenir des aquifères. Cette information, utilisée pour l'implantation optimisée des piézomètres d'observation, a servi de base pour définir les réseaux quantitatif et qualitatif de suivi des eaux souterraines (figure 5, Bouroullec et al., 2005).

### Le réseau quantitatif

À partir de cette cartographie et d'une représentation la plus homogène possible, une centaine de puits ont été identifiés et ont fait l'objet d'un nivellement avec rattachement à la côte NGF (nivellement général de la France).

Les cinq campagnes piézométriques menées en 2007 et 2008 ont abouti à une représentation fiable des fluctuations piézométriques et à une optimisation du réseau afin de suivre au mieux la représentativité des écoulements sur le territoire toulousain (figure 6). Ce réseau optimisé comporte actuellement 55 points. Son suivi régulier devrait permettre à terme la surveillance piézométrique de Toulouse à partir d'une quinzaine de points d'observation en continu.



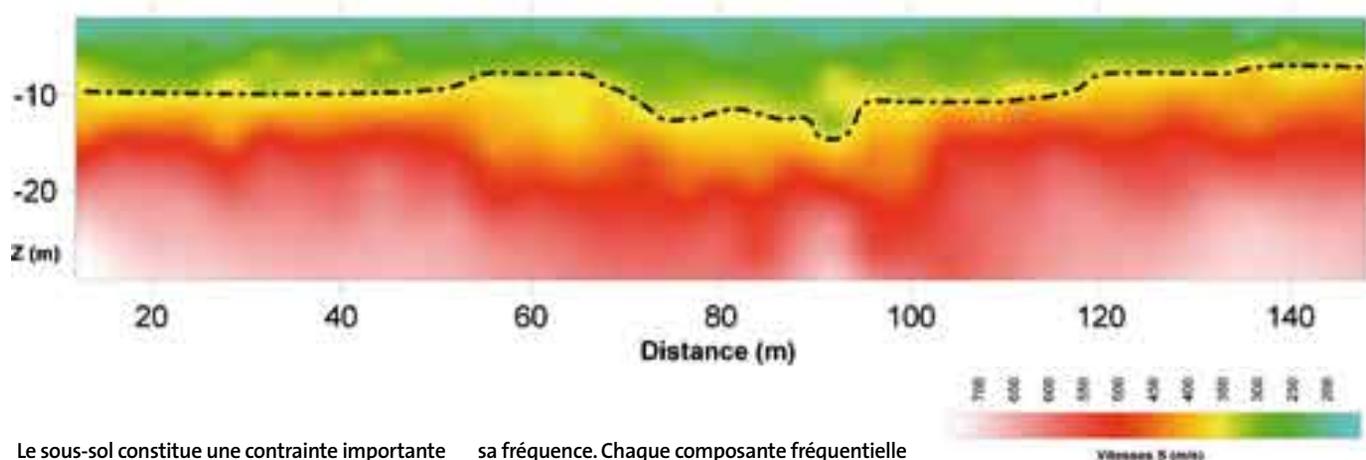
▲ **Figure 6 : Carte piézométrique de février 2007 (courbes isopièzes en m NGF) de la nappe alluviale. Le fond représente le toit apparent de la molasse modélisé sous GDM (Gandolfi et al., 2008).**

Figure 6: A comparison between the piezometric map prepared in February 2007 and the map of the roof of the molasse modelled under GDM (Gandolfi et al., 2008).

© BRGM.

## ► CARACTÉRISATION DU PROCHE SOUS-SOL LE LONG DE TRACÉS LINÉAIRES PAR PROFILAGE SISMIQUE EN ONDES DE SURFACE

Adnand Bitri – Service Risques naturels et sécurité du stockage du CO<sub>2</sub> – BRGM – a.bitri@brgm.fr



Le sous-sol constitue une contrainte importante pour les politiques urbaines : prise en compte des caractéristiques géotechniques pour les grands aménagements, maintenance des réseaux, assainissement, enfouissement des déchets, prévention des risques naturels et des pollutions. L'auscultation du sous-sol le long de tracés linéaires permettant d'établir des profils d'aléas naturels nécessite des techniques géophysiques non invasives fiables et à haut rendement.

L'analyse spectrale des ondes de surface (SASW) répond à cette problématique puisqu'elle permet d'estimer les variations de la vitesse de la propagation des ondes de cisaillement  $V_s$  en fonction de la profondeur.

Dans les milieux stratifiés, l'onde de surface est dispersive : sa vitesse de propagation varie avec

sa fréquence. Chaque composante fréquentielle de l'onde se propage dans une épaisseur de terrain différente, les plus hautes fréquences se retrouvent dans les parties les plus superficielles du sol.

La détermination des vitesses de propagation des ondes de cisaillement par cette méthode représente une alternative intéressante aux mesures géotechniques. La SASW est non destructive et s'utilise sans contrainte en milieu urbain avec une profondeur d'investigation d'une vingtaine de mètres. La *figure 1* illustre cette technique utilisée à Orléans pour la recherche de vestiges souterrains sous la rue Jeanne-d'Arc pendant les travaux d'implantation du tramway (*figure 2*). ■

▲ **Figure 1 : Profil de vitesse des ondes de cisaillement le long de la rue Jeanne-d'Arc, centre-ville Orléans (Loiret, France). L'anomalie de vitesse au centre du profil peut être due à un vestige de l'époque Gallo-romaine (fossé du système défensif de la ville).**

*Figure 1: Profile of shear-wave velocities along the street of Jeanne-d'Arc in the Orléans city centre (Loiret Department, France).*

*The velocity anomaly in the middle of the profile could be associated with remains dating to the Gallo-Roman period (a trench belonging to the town's fortifications).*



▲ **Figure 2 : À gauche : photo aérienne représentant le tracé du futur tramway avec la localisation de la rue Jeanne-d'Arc.**

**À droite : zoom sur la rue Jeanne-d'Arc avec le tracé du profil sismique en rouge.**

*Figure 2: Left: an aerial photo showing the route of the future tramway line and the position of the street of Jeanne-d'Arc.*

*Right: zoom in on the street of Jeanne-d'Arc with the course of the seismic profile marked in red.*

## ► SUIVI DES NAPPES EN GIRONDE, AU DROIT DE L'AGGLOMÉRATION BORDELAISE

Pauline Corbier – BRGM Aquitaine – p.corbier@brgm.fr

Le département de la Gironde se caractérise par la présence d'importantes réserves en eaux souterraines. Il fait aussi partie des départements où les nappes sont les plus exploitées (142,7 millions de m<sup>3</sup> prélevés dans les nappes, à l'exception de celles du Plio-Quaternaire, en 2008).

Le suivi piézométrique des nappes, confié au BRGM par le Conseil général de la Gironde, a débuté en 1958 sur la nappe de l'Éocène inférieur à moyen et a progressivement été étendu aux six grands systèmes aquifères du département. L'évolution du creux piézométrique sous l'agglomération bordelaise a ainsi pu être

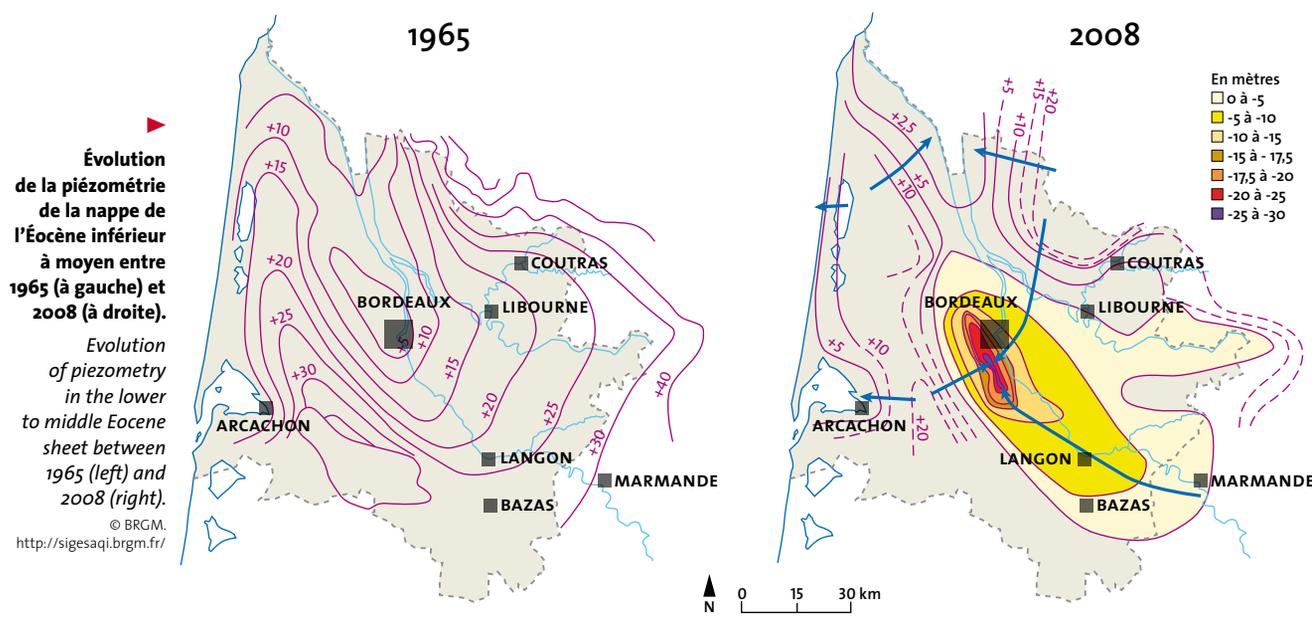
suivie (*illustration*) et des solutions de rééquilibrage des prélèvements ont été proposées (solicitation plus importante de la nappe oligocène en particulier).

D'un point de vue réglementaire, le SAGE<sup>(1)</sup> « Nappes Profondes de Gironde », approuvé par l'arrêté préfectoral du 25 novembre 2003, légitime ces missions de suivi. Ces dernières s'inscrivent aussi dans le cadre plus large de la Directive-cadre européenne sur l'eau (DCE) du 23 octobre 2000 qui fixe aux états membres de l'Union européenne des objectifs de reconquête de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques d'ici 2015 et préconise,

pour ce faire, des procédures de surveillance des masses d'eau.

Aujourd'hui, la poursuite de l'acquisition des données vise à fournir les éléments de connaissance nécessaires au tableau de bord du SAGE, à la gestion des prélèvements (en permettant, entre autres, une actualisation des Volumes maximums prélevables objectif – VMPO – définis dans le SAGE), à l'évaluation des ressources potentielles et au diagnostic de l'état des nappes, afin de répondre aux exigences de la DCE. ■

(1) Schéma d'aménagement et de gestion des eaux.



### Le réseau qualitatif

Une trentaine de points d'eau ont été nécessaires pour obtenir une photographie représentative de la qualité des eaux souterraines.

Les résultats confirment le faciès bicarbonaté calcique des eaux souterraines de Toulouse. Les eaux de la basse plaine en rive droite de la Garonne sont légèrement plus sodiques et sulfatées qu'en rive gauche. Les eaux drainées par les alluvions de l'Hers sont plus sodiques et potassiques que celles de la nappe de la Garonne. D'autres résultats ont porté sur la dureté et les paramètres physico-chimiques. La température moyenne varie entre 13,5 °C en hiver et 15,5 °C en été, le pH oscille autour de la neutralité et les conductivités sont faibles à moyennes.

Ce réseau qualitatif élaboré à partir du modèle géologique permet de mettre à disposition de Toulouse un référentiel « qualité » qui a un double objectif :

- suivre l'évolution de la qualité des eaux souterraines des aquifères alluviaux afin de maîtriser les actions liées à la préservation des milieux en contexte urbain ;
- apprécier et anticiper l'impact des pressions anthropiques.

La gestion des points de ces deux réseaux se fait à partir d'une base de données disponible dans BISMUTH et qui comprend les principales caractéristiques des points et les différents champs permettant de renseigner sur les résultats des prélèvements et des mesures. Tous les résultats sont également basculés dans la base ADES (<http://www.ades.eaufrance.fr/>).



▲ **Toulouse. Le Pont Neuf franchit la Garonne et repose sur les alluvions du lit mineur du fleuve.**

*In Toulouse, the Pont Neuf spans the Garonne River and rests on the alluvia of the river's streamway.*

© Fotolia

## Analyse théorique des potentialités géothermiques de Toulouse (pompes à chaleur avec captage sur nappe)

Toulouse a souhaité une analyse des potentialités géothermiques très basse énergie (GTBE) qui concerne la production de chaleur et/ou de froid à partir des aquifères peu profonds pour une température exploitée inférieure à 30°C.

La caractérisation du potentiel GTBE dans les nappes alluviales nécessite la connaissance de trois paramètres : le débit potentiel, la température et la qualité physico-chimique de l'eau. Les différentes campagnes de mesures indiquent les résultats suivants :

- la température moyenne est supérieure à 12 °C, ce qui constitue un bon indicateur du potentiel géothermique ;
- certains secteurs montrent des caractères corrosifs et entartrants qui nécessiteront des études ponctuelles pour bien préciser ce caractère ;
- les données disponibles sur les débits permettent la distinction et la caractérisation globale de secteurs dont l'hétérogénéité doit cependant être soulignée notamment pour les aquifères alluviaux.

D'une façon globale, six secteurs ont été définis, allant des alluvions récentes de la Garonne présentant un potentiel théorique GTBE sur aquifère intéressant, aux alluvions de l'Hers à potentiel GTBE faible à nul pour tout type de bâtiment. Dans tous les cas, il est fortement recommandé d'envisager une étude détaillée des caractéristiques de l'aquifère et des caractéristiques de l'urbanisation actuelle et future afin de s'assurer de la pérennité de la ressource.

## Une première étape

Le projet BISMUTH comprend une base de données qui gère les points d'observations du sous-sol, un modèle géologique, la définition d'un réseau hydrogéologique et une analyse globale des potentialités géothermiques très basse énergie.

Les services techniques disposent à présent d'un outil pour anticiper ou intégrer la connaissance géologique et hydrogéologique du sous-sol toulousain dans les projets d'aménagement, pour la préservation de l'environnement et la gestion de crise en cas de pollution. L'outil a été livré pour faciliter la mise à jour des nouvelles données issues des travaux souterrains sous maîtrise d'ouvrage de la commune. BISMUTH pourra aussi être complétée par de nouvelles couches d'informations géoréférencées issues de divers travaux ou études : inventaire historique urbain, caractéristiques géotechniques, chimie des sols... Le programme BISMUTH constitue ainsi une première étape indispensable pour qu'une politique environnementale cohérente et durable soit menée. ■

“ BISMUTH pourra aussi être complétée par de nouvelles couches d'informations géoréférencées. ”



## Managing geological data in an urban context

*To manage the impact of aboveground or underground construction on its ground surface or subsurface, the City of Toulouse recognized the need to benefit from geological information in a form that was immediately accessible and directly usable by its concerned technical services. In 2008, BRGM delivered a unique and regularly updatable database containing all the geological and hydrogeological information currently available: this tool was named BISMUTH, standing for “Banque d'Informations du Sous-sol en Milieu Urbain de Toulouse en géologie et Hydrogéologie” (Bank of geology and hydrogeology data on the urban basement of the city of Toulouse). This capitalization on knowledge likewise made it possible to build a geological model, notably in order to map alluvial formations and prepare representative cross-sections of the subsurface at any desired location in Toulouse, to define a hydrogeological monitoring network ensuring a qualitative and quantitative follow-up of the alluvial sheets and, lastly, to analyze the very-low-energy geothermal potential of these sheets. This project is part of the Agenda 21 initiative (a program of concrete measures in support of sustainable development for the 21st century), in which the City of Toulouse committed to take part as of March 2004.*



Messine, comme de nombreuses villes méditerranéennes, s'étend sur les collines bordières, très raides et formées de roches peu résistantes, très hétérogènes et fracturées, dans une région sismique. Les mouvements de terrain sont nombreux et affectent les immeubles récents. D'autres sont construits dans le lit des torrents et menacés par les inondations. Comment peut-on construire ou laisser construire sur ces sites dangereux ?

Les constructions récentes à Messine. À l'arrière-plan, les monts Péloritains ; au premier plan, immeubles des années 1960 sur la plaine littorale au nord de la vieille ville ; au second plan, constructions nouvelles sur les galets quaternaires non-cimentés gris-beiges, élevés jusque vers 120 mètres (formation du Faro).

*Recent buildings in Messina. In the background, the Peloritani range; in the foreground, apartment buildings from the 1960's, standing on the coastal plain, north of the historic city centre. Behind these, new buildings standing on un-cemented, grey-beige Quaternary pebbles, rising up to a height of some 120 m (the Faro formation).*

© Fotolia.



## Pression urbaine et instabilité des versants à Messine (Sicile, Italie)



**Gérard Hugonie**

PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS, IUFM DE PARIS  
UNIVERSITÉ PARIS IV SORBONNE, EA 435 GEONAT  
CHERCHEUR EN GÉOGRAPHIE DES ENVIRONNEMENTS  
MÉDITERRANÉENS (SICILE, ITALIE)  
gerard.hugonie@free.fr

Les villes méditerranéennes se sont presque toutes établies dès l'origine dans des sites peu stables, menacés constamment ou sporadiquement par des phénomènes géologiques et géomorphologiques, comme en attestent les ruines de certaines cités antiques [Villevieille (1997)]. Mais depuis une cinquantaine d'années, la pression démographique et foncière, ainsi que les mutations sociales expliquent la construction aux marges des grandes agglomérations, dans des sites jusqu'alors délaissés, parce qu'ils présentaient des contraintes ou des risques géodynamiques importants. Certes, des mesures de protection ou de prévention sont prises ou promises aux acquéreurs de biens immobiliers. Mais les contraintes naturelles subsistent et restent une menace permanente, comme le montre l'exemple de Messine en Sicile.

### Un site originel instable, devenu insuffisant

Le noyau originel de Messine correspond à des terrasses alluviales et d'anciens îlots rocheux formant un arc légèrement en saillie au-dessus d'une plaine littorale marécageuse, autour d'une petite baie mise à profit pour abriter les navires traversant le détroit de Messine (figure 1). Les principales contraintes étaient les inondations et les apports d'alluvions venus des torrents des monts Péloritains voisins, les tempêtes et les vagues

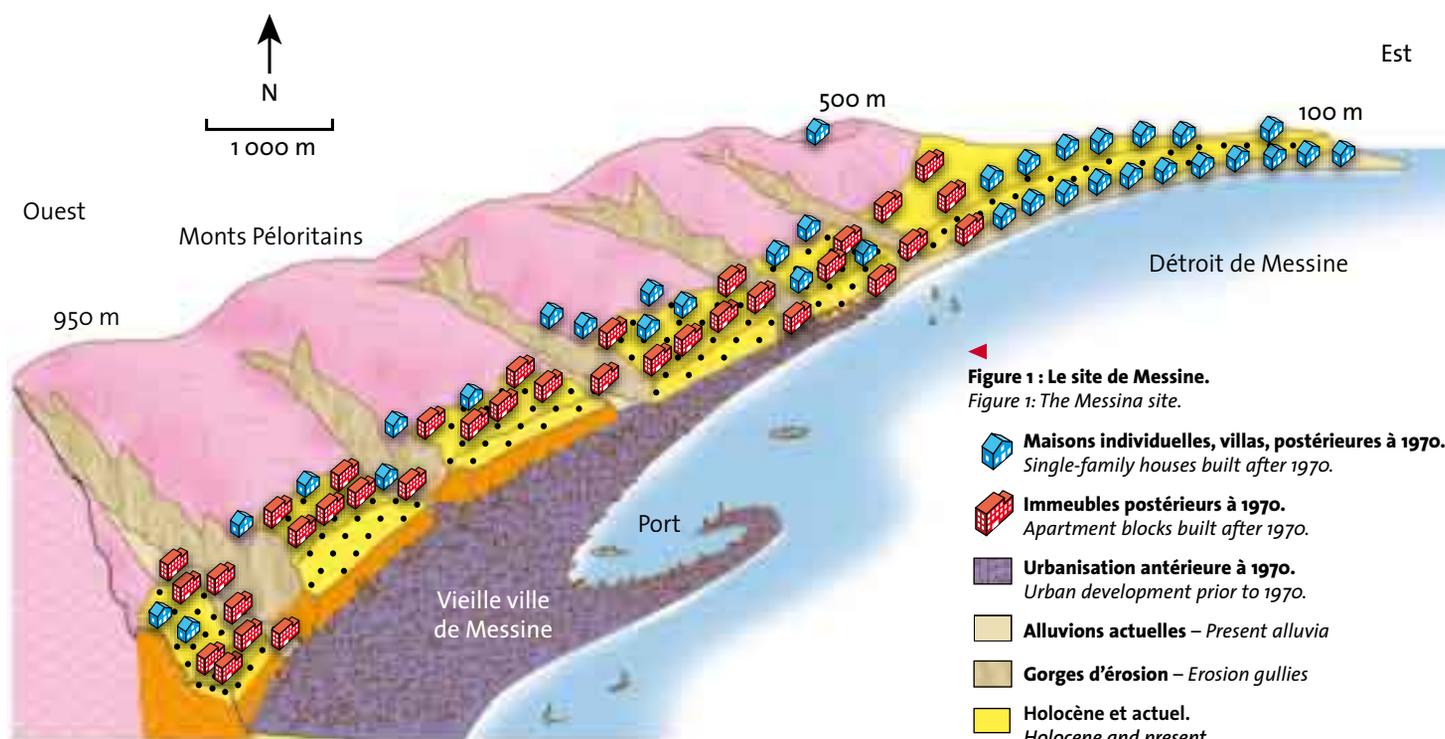


Figure 1 : Le site de Messine.  
Figure 1: The Messina site.

-  **Maisons individuelles, villas, postérieures à 1970.**  
Single-family houses built after 1970.
-  **Immeubles postérieurs à 1970.**  
Apartment blocks built after 1970.
-  **Urbanisation antérieure à 1970.**  
Urban development prior to 1970.
-  **Alluvions actuelles – Present alluvia**
-  **Gorges d'érosion – Erosion gullies**
-  **Holocène et actuel.**  
Holocene and present.
-  **Pléistocène moyen et récent**  
Middle and upper Pleistocene
-  **Terrains cénozoïques et du Pléistocène ancien.**  
Conglomérats oligo-miocènes ; gypses messiniens ; calcaires marneux pliocènes et calabriens.  
Terrains of Cenozoic and lower Paleozoic age.  
Oligo-Miocene conglomerates; Messinian gypsum; Pliocene and Calabrian limestone-marl.
-  **Gneiss paléozoïques cataclasés.**  
Paleozoic cataclased gneiss.

© D'après G. Hugonie

“ Les contraintes naturelles subsistent et restent une menace permanente. ”

violentes de la mer Ionienne, et la sismicité quasi constante de la région. Mais on avait évité de construire trop près des torrents ou au bord de la mer. Après le séisme de décembre 1908 qui fit 80 000 morts, la ville a été reconstruite aux normes anti-séismiques de l'époque, avec des bâtiments peu élevés, séparés par de larges avenues. Les premières pentes au-dessus de la ville, taillées dans les gneiss péloritains ou les formations cénozoïques peu résistantes ne portaient que des forts, quelques couvents, villas ou cabanes de jardin.

Or, depuis les années 1950-1960, Messine s'est densifiée, étalée et manque de place. L'exode rural des années 1950-1960 a entraîné la construction de maisons sommaires dans les fonds de vallées des torrents, de plus en plus près du lit mineur, souvent resserré lui-même par deux chemins parallèles ensuite

► **Le port de Messine avant le séisme de 1908 avec la statue de Neptune encore visible aujourd'hui (rare témoin de l'ancienne ville).**

*The port of Messina before the 1908 earthquake, showing the statue of Neptune still extant today (one of the rare vestiges of the old city).*

© Collection Pascal Barrier, département géosciences, LaSalle-Beauvais





goudronnés (photo 1). Des vergers ont été remplacés par des immeubles, tandis que la partie aval des vallées torrentielles dans la ville même et sur ses marges a été recouverte pour en faire des rues et des parkings, au risque de limiter l'écoulement des eaux lors des averses et de provoquer ou d'aggraver les inondations. L'agglomération s'est ainsi étendue dans les derniers espaces vacants de la plaine littorale et des fonds de vallées, malgré les menaces d'inondation ou de stagnation temporaire des eaux. Là où il n'y avait qu'un aléa naturel, un risque grave est apparu et concerne des habitants de plus en plus nombreux.

### L'extension urbaine sur les collines bordières instables

Faute de place dans la ville ancienne, les particuliers, les pouvoirs publics et les promoteurs se sont attaqués depuis deux décennies aux versants des collines qui dominent la ville. Des centaines de villas, des dizaines

de grands ensembles ont été édifiés aux sommets et sur les versants plus raides des collines, jusqu'alors épargnées. Or ces collines sont peu stables. Elles sont taillées dans des formations géologiques peu résistantes, hétérogènes, quelquefois très fracturées [Truillet (1968)] : des gneiss paléozoïques, charriés, cataclasés et très fissurés ; des conglomérats oligo-miocènes mal cimentés ; des gypses fini-miocènes friables et solubles ; des calcaires marneux ou gréseux peu consolidés du Pliocène et du Quaternaire ancien ou, jusque vers 120 mètres d'altitude au centre, près de 400 mètres à l'est, d'épaisses couches de petits galets non-cimentés du Quaternaire moyen et récent en lits fortement inclinés, la formation du Faro (photo 2).

Toutes ces formations hétérogènes et peu résistantes ont été soulevées de plusieurs centaines de mètres pendant le Quaternaire [Hugonie (1979)], ce qui a entraîné l'encaissement des torrents et la création d'un système de versants très raides, souvent subverticaux, favorables aux éboulements et effondrements. Les violentes averses du climat méditerranéen et la circulation des eaux infiltrées le long des multiples discontinuités des formations géologiques provoquent de nombreux glissements de terrain, décollements et affaissements des versants les plus raides, des ravinements sur les versants en pente plus douce, surtout s'ils sont déboisés. De nombreuses maisons des

▲ **Photo 1 : Constructions nouvelles près des torrents au nord de Messine. Au fond, collines taillées dans les galets du Quaternaire moyen-récent non-consolidés. Au premier plan, lit du torrent Pace, resserré entre deux murs, au pied d'un immeuble des années 1970.**

*Photo 1: New buildings near streams north of Messina. In the background, hills cut into the middle-upper Quaternary unconsolidated pebbles. In the foreground, the bed of the Pace stream contained between two walls, at the foot of an apartment block dating from the 1970's.*

© G. Hugonie.

“  
Là où il n'y avait qu'un aléa naturel,  
un risque grave est apparu.”



**Photo 2 : La formation de galets quaternaires du Faro et des travaux de protection pour un nouvel immeuble. Au fond, colline de 120 mètres taillée dans les galets du Quaternaire moyen et récent, inclinés vers la gauche (le sud). Ravinements, éboulements et glissements, tablier d'éboulis à la base. À gauche, immeubles en construction. Au milieu, travaux de soutènement pour limiter le glissement des galets.**

*Photo 2: The Faro Quaternary pebble formation and protective work undertaken for a new building. In the background, a 120-meter-high hill cut into the middle and upper Quaternary pebbles, sloping to the left (south). Gullying, collapse and rockslides, talus at the base. To the left, buildings under construction. In the middle, support structures to control sliding of the pebbles.*

© G. Hugonie.

faubourgs montrent des traces de fissures, tout comme des immeubles (*photo 3*) dont certains sont menacés par le mur ou le versant situé à l'amont, qui glisse peu à peu vers l'aval (*photo 4*), se gondole et se fissure, laissant échapper des blocs, des cailloux qui viennent former des petits cônes de déjection au pied de la paroi déstabilisée. La situation est particulièrement grave sur les galets quaternaires non cimentés du nord de la ville.

On retrouverait des situations analogues dans de nombreuses villes méditerranéennes qui s'étalent jusqu'à des fonds de vallées menacés par les glissements de terrain et les inondations. Mais à Messine, les risques d'instabilité des terrains sont accrus par la menace sismique. Les secousses sont quotidiennes de part et d'autre du détroit [Bottari (1998)], qui correspond à un grand décrochement transverse dans le bourrelet péloritano-calabrais, extrémité de la plaque lithosphérique européenne affrontée à la plaque africaine. Ces secousses sont intenses une ou deux fois par an avec des effets bien plus destructeurs pour les bâtiments édifiés sur des formations géologiques mal consolidées et hétérogènes, qui créent un effet de résonance et de démultiplication pour les ondes sismiques. Quels immeubles récents perchés sur des calcaires marneux ou des formations à galets non cimentés résisteront lors d'une secousse forte ? Ils s'effondreront, ou au mieux, glisseront en bloc avec les roches en bas des versants [Hugonie (1999)].

### Gestion des risques, dérogations et fatalisme

Comment comprendre que des milliers de citoyens acceptent de s'établir sur des versants aussi instables

ou au fond de vallées torrentielles inondables ? Comment comprendre qu'on laisse construire dans ces sites menacés ?

La première explication est la pression foncière constante et le manque de terrains disponibles dans la ville ancienne. La pression foncière est liée à l'attraction



**Photo 3 : Immeuble fissuré, Contrada Tremonti, faubourg ouest de Messine.**

*Photo 3: A building displaying cracking in Contrada Tremonti, a suburb west of Messina.*

© G. Hugonie.



**Photo 4 : Immeuble en construction menacé par l'effondrement du mur amont, sous la pression des galets quaternaires, Contrada Pace, à l'est de Messine.**

*Photo 4: A building under construction threatened by the collapse of the upslope retaining wall under pressure exerted by the Quaternary pebbles, Contrada Pace, east of Messina.*

© G. Hugonie.



► ET LE 1<sup>ER</sup> OCTOBRE 2009 AU SUD DE MESSINE...



drées. Quelques-unes situées plus haut, sur des versants en pente, ont vu leur substratum rocheux s'imbiber d'eau, s'émietter ou se liquéfier, provoquant des glissements de terrain et la destruction d'immeubles. La catastrophe a particulièrement touché les maisons construites depuis une vingtaine d'années très près du lit mineur des torrents ou à leur débouché sur la plage.

Le 4 octobre, on dénombrait 22 morts, 35 disparus, 80 blessés, 564 personnes évacuées. Les géologues et les services de la protection civile annonçaient des catastrophes hydrogéologiques depuis longtemps, sans écho. Le responsable de la protection civile parlait de « déséquilibres hydrogéologiques créés par les constructions illégales ». C'est pourquoi 11 millions d'euros avaient été débloqués en 2007 pour des travaux de prévention ; mais on ne sait pas où est passé l'argent... ■

Dans la nuit du 1<sup>er</sup> au 2 octobre 2009, la banlieue de Messine connaît des averses intenses et prolongées (230 mm de pluie en 4 heures !) ; phénomène classique en cette saison. Près de Giampilieri et de Scaletta Zanclea, à 17 km au sud du centre-ville, les torrents qui dévalent des cimes des Monts Péloritains (vers 1 250 mètres) jusqu'à la mer ont gonflé immédiatement. Ils traversent à l'amont des gneiss très cataclasés, puis à l'aval des conglomérats oligo-miocènes à matrice argilo-sableuse, des gypses fini-miocènes et des calcaires marneux pliocènes et calabriens. Ils se sont chargés en matériel boueux qui est venu inonder les basses vallées près de la mer.



Toutes les maisons des deux villages ont été inondées, déstabilisées, certaines se sont effon-

de cette métropole régionale sur son arrière-pays, l'exode rural n'étant pas tout à fait terminé en Sicile [Rivière (2004)]. Elle est liée aussi à l'évolution des mœurs, avec de jeunes ménages qui ne veulent plus vivre à l'étroit avec leurs parents dans le centre-ville ! Les promoteurs sont donc à la recherche du moindre emplacement, même situé dans un secteur menacé par les inondations ou les mouvements de terrain. En Italie, les constructions sont soumises à l'obtention d'un permis de construire, délivré par le maire après

examen par les services d'urbanisme communaux qui vérifient le respect des normes réglementaires (zonages de protection archéologique ou monumentale, schémas d'aménagement de la ville et de la région autonome de Sicile, zonages sismiques ou de protection contre les risques naturels ou technologiques, etc.). L'arsenal législatif et réglementaire de l'Italie et de la Sicile est très abondant et permet au maire d'interdire de construire dans des secteurs jugés trop menacés ou de faire évacuer un immeuble déclaré inhabitable.



**La coulée de boue du 1<sup>er</sup> octobre 2009 à Giampilieri dans les faubourgs de Messine.**

*The 1st October 2009 mudflow in Giampilieri, on the outskirts of Messina.*

© A. Trigila, ISPRA, Geological Survey of Italy.



Face aux nouvelles exigences de l'expertise

## CPA Experts

apporte maîtrise technique  
et approche globale

- Construction - Bâtiment
- RC Professionnelle
- RC Produits
- Agro-Alimentaire
- TRC - Montage Essais
- Pollution

112 bis rue Cardinet 75017 Paris  
Tél. : 01 53 70 14 60 - Fax : 01 53 70 84 45  
www.cpa-experts.com - Email : cpa@cpa-experts.com

Mais... encore faut-il appliquer ces textes. Une partie des maisons individuelles est construite ou agrandie sans permis. Si le permis de construire a été attribué, il est assez rare que ces habitations soient inspectées pour juger si elles respectent les interdictions et préconisations. Par ailleurs, les pressions « amicales » sur les bureaux d'urbanisme, les dérogations officielles ou semi-officielles aux règles d'urbanisme sont nombreuses. Le rôle des hommes politiques est ambigu. D'un côté, ils acceptent de voter des textes contraignants et sont sensibles à la pression d'associations de citoyens, notamment écologistes. Mais d'un autre côté, ils considèrent que leur rôle est d'intercéder pour un de leurs concitoyens exposé à un refus de permis de construire ou en butte à une administration jugée rigide et bornée.

“ Comment comprendre que des milliers de citoyens acceptent de s'établir sur des versants aussi instables ? ”

Les particuliers jouent eux aussi un jeu complexe. Ils manifestent après une catastrophe contre la faiblesse des administrations (*encadré*), contre le non-respect des normes de construction. Mais ils construisent facilement sans permis ou n'hésitent pas à acheter des maisons dans des secteurs évidemment dangereux. Ils peuvent aussi faire preuve d'une sorte de fatalisme. Ils savent le site instable et dangereux, mais ils considèrent que c'est le cas de toutes les régions méditerranéennes, qu'il faut vivre avec ces risques. Et il n'y a pas eu de glissement de terrain grave ou de secousse séismique très intense depuis de nombreuses années. Alors on verra bien... De nombreux auteurs ont déjà noté que les néocitadins ont une très médiocre conscience des risques naturels locaux, ne cherchent guère à s'informer, et que la mémoire consciente des catastrophes se perd vite [Y. Veyret (2001)].

La pression foncière sans cesse accrue, qui provoque, comme à Messine, l'étalement des villes méditerranéennes sur leurs marges souvent instables ou inondables, conjuguée à la médiocrité des moyens de contrôle de l'urbanisme et à la sous-estimation des risques par les citoyens pourrait conduire à la multiplication des événements dommageables dans les années à venir. ■

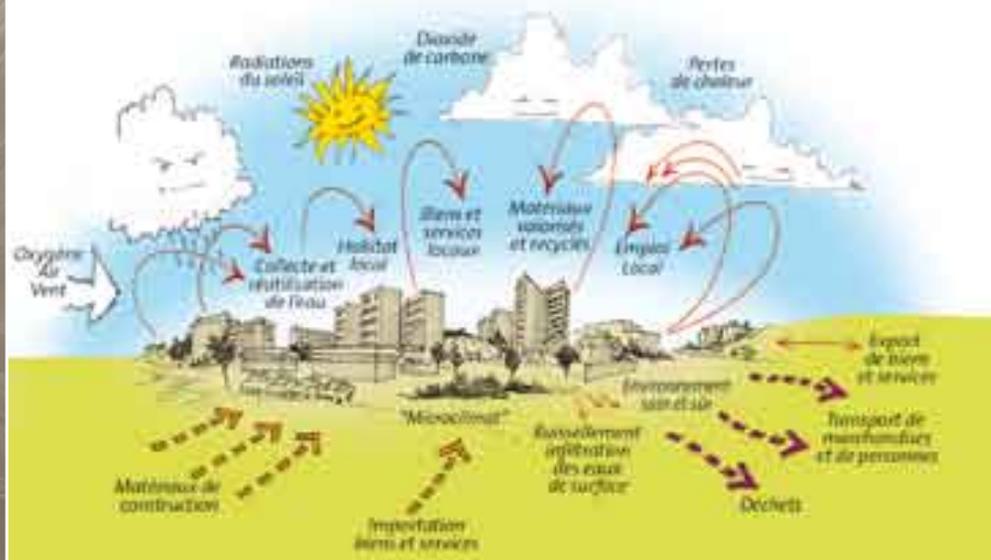


### Urban sprawl and slope instability in Messina (Sicily, Italy)

*Continual population increase in Mediterranean cities such as Messina (north-eastern Sicily) has led to building on seaboard hillsides or in stream ravines that cut across certain quarters. The fact is, the steeply sloping hills are highly unstable, being formed of fissured gneiss, conglomerates or loosely cemented pebbles and limestone or gypsum of poor resistance. They are frequently subject to landslides and subsidence. Part of recent constructions display cracking. Those lying near stream beds are exposed to flooding during cold weather. And the entire city is at risk from regularly-occurring*

*earthquakes. How can we account for the fact that private individuals still build or purchase homes on such unstable sites? City-dwellers are in desperate need of housing, and real-estate pressures are intense. Urban planning services downplay the dangers, claiming every necessary precaution has been taken. They lack means to inspect all constructions, and dispensations are routinely granted. Individuals are either not fully aware of the risks they are running or are simply fatalistic. We can expect to witness an increase in severe events in the years to come.*

En 2010, plus de la moitié de l'humanité vivra dans des villes qui sont consommatrices d'espace, sources de nuisances, productrices de déchets et de pollution qu'elles répandent au-delà de leur aire. La pression que les villes entraînent sur l'environnement, les multiples échelles politiques, sociales et économiques qui y sont associées, nous conduisent à aborder ces nouveaux enjeux de la ville en termes de métabolisme urbain linéaire et métabolisme en boucle. L'écologie territoriale apparaît comme une réponse innovante pour les acteurs publics et privés en recherche de solutions.



# Le métabolisme urbain, un outil de gestion durable



**Marie-Françoise Guyonnaud**

DÉLÉGUÉE GÉNÉRALE FONDATERRA  
UNIVERSITÉ DE VERSAILLES SAINT-QUENTIN-EN-YVELINES  
Marie-Francoise.Guyonnaud@fondaterra.com

**Mélanie Berland**

URBANISTE FONDATERRA  
DOCTORANT C3ED – UNIVERSITÉ DE VERSAILLES  
SAINT-QUENTIN-EN-YVELINES  
melanie-berland@fondaterra.com

▲  
**La ville est représentée comme un écosystème qui gère ses entrants et ses sortants par la régulation ainsi qu'une unité métabolique complexe avec un ensemble d'entrées, un ensemble de transformations et un ensemble de sorties.**

*The city is represented as an ecosystem that manages its inputs and outputs by regulation, as well as a complex metabolic unit having a group of inputs, a group of transformations and a group of outputs.*

D'après un dessin de Jérémy Marcon, Robins des Villes.

## Les villes : un métabolisme urbain durable ?

En ce début du XXI<sup>e</sup> siècle, la population urbaine vient de franchir le cap des 50 % de la population totale de la planète et devrait encore augmenter de 2 à 2,5 milliards d'êtres humains d'ici à 2030. La croissance urbaine constitue un défi majeur pour l'humanité car, faute d'être maîtrisée, elle peut être à l'origine de dysfonctionnements et de crises considérables tant sur le plan social qu'environnemental. Les villes concentrent l'essentiel de la population humaine, de l'activité économique et politique ou encore des services sociaux, sportifs ou culturels et centralisent la majeure partie des flux d'énergie et de ressources. En retour, les villes sont productrices de nuisances et de déchets qu'elles déversent dans l'arrière-pays (figure 1).

Les théoriciens ont mis au point la notion de métabolisme urbain qui constitue un ensemble de transformations et de flux de matière et d'énergie intervenant dans le cycle de vie d'une zone urbaine. La ville est alors représentée comme un écosystème qui gère ses entrants et ses sortants par la régulation,

“ La croissance urbaine constitue un défi majeur pour l'humanité. ”



**Figure 1 : Les villes à métabolisme linéaire ont une grande empreinte écologique.**

**Source de pollution et de nuisances, les villes à métabolisme linéaire sont consommatrices d'espace et d'énergie et génèrent des déchets organiques et des déchets minéraux.**

*Figure 1: Cities with linear metabolism leave a big ecological footprint. Sources of pollution and harmful effects of all sorts, cities having linear metabolism are consumers of space and energy and create organic and mineral waste.*

D'après Rogers Richard, *Des villes durables pour une petite planète*, 2008.

ainsi qu'« une unité métabolique complexe avec un ensemble d'entrées (matières premières, produits semi-finis, produits alimentaires, etc.), de transformations (de ces matières, produits semi-finis, etc.) et de sorties (produits manufacturés, déchets gazeux, liquides et solides, etc.) » Cet écosystème, composé de sous-systèmes, concentre un nœud de transferts de flux de matière et d'énergie qu'il utilise et transforme pour satisfaire ses besoins, maintenir sa stabilité ou étendre son influence. Ces flux sont dégradés sous forme de déchets, de nuisances et d'énergie dissipée [Bochet et Cunha (2003)].

Autrefois, les sociétés urbanisées se développaient de manière infinie avec la mise en valeur d'immenses stocks d'énergie fossile. À chaque phase de croissance, les villes sont parvenues à élargir leur aire d'approvisionnement de leur système énergétique. Mais il n'en va plus de même aujourd'hui. Consommatrices d'énergie et d'espaces hors du périmètre urbain, ces villes ont un métabolisme linéaire : elles consomment et polluent dans de larges proportions et dépendent d'un territoire plus vaste qu'elles exploitent. Ce territoire entretient avec la ville une solidarité forcée (les villes ne fabriquent pas leurs denrées alimentaires). Il est possible de mesurer les ressources utilisées par une ville à l'aide de l'empreinte écologique qui constitue un indicateur de la pression exercée par l'homme sur la nature. Cet outil évalue la surface productive nécessaire à une population pour répondre à sa consommation de ressources et à ses besoins d'absorption de déchets. De plus, le biotope <sup>(1)</sup> urbain dépasse la ville sans égard souvent pour sa biocénose <sup>(2)</sup> (plantes, animaux vivant sur cet espace...).

(1) – Biotope : milieu de vie d'une communauté qui en tire partie pour son existence. Ce biotope a une biocénose associée.

(2) – Biocénose : en biologie, le concept de biocénose se réfère au fait que, dans les écosystèmes, les différentes espèces d'organismes se rencontrent toujours selon des associations caractéristiques.

À mesure que les villes ont consommé de l'espace, les empreintes écologiques ont augmenté et les écosystèmes se sont dérégés. « La signification du changement climatique et de la déplétion du pétrole ne souffre d'aucune ambiguïté : ces données signalent que la civilisation moderne bute sur les limites que lui impose la biosphère » [Revue durable n°28 (2008)]. Des constats alarmants (montée du niveau des océans, pollution des rivières, fonte des neiges, recul de la biodiversité...) nous font prendre conscience de l'impact des activités humaines sur la planète et de la crise urbaine à venir. Alors que 20 % de la population mondiale vit dans les pays les plus riches et produit 53 % des émissions de dioxyde de carbone [Berland (2008)],

“ L'empreinte écologique constitue un indicateur de la pression exercée par l'homme sur la nature. ”

2,7 millions de personnes meurent chaque année de la pollution de l'air essentiellement dans les pays en développement (sources CERDD<sup>(3)</sup>). Le réchauffement climatique constitue la thématique la plus grave tant les actions ou l'inaction à venir conditionneront la survie de l'espèce humaine à long terme et risquent d'avoir des conséquences qui seront irrémédiables. La diversité des problématiques territoriales qu'entraîne le réchauffement climatique nécessite de s'y préparer

(3) – CERDD : centre de ressources du développement durable.

dès aujourd'hui. Face à ces nouveaux défis il semblerait que l'habitat soit confronté à des logiques d'obsolescence en raison des nouvelles normes et réglementations du simple fait de l'évolution technique. Pour freiner ces logiques, une nécessaire requalification de nombreux espaces bâtis et habités de la ville ordinaire est à engager.

“ Nous devons proposer un urbanisme de proximité. ”



Figure 2 : Les villes à métabolisme en circuit minimisent les entrants et ont une faible empreinte écologique.

Figure 2: Cities with circular metabolism hold inputs down to a minimum and leave a small ecological footprint.

D'après Rogers Richard, *Des villes durables pour une petite planète*, 2008.

L'écologiste urbain Herbert Girardet démontre que la solution réside dans les villes visant un métabolisme en boucle, où la consommation est réduite et la réutilisation des ressources optimisée [Girardet (1999)]. Contrairement aux villes au métabolisme linéaire qui ont une grande empreinte écologique, les villes à métabolisme en circuit (figure 2) minimisent les entrants et optimisent le recyclage, la réduction des déchets, la préservation des énergies non renouvelables et l'exploitation des énergies renouvelables.

Refusant la ville étalée et la dépendance automobile, nous devons proposer un urbanisme de proximité et participatif. Pour y parvenir, il est nécessaire de mobiliser les avancées technologiques pour l'émergence de villes économes à métabolisme en boucle avec une réflexion en cycle de vie et non plus des villes libérales et consommatrices d'espace. Au-delà des solutions proposées par les techniques, il est devenu urgent de traiter de l'avenir de l'habitat, de la qualité de la ville et de son habitabilité afin de réconcilier la ville avec les hommes et la nature.

### L'écologie territoriale : de quoi parle-t-on ?

S'inspirant du fonctionnement des écosystèmes naturels caractérisés par de faibles flux de matières et d'énergie et par un fort taux de recyclage, l'écologie territoriale s'attache à un objectif d'amélioration simultanée des performances économiques, environnementales et sociales des activités humaines. Elle vise notamment à optimiser l'utilisation de ressources et à limiter les productions de déchets et de nuisances [Bouillon-Duparc (2002)].

Aussi appelée écologie industrielle ou encore économie circulaire, l'écologie territoriale est une discipline scientifique apparue au début des années 1990 qui propose d'apporter des réponses concrètes aux questions d'aménagement du territoire et aux politiques de développement durable.

L'écologie territoriale cherche à optimiser le fonctionnement d'un territoire et de ses acteurs, en le considérant

“ Il est devenu urgent de réconcilier la ville avec les hommes et la nature. ”

# Se former aux Sciences de la Terre



## Quarante ans d'expérience dans les domaines du sol et du sous-sol

- ▶ Vous êtes acteurs et décideurs de l'environnement et de l'aménagement des territoires, services techniques de l'État et des Collectivités territoriales, entreprises, chambres consulaires, bureaux d'études et de contrôle, experts, maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre...
- ▶ Nous vous proposons des formations présentées sur catalogue dans des domaines très divers : milieux contaminés et déchets, analyse de procédés, ressources en eau, information géologique, risques naturels géologiques, analyses environnementales, géothermie, stockage géologique du CO<sub>2</sub>, géologie urbaine, gestion du littoral, ressources minérales, après-mine.  
<http://formation.brgm.fr/>
- ▶ Pour s'adapter au mieux à vos besoins, nous proposons des formations à la carte. Nous mettons en place chez vous une formation spécifique, « sur mesure », ajustée à un besoin précis.



**brgm**formation

Contactez-nous : [brgmformation@brgm.fr](mailto:brgmformation@brgm.fr)



# ENAG, l'école nationale d'applications des géosciences du BRGM

Ouverte pour la rentrée universitaire 2010, l'ENAG forme des spécialistes en géosciences de haut niveau (titulaires de Master ou de diplôme d'ingénieur) pour :

- intégrer les grands groupes miniers et les services géologiques des États ;
- rechercher de nouvelles ressources ;
- développer une géologie appliquée respectueuse de l'environnement et des peuples des pays concernés.



### AU CŒUR DU SITE « GÉOSCIENCES D'ORLÉANS »

Sur le site du BRGM à Orléans-La-Source, l'ENAG bénéficie d'un ensemble développé de recherche (Université, CNRS, BRGM, INRA...), d'entreprises du secteur, et de centres de formation diplômante de l'Enseignement Supérieur (OSUC, Polytech'Orléans), dans un environnement culturel et naturel de qualité.

### UN DIPLÔME DE SPÉCIALITÉ « RESSOURCES MINÉRALES » EN 18 MOIS

- Stage de terrain (1 mois)
- Remise à niveau (2 mois)
- Tronc commun (8 mois) découpé en 3 ensembles :
  - front de la connaissance géologique et métallogénique
  - gouvernance, économie, droit et gestion
  - géotechnologies avancées
- Stage en entreprise (6 mois)

Renseignements et inscriptions :  
[www.enag-brgm.fr](http://www.enag-brgm.fr)



**enag**

École nationale d'applications des géosciences



comme un écosystème doté d'un métabolisme propre. Pour ce faire, elle peut s'appuyer sur des systèmes d'information et des outils de modélisation qui permettent d'optimiser les flux entre les acteurs économiques et les territoires. Elle s'intéresse aussi aux modes de vie des usagers et engage un dialogue avec les parties intéressées pour optimiser l'offre de services locaux – transports, logements, services de proximité, éducation et formation – de manière à créer un « écosystème » durable.

L'écologie territoriale est une discipline émergente s'adressant aux décideurs publics et privés qui souhaitent améliorer en profondeur l'efficacité de leur action par une approche dite de « système ». Elle combine les techniques d'aménagement du territoire avec les approches d'écologie industrielle, ainsi que les processus de concertation et de gouvernance, et propose des solutions intégrant ces dimensions complémentaires, tant en amont (phase de planification), qu'en aval (mise en œuvre concertée). Elle met un accent particulier sur l'étude des interdépendances entre acteurs et territoires et apporte des réponses à la question de « la bonne échelle » pour optimiser l'action et les systèmes.

### L'écologie territoriale, une solution pour le métabolisme urbain

Pour les décideurs publics et privés en recherche de solutions pour renforcer leur compétitivité de manière accélérée et visible à grande échelle, l'écologie territoriale peut apparaître aujourd'hui comme une réponse innovante, voire « miraculeuse » qui apporte des éléments probants en termes d'impacts et qui s'appuie sur un ensemble scientifique, méthodologique et technique robuste.

Cette approche innovante répond bien ainsi aux objectifs de la stratégie européenne de développement durable qui est de relocaliser l'économie en évitant les délocalisations, de limiter les flux de transport inutiles, de renforcer l'attractivité des territoires, de créer de nouvelles activités et de l'emploi et de diminuer l'impact des activités économiques sur l'environnement.

En l'espace de quelques années, la notion de « pôle » ou de « filière » est entrée dans le cœur du débat sur les bonnes pratiques de développement économique et, dans une certaine mesure, de développement durable.



**Photos 1, 2, 3 :**  
La « vitrine »  
de l'écologie  
industrielle :  
la symbiose  
de Kalundborg  
au Danemark.

*Photos 1, 2, 3 :*  
The "show window"  
of industrial  
ecology:  
symbiosis  
of Kalundborg,  
Denmark.

© Port de Kalundborg.

La multiplication de pôles de compétitivité et de parcs d'activités éco-labelisés, les gains affichés par les approches de filière industrielle et d'éco-conception ou la création de pépinières d'éco-entreprises, font miroiter les avantages de solutions à grande échelle pour les décideurs. L'idée des parcs (ou réseaux) éco-industriels se distingue des traditionnelles pratiques d'échanges de déchets, car elle vise une valorisation systématique des ressources dans une région et ne se contente pas de recycler des déchets au coup par coup. L'exemple le plus célèbre se trouve au Danemark, dans la ville de Kalundborg (photos 1, 2 et 3), où depuis une vingtaine d'années quelques grandes entreprises pratiquent une « symbiose industrielle » à grande échelle. Située à une centaine de kilomètres de Copenhague, Kalundborg est une ville industrielle de 20 000 habitants. Au fil des ans, les principales entreprises ont commencé à échanger des « déchets », de la vapeur, de l'eau et divers sous-produits. À la fin des années 1980, ses responsables ont réalisé qu'ils avaient progressivement et spontanément créé un système, qu'ils baptisèrent « symbiose industrielle ».



Cette symbiose comprend cinq partenaires principaux, distants les uns des autres de quelques centaines de mètres et reliés entre eux par un réseau de pipelines *ad hoc* : la centrale électrique Asnaesvaerket ; Statoil, la plus grande raffinerie de pétrole du Danemark ; Novo Nordisk, grande société de biotechnologies ; Gyproc (panneaux de construction en gypse) et enfin la municipalité pour le chauffage urbain.

Le métabolisme en boucle est le suivant : l'eau qui provient du lac Tissø ou du réseau de la municipalité de Kalundborg, sous forme de liquide ou de vapeur, constitue le « déchet » valorisé de la manière la plus systématique. La raffinerie fournit de l'eau usée pour refroidir la centrale électrique qui vend de la vapeur à la raffinerie, mais aussi à Novo Nordisk. La centrale électrique vend aussi de la vapeur à Gyproc, ainsi qu'à la municipalité pour son réseau de chauffage. Elle fournit même de l'eau chaude à une ferme d'aquaculture. En 1990, la centrale électrique a mis en service une installation de désulfuration : le soufre des gaz de combustion réagit avec de la chaux, ce qui donne du gypse (plus de 100 000 tonnes par an). Transporté par camion jusqu'à l'entreprise voisine, Gyproc, ce gypse est utilisé comme matière première pour ses panneaux de construction. Quant au gaz produit en excès

par la raffinerie, il est utilisé comme combustible aussi bien par Asnaesvaerket que par Gyproc.

La symbiose industrielle de Kalundborg a de nombreux avantages : réduction chaque année de la consommation des ressources de 45 000 tonnes de pétrole, 15 000 tonnes de charbon, 600 000 m<sup>3</sup> d'eau. Réduction aussi des émissions de gaz à effet de serre et de polluants : 175 000 tonnes de gaz carbonique, 10 200 tonnes de dioxyde de soufre. Réutilisation des déchets : 130 000 tonnes de cendres (pour la construction routière), 4 500 tonnes de soufre (pour la fabrication d'acide sulfurique), 90 000 tonnes de gypse, 1 440 tonnes d'azote et 600 tonnes de phosphore [Ehrenfeld & Gertler (1997)].

Cependant, le système présente certains inconvénients, notamment la rigidité des échanges et le risque de perturbations du système en cas de défection de l'une des entreprises. Pourtant, la symbiose de Kalundborg a surtout valeur d'exemple : serait-il possible de reproduire ailleurs, voire de généraliser, ce succès ? Il faut remarquer que l'on rencontre un peu partout de nombreux proto-écosystèmes industriels similaires : dans des régions comme la Ruhr, la Lorraine ou le Houston Channel, on pratique depuis longtemps des

formes plus ou moins élaborées de symbioses entre entreprises. La principale différence réside dans le fait qu'à Kalundborg les échanges symbiotiques se sont développés d'une manière consciente et systématique.

À partir de 1993, on a assisté à une multiplication de projets de parcs éco-industriels, principalement aux États-Unis mais aussi au Canada (*photo 4*), en Hollande et en Autriche. Depuis les années 1990, ce concept rencontre un intérêt particulièrement vif dans plusieurs pays d'Asie où l'écologie industrielle est clairement perçue comme une stratégie permettant d'accroître leur compétitivité économique [Erkman (2004)].

Les meilleures pratiques en matière « d'écoparcs » ou d'écologie territoriale à l'étranger font ainsi apparaître des améliorations de performances significatives avec, par exemple, des réductions d'impacts environnementaux de 50 à 80 % et des économies de coûts :

moins de consommation de matières premières et d'énergie, moins de production de déchets, de polluants et de nuisances.

### L'écologie territoriale, un défi pour demain

L'expérience de Kalundborg montre cependant que cette discipline nécessite un grand nombre de conditions pour réussir : il faut disposer d'une expertise systémique en matière d'analyse des flux et bénéficier d'un engagement fort des porteurs de projets et des politiques. Il est nécessaire aussi – et surtout – de mettre en place un processus de projet rigoureux et un dispositif d'animation pérenne, qui assure l'implication des parties intéressées dans la durée. En effet, la compréhension fine du contexte et des enjeux, trop souvent négligée par les décideurs, est à la base d'un projet de développement économique durable et équilibré.

**Photos 4 et 5 : Le port d'Halifax est un exemple de parc éco-industriel.**

*Photos 4 and 5: The port of Halifax is an example of an eco-industrial park.*

© Port Halifax, Canada.





© Port Halifax, Canada



### **Urban metabolism, a tool for sustainable management**

*In 2010, more than half of humanity will live in cities. Being space-consumers and sources of environmental aggressions, cities spew forth waste and pollution which they propagate on all sides, well beyond their limits and far into outlying areas. Meanwhile, environmental changes (climate, water, energy...) affect the dynamics of urban systems. The unprecedented expansion of the urban built environment and the pressures that cities exert upon the environment, together with the hierarchy of political, social and economic levels that these entail, lead us to approach these new challenges imposed by cities in terms of urban metabolism: a metabolism that may be linear or circular. Confronted with today's new economic, social and environmental stakes, urban metabolism is perceived as no longer sustainable. In the context of the Grenelle of the Environment, regional ecology emerges as an innovative response in the eyes of both public and private stakeholders in quest of solutions to optimize urban metabolism and render it sustainable. It provides guidance in terms of impacts, and it can rely on support from a collaborative network of scientific players, who contribute to building knowledge through the capitalization of "in vivo" experiences with an adaptive and perfectible approach.*

Davantage qu'une science aux contours rigides et normatifs, l'écologie territoriale doit être comprise comme un processus adaptatif. Les options techniques, organisationnelles et économiques y sont régulièrement revisitées avec les parties intéressées en fonction de l'évolution du contexte, des besoins et des attentes des acteurs locaux. Elle repose sur la création et l'animation de réseaux d'acteurs collaboratifs qui contribuent à la constitution de la connaissance par la capitalisation des expériences *in vivo* (notion de processus apprenant).

Il faut donc penser le renouvellement des territoires de façon globale et adopter une réflexion en profondeur et en amont sur les volets économiques, écologiques et sociaux, afin d'anticiper les besoins de demain en termes de logement, d'activités, de formations, d'infrastructures, d'image, etc.

L'écologie territoriale permet de transformer les handicaps des territoires en atouts. C'est parce que la zone urbaine est dense que les espaces ruraux et

périurbains doivent être préservés. C'est parce que la production de nuisances, de pollutions et de déchets est abondante que les perspectives des éco-industries sont favorables. C'est parce que les entreprises industrielles sont nombreuses et variées, que les possibilités d'échanges de flux et de mutualisation des services sont importantes. De telles synergies sont des atouts majeurs dans la quête de compétitivité et d'attractivité pour les entreprises et les territoires.

Fondaterra<sup>(4)</sup>, Fondation européenne pour des territoires durables, expérimente et capitalise des retours d'expérience pour créer des dynamiques territoriales et développer des coopérations à différentes échelles. Le contexte et les enjeux du territoire vus par les acteurs du territoire conduisent à une diversité d'entrées possibles en matière d'écologie territoriale. De fait, la contextualisation des expériences et l'analyse des processus de maturation des projets associés sont essentiels. L'enjeu du processus apprenant est d'analyser et codifier avec les intéressés ce qui fonctionne, dans quel contexte, afin de rendre transposable ces approches à plus grande échelle.

La démarche initiée par Fondaterra vise à bâtir une base de connaissances vivante et partagée, orientée vers des solutions pratiques. À plus grande échelle, l'enjeu est de rendre cette base ouverte et accessible à tous les acteurs concernés par les approches d'écologie territoriale. ■

(4) – Fondaterra : Fondation entrepreneuriale de l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines. [www.fondaterra.com](http://www.fondaterra.com)

“  
L'écologie territoriale permet  
de transformer les handicaps  
des territoires en atouts.”

**Bibliographie :** Berland M. – Mémoire de Recherche « Eco-quartiers : utopie ou réalité ? De l'intention à la conception pour un développement durable ». (nov. 2008), sous la direction de Monsieur le Professeur Michel Carmona, Sorbonne Paris IV (non publié). Bochet B., Cunha A. (2003) – Métropolisation, forme urbaine et développement durable : aménagement des villes et stratégies environnementales, Observatoire de la ville et du développement durable, IGUL, Lausanne (non publié). Bouillon-Duparc H. (2002) – Qu'est ce que l'écologie industrielle ?, Hexagone Environnement. Ehrenfeld J., Gertler N. (1997) – Industrial Ecology in Practice: the Evolution of Interdependence at Kalundborg. Journal of Industrial Ecology, Vol. 1, No. 1, p 67-79. Erkman S. (2004) – L'écologie industrielle : une stratégie de développement. Girardet H. (1999) – Creating Sustainable Cities. Devon, UK, Green Books for The Schumacher Society. L'écoquartier, brique d'une société durable – Revue durable, n°28, février-mars-avril 2008. Rogers R. (2008) – Des villes durables pour une petite planète, édition Le Moniteur, 216 p.



Risques et catastrophes naturelles d'origines sismique, volcanique, climatique, affectent de nombreuses villes et notamment les mégapoles. Le coût de ces catastrophes en termes de vies humaines, de destructions ou de dégâts divers peut mettre en péril, par le biais notamment du coût de la reconstruction, la mise en œuvre d'une politique de développement durable. Ce poids grandissant des catastrophes tient à l'augmentation de la vulnérabilité et non systématiquement au nombre croissant d'aléas de forte intensité. La prise en compte des risques dans les politiques de développement durable diffère fortement dans les villes des pays riches (au sens de pays développés) comme Paris, Londres... dans celles des pays dits émergents (Shanghai, Istanbul) et dans les villes des pays les plus pauvres (Dakha, Lagos, Cotonou...).



## Du risque à la gestion des villes : la ville durable



**Yvette Veyret**

PROFESSEUR  
LABORATOIRE GECKO  
(CENTRE DE RECHERCHES DE GÉOGRAPHIE  
COMPARÉE DES SUDS ET DES NORDS)  
UNIVERSITÉ PARIS OUEST-NANTERRE-LA DÉFENSE  
y.veyret@wanadoo.fr

▲ **Londres les « pieds dans l'eau », 2007. En cas d'importante montée du niveau marin, qu'en serait-il de tels immeubles ? La vulnérabilité est d'abord liée ici aux choix d'aménagement des berges. La « barrière » établie sur la Tamise pourrait-elle suffire à réduire le risque ?**

*London standing in high water (2007). Should sea level rise substantially, how could buildings like these be expected to fare ? Here, their vulnerability is mainly due to the options adopted in developing riversides. Would the "barrier" installed on the Thames be strong enough to mitigate the risk ?*

© S. Beucher.

Au début du troisième millénaire, 47,2 % de la population mondiale est urbaine, 75 à 80 % de cette population se regroupent dans les grandes villes. En 2015 la planète devrait porter, dans les conditions de croissance actuelle, 33 villes dépassant 8 millions d'habitants, que l'on nomme des mégapoles. La plupart seront situées sur des espaces littoraux, ce qui renvoie à la question du changement climatique et à ses effets sur ces villes littorales. Or, plusieurs grandes villes ont déjà subi de grandes crises liées aux aléas naturels, inondation à Paris en 1910, séisme de Tokyo en 1923, de Mexico en 1985 ou d'Alger en 2003. Ces catastrophes ne constituent-elles pas un frein au développement durable de ces villes ? L'évolution des systèmes urbains actuels, notamment le processus de métropolisation ou la constitution de ce que les Anglo-Saxons nomment *megacities* « villes géantes », ne porte-t-elle pas en germe une vulnérabilité d'un type nouveau, que l'on peut appeler la vulnérabilité des systèmes complexes, responsable *de facto* d'une augmentation des risques et des catastrophes, laquelle éloigne toujours un peu plus ces villes du développement durable ?

“  
Plusieurs grandes villes  
ont déjà subi de grandes crises  
liées aux aléas naturels.  
”



**Photo 1 : Mopti au bord du fleuve Niger. Le cas de cette ville de dimension modeste, témoigne de ce qui est souvent pratiqué dans certaines mégapoles des pays pauvres, à savoir l'usage des déchets pour combler les secteurs humides au bord des fleuves et pour gagner ainsi un terrain précieux destiné à l'extension urbaine. Au risque d'inondation est associé un risque induit qui concerne la santé des populations.**

*Photo 1: Mopti, on the banks of the Niger River. The case of this modest-sized city illustrates what often occurs in some megacities in poorer countries, namely using refuse as fill in wet zones beside rivers, thereby creating valuable additional space for urban extension. Risk of flooding is compounded by an induced risk to public health.*

© E. Dorier.



Le développement durable est, pour partie, la réponse à une crise environnementale dont les sociétés sont responsables. La ville, longtemps considérée comme l'anti-nature, a été souvent rendue responsable de cette crise, ce qui justifie qu'elle n'ait été que peu considérée par les mouvements à l'origine du développement durable. Actuellement, l'importance des villes oblige à les intégrer à la question du développement durable défini comme une gestion de la planète impliquant un équilibre entre les aspects environnementaux, l'économie et un partage équitable des ressources et des richesses aujourd'hui et dans le futur.

### **Les mégapoles vulnérables soumises aux aléas naturels**

De nombreuses grandes villes sont soumises à des processus naturels ou aléas et subissent plus ou moins régulièrement des crises ou des catastrophes. Il est nécessaire de distinguer l'aléa, le risque et la catastrophe. Les catastrophes qui impliquent des scénarii de gestion de crise, se traduisent par des victimes, des coûts de reconstruction, de réaménagement, de réhabilitation. Le risque, objet social, s'envisage par le biais de la perception du danger, des représentations que les sociétés et les individus s'en font, et par la gestion, il doit être intégré aux politiques d'aménagement du territoire dans le but de réduire le nombre et l'ampleur des catastrophes. Le risque est le fruit de la vulnérabilité et de l'aléa (photo 1).

### **Villes et mégapoles, espaces vulnérables**

Les villes et tout particulièrement les mégapoles multiplient, amplifient, diversifient les facteurs de vulnérabilité ; celle-ci découle du fonctionnement même de l'espace urbain, de ses logiques d'organisation spatiale et des dynamiques territoriales. Les aspects économiques, sociaux et organisationnels, le patrimoine, les éléments environnementaux, peuvent être des facteurs de la vulnérabilité urbaine qui résulte d'abord de la concentration de population, laquelle expose à tel ou tel événement un grand nombre de personnes. La multiplication des facteurs de vulnérabilité résulte par exemple du regroupement de personnes fragiles (personnes âgées ou enfants), ou de la méconnaissance de l'aléa ; l'amplification de

“ Les villes multiplient, amplifient, diversifient les facteurs de vulnérabilité. ”

cette même vulnérabilité peut provenir du caractère socio-économique du quartier menacé. L'existence d'un quartier pauvre souvent mal équipé, parfois peu accessible, augmente la vulnérabilité et le risque. La diversification des facteurs de vulnérabilité tient notamment à la présence d'activités industrielles ou artisanales parfois sources de dangers en eux-mêmes et qui peuvent, en interaction avec des aléas naturels, être à l'origine de nouveaux types de risques par effet



« domino ». Les spécificités de l'urbanisme peuvent être à l'origine de formes de vulnérabilité particulière. Ce fut le cas à Kobe lors du séisme de 1995 (cf. encadré).

La vulnérabilité inclut l'existence ou l'absence de mesures de protection que certains pays prennent, mais aussi la méconnaissance ou l'insuffisante connaissance du danger par les populations. Toutes les villes, et plus encore les mégapoles, se caractérisent par des risques induits, des risques différés, par une chaîne de risques qui associe risques naturels, technologiques, économiques, sociaux ou géopolitiques et risques pour la santé des populations. Un événement catastrophique provoque parfois des effets en chaîne. Une avalanche meurtrière peut entraîner une baisse de la fréquentation touristique dans une station de sport d'hiver et peut ainsi avoir des conséquences économiques considérables (chômage). Parfois les effets d'une catastrophe ne sont pas seulement immédiats mais se manifestent encore longtemps après : on parle de risques différés (épidémies liées par exemple à une inondation, qui perdurent plus ou moins longtemps après celle-ci).

### ► Kobe, le risque et le développement durable

Plusieurs fois au cours du XX<sup>e</sup> siècle, Kobe a subi les effets des aléas naturels ou de la guerre, plusieurs fois la ville a dû être reconstruite, notamment en 1938 après de fortes inondations et des mouvements de terrain, et après les destructions de la guerre en 1946. Le séisme de 1995 et ses effets induits, les incendies liés à une hyperdensité des constructions, conséquences d'un développement non planifié à l'époque de la forte croissance économique des années 1960-1970 et à la difficulté éprouvée par les services de secours à accéder aux espaces très denses, ont été responsables de plusieurs milliers de morts. Cette situation a suscité une réflexion sur la nécessité d'un urbanisme nouveau, plus durable car tenant mieux compte des risques. Il s'agit notamment d'aérer le centre trop dense de la ville, lieu des incendies. Un maillage en îlots de 2 km sur 2 limités par des cours d'eau, des axes de circulation ou des espaces verts constituant autant de coupe-feu, forme une nouvelle trame urbaine. Des espaces sont aussi prévus comme lieu de regroupement. Les bâtiments sont également soumis à des normes anti-sismiques strictes. ■



**Rupture d'un pont à Kobe lors du séisme de 1995.**

*Failure of a bridge in Kobe caused by the 1995 earthquake.*

© M. Yoshimine.



### L'importance des aléas

Les aléas naturels qui menacent les villes se répartissent en deux groupes, les aléas hydro-climatiques et les aléas d'origine géologique (séismes, éruptions volcaniques, mouvements de terrain, tsunamis). Les premiers sont nombreux : tempêtes de neige, canicules, dont l'Europe nous a fourni un exemple récent (2003), épisodes prolongés de sécheresse (les années 1970 au Sahel), et de précipitations très abondantes. Ces abats d'eau peuvent être dus aux ouragans qui balayent fréquemment les régions intertropicales et affectent les façades orientales des continents où se situent un certain nombre de grandes villes soumises aux effets de vents très violents, d'inondations, de mouvements de masse et de phénomènes littoraux liés aux surcotes. Les fortes chutes de pluies caractérisent aussi les espaces méditerranéens (300 mm à Nîmes en quelques heures en 1988, 1 000 mm en 24 heures dans les Pyrénées orientales en 1940). Les catastrophes d'origine hydro-climatique constituent, en nombre, 79 % de l'ensemble des catastrophes naturelles enregistrées au cours du XX<sup>e</sup> siècle.

Les aléas géologiques, et notamment sismiques, concernent les grandes villes de la bordure pacifique, Los Angeles, San Francisco, les villes des Andes (Quito, La Paz...) et du Japon (Tokyo, Kobe). Ils affectent aussi le vaste domaine qui s'étire du Portugal à la Chine en passant par le pourtour méditerranéen, les Balkans, la

Turquie, l'Iran... Parfois associés aux séismes, peuvent survenir des tsunamis. Les mouvements de masse sont fréquents dans certaines grandes villes ; c'est le cas à Rio de Janeiro ou à Quito, où l'installation de quartiers informels (*favelas*) sur les pentes recouvertes de grosses épaisseurs d'altérites ou de matériaux volcaniques meubles aggrave l'instabilité de ces formations superficielles et favorise leur glissement (*photo 2*).

L'aléa volcanique affecte les villes andines, japonaises, indonésiennes, celles de l'arc caraïbe. Un peu plus de la moitié des volcans actifs et 55 % des épencentres des failles actives ou très actives se localisent dans l'espace intertropical qui représente 25 % de la surface des continents et de nombreuses villes.

Les actions anthropiques peuvent aggraver, voire provoquer, aléas et risques naturels. Ainsi, la construction des barrages sur le Mississippi explique la diminution de la masse de matériaux arrivant à la côte et en conséquence le recul du delta, au moins localement. Une telle situation a accru les risques d'inondation enregistrés à la Nouvelle-Orléans (2005). La subsidence liée au pompage d'eau ou de pétrole contribue à aggraver les inondations dans certaines villes littorales comme c'est le cas à Bangkok, et l'extraction de roches, d'énergies fossiles ou de minerais peut provoquer des mouvements de terrain (*article de Anne-Marie Prunier Leparmentier en page 16 de ce numéro*).



**Photo 2 : Les risques à Quito.**  
**La photographie montre au premier plan, les traces d'un glissement de terrain à Quito.**  
**De nombreux quartiers de la ville sont installés sur des pentes instables.**  
**La vulnérabilité des constructions est considérable.**  
**Les autorités devraient maîtriser l'urbanisation dans de tels espaces.**

*Photo 2: Risks in Quito. In the foreground, the picture reveals traces of a landslide in Quito. Many quarters of the city have been erected on unstable slopes. The buildings are highly vulnerable. It is the administration's responsibility to control urban development in areas like these.*

© A. Sierra, 2007.

Le changement climatique et ses conséquences en terme de montée du niveau marin, doit être pris en compte pour envisager ses possibles conséquences, notamment dans les mégapoles littorales (Dakha au Bangladesh, par exemple). Il nécessite de prévoir dès maintenant divers *scenarii* de réduction du risque.

Le déroulement des processus physiques évoqués peut avoir, à intensité égale, des conséquences plus ou moins graves en fonction des facteurs de vulnérabilités envisagés précédemment. Pour deux séismes de magnitude proche, à Loma Prieta près de San Francisco en 1989 et à Spitak en Arménie en 1988, les conséquences ont été radicalement différentes. Dans le premier cas, il y eut 62 victimes et des dégâts matériels relativement réduits si l'on tient compte des aménagements menacés. La raison tient essentiellement à l'application de normes anti-sismiques pour les constructions. Dans le second, des facteurs politico-économiques justifient des constructions de très médiocre qualité, inadaptées à l'aléa sismique et une gestion de crise insuffisante. La ville de Spitak fut rayée de la carte, environ 25 000 victimes furent dénombrées. Autrement dit, si la connaissance du fonctionnement de l'aléa la plus fine possible est indispensable, elle n'est en rien suffisante pour évaluer l'ampleur du risque et de la catastrophe potentielle.

### La difficile gestion du risque dans les mégapoles, limites du développement durable

#### *Le risque et la catastrophe, limites au développement durable*

La mise en œuvre d'une politique de développement durable exige une économie saine, l'équité socio-spatiale, une gestion conservatoire des ressources. Or, le déroulement de catastrophes naturelles peut freiner cette marche vers un développement durable, par le nombre de victimes, les coûts financiers, la désorganisation sociale qui en résultent.

*Les espaces à risque sont le plus souvent consacrés aux populations les plus pauvres.*



Les catastrophes sont définies par A. Dauphiné (2001) en fonction du nombre de victimes mais aussi en fonction de leurs conséquences écologiques et de leur coût économique qui peut être direct (dommages matériels...) ou indirect (interruption de la circulation des biens et des services, dégradation de l'image...). Les catastrophes ont généralement un coût économique très élevé [Hoeppel (2009)] qui oblige à mobiliser des fonds pour la reconstruction au lieu parfois de les employer à des fins de développement économique et social et d'aménagement urbain. Elles contribuent bien souvent à aggraver les inégalités sociales, car elles affectent particulièrement les populations les plus pauvres, notamment dans les villes des pays en développement où, dans bien des cas ces populations s'installent dans les espaces dangereux. Les espaces à risque sont le plus souvent consacrés aux populations les plus pauvres ; ainsi à Alger, ces populations se sont installées dans les lits d'oued balayés par des crues dévastatrices. Le séisme qui a affecté la ville de Bam en Iran en 2003 a tué plus de 40 000 personnes parce que les maisons en briques crues n'étaient pas conçues pour résister à des secousses sismiques importantes.

▲ **Photo 3 :** La Nouvelle-Orléans, 2005. La photographie montre un exemple représentatif de l'architecture des quartiers pauvres à la Nouvelle-Orléans. Cette construction est très peu adaptée à la force des vents liés au passage des cyclones et à l'inondation. L'habitat, facteur de vulnérabilité, a contribué à aggraver la catastrophe qui s'est produite en 2005.

*Photo 3: New Orleans in 2005. The picture shows a representative example of architecture in the poorer quarters of New Orleans. This house is ill-equipped to withstand flooding and the wind forces associated with hurricanes. The built environment, a factor in vulnerability, contributed to exacerbating the disaster that struck in 2005.*

© J. Hernandez.

# S'engager quotidiennement, développer durablement

Implantée dans une vingtaine de pays, la Sade est le spécialiste de la conception, la construction, la réhabilitation et l'entretien des réseaux (eau potable et assainissement, gaz, électricité, télécommunication, vidéocommunication) et des ouvrages qui leur sont associés.

Ces métiers s'inscrivent dans une politique de développement durable et dans une recherche de solutions constructives alternatives plus respectueuses de l'environnement : économies de matières premières, réduction des pollutions, minimisation de la gêne occasionnée aux riverains.

La Sade s'appuie au quotidien sur une Direction des Etudes pleinement intégrée au métier des exploitants. Elle propose à la fois des solutions de réalisations clés en main et des prestations de diagnostic de réseaux.

- Innovation
- Ingénierie
- Fiabilité
- Adaptabilité
- Proximité
- Sécurité
- Réactivité
- Disponibilité

***Vos besoins sont spécifiques  
nos réponses sont "sur-mesure"***

Entre 1990 et 2000 les catastrophes naturelles ont absorbé environ 5 % du PIB du Bangladesh, 12 % de celui de la Jamaïque et plus de 15 % de celui du Nicaragua (chiffres ONU). Dans ces pays, ce sont les villes qui ont été le plus touchées. La catastrophe qui a affecté la Nouvelle-Orléans en 2005 fournit un autre exemple éclairant qui concerne pourtant une ville de l'un des pays les plus riches du monde. Néanmoins, le manque de finances pour entretenir des digues explique en partie la situation et le fait que la ville, pour des raisons politiques, ait été largement délaissée par l'administration. « *Enfin les cités de la Nouvelle-Orléans ont été nettoyées, ce que nous n'avons pas su faire, Dieu s'en est chargé* », écrivait un responsable de la ville, satisfait qu'aient été éliminés la misère, les plus pauvres et donc l'insécurité du centre de la Nouvelle-Orléans (photo 3).

## ***Gérer le risque en ville pour un développement durable***

**Dans les villes des pays en développement** : gérer le risque en ville est extrêmement difficile notamment dans les mégapoles. La population y est globalement peu avertie des dangers qui la menacent. Parfois une





vision religieuse de la nature la pousse à accepter la crise comme un événement envoyé par Dieu, une punition ou une mise à l'épreuve. Quand elle connaît le danger, la population n'a pas, pour des raisons financières, de solution de repli.

Les flux de population originaire des campagnes viennent s'installer en villes dans des quartiers informels (il s'agit de quartiers installés de manière « sauvage » dans des espaces dangereux et donc non encore lotis en raison même des dangers qui les menacent). Les populations pauvres les occupent sans titre de propriété et en l'absence d'aménagement (adduction d'eau, réseau de collecte des eaux usées, voirie acceptable). Ces quartiers sont souvent menacés par des aléas naturels (Le Caire, Yaoundé, Rio de Janeiro, Istanbul...). Le risque renforce la ségrégation socio-spatiale et les gestionnaires ont beaucoup de difficultés à maîtriser les questions foncières et à faire appliquer la législation de prévention des risques si celle-ci existe.

“  
Le risque et la catastrophe sont des indicateurs des dysfonctionnements de la gouvernance.”

Dans de nombreuses villes des pays en développement, le risque est un indicateur des dysfonctionnements de la gouvernance. Qui décide du fonctionnement de ces grandes villes ? Qui peut faire appliquer les décisions ? Il faut aussi tenir compte de la corruption qui ne contribue guère à la mise en œuvre de politiques coûteuses.

**Les villes des pays riches :** la gestion des risques et des crises dans une mégapole de pays riche n'est pas toujours aisée. Les centres anciens de ces villes, à forte valeur patrimoniale, en témoignent ; ils sont rarement adaptés à une gestion de la crise pour des raisons d'accessibilité. L'habitat n'est généralement pas mieux adapté aux risques, ainsi la reprise des bâtiments anciens pour les adapter au risque sismique n'est pas forcément possible ; elle est, à tout le moins, coûteuse. Que dire des réseaux métropolitains, RER..., dont l'implantation s'est faite indépendamment de toute intégration du risque ?

En France, des travaux récents du ministère de l'Intérieur montrent qu'une grande inondation à Paris aurait des effets désastreux pour la population parisienne. Sur le plan économique, cela se traduirait par des pertes

pour les entreprises de l'agglomération mais aussi, par des effets induits, à l'échelle de la France voire de l'Europe. De même, les conséquences probables qu'aurait un séisme d'intensité identique à celui de 1923, à Tokyo, ont fait l'objet d'une modélisation. Elle permet d'envisager un très grand nombre de victimes, et la nécessité, pour reconstruire la mégapole, de rapatrier les capitaux japonais épars dans le monde, ce qui aurait des effets difficilement calculables pour l'économie mondiale et serait peut-être responsable de l'effondrement de celle-ci [Tokai Bank (1989)].

### ► LES LIMITES DES RELATIONS RISQUES ET DÉVELOPPEMENT DURABLE : EXEMPLE DE LONDRES

D'après S. Beucher – Thèse de doctorat de géographie – Paris X-Nanterre, 2008

Depuis 2005, le développement durable est le fil conducteur de toutes les politiques d'aménagement en Angleterre. La question des inondations est abordée dans la plupart des documents d'aménagement. En revanche, le risque est peu pris en compte par les acteurs locaux pour lesquels la croissance économique est considérée comme le moyen et le but du projet urbain. Une forte opposition apparaît entre « le global-théorique et le local-pratique » [Torres (2002)]. En outre, les objectifs économiques prévalent sur le risque dans les choix de gestion effectués, y compris au nom du développement durable. En témoigne l'exemple de la région de l'estuaire de la Tamise (*Thames Gateway*). La présence d'un grand nombre de digues et de la *Thames Barrier* donne l'illusion de la sécurité, mais celle-ci sera-t-elle garantie en cas de réchauffement climatique marqué dans un secteur où tous les terrains bâtis dans l'estuaire de la Tamise sont situés 5 m au-dessous du niveau des hautes marées ? (*photo page 95*). La conscience du risque apparaît toujours ambiguë. D'un côté, des discours tendent à minimiser le risque (inondation lente, digues...), de l'autre, les autorités ont conscience qu'elles ne sont pas prêtes à affronter une inondation majeure dans le *Thames Gateway* parce que les choix de gestion ont préféré d'autres logiques (économiques notamment). ■

À la suite ou parallèlement à des politiques de protection anciennement conduites (digués, barrages pour prévenir les inondations) et qui dans bien des cas ont montré leurs limites, la prévention des risques a pris une réelle ampleur dans certaines villes des pays riches. Des zonages de l'espace urbain sont proposés, imposés par l'État en France, ou plus ancrés dans le local en Angleterre (*cf. encadré*). Bien que les résultats ne soient pas toujours suffisants et parce que souvent les choix effectués au nom du développement durable font passer la dimension économique avant la gestion des risques, les villes des pays riches se distinguent fortement des autres où la prévention est peu développée faute d'un pouvoir suffisant pour établir et faire appliquer les réglementations d'urbanisme.



### Résilience et crise

La capacité d'adaptation ou de résilience, définie comme l'aptitude de la ville à réagir aux perturbations que sont les catastrophes naturelles, dans le but de retrouver un état proche de la situation antérieure à la crise ou un état permettant un développement nouveau incluant le risque, constitue-t-elle un indicateur pour une ville durable ? Les facteurs qui favorisent la résilience semblent relever de la bonne santé économique du pays et de la ville, d'une technologie suffisante, d'infrastructures et d'institutions efficaces. Les capacités d'adaptation sont supérieures dans les pays riches à ce qu'elles sont dans les autres. Le port de Kobe a été reconstruit au plus vite après le séisme de 1995 pour maintenir les activités de commerce dans ce port, mais cela a été possible parce que le Japon a pu consacrer des finances suffisantes pour une telle réparation. Qu'en serait-il dans une mégapole d'un pays pauvre où certaines catastrophes naturelles engloutissent une part importante du PIB ? Après la crise ou la catastrophe, les modes de reconstruction envisagés doivent intégrer pleinement les politiques de durabilité comme ce fut le cas lors de la reconstruction de Lisbonne par le marquis de Pombal, après le séisme de 1755 et qui a permis d'en faire une ville moderne, ouverte vers l'extérieur.

En conclusion, la gestion des risques naturels ne peut se suffire de réponses techniques, ou de la seule analyse de l'aléa ; elle implique une vision pluridisciplinaire



**Photo 4 : Place du Rossio, construite par le marquis de Pombal à la suite du séisme de Lisbonne de 1755. La ville très serrée jusqu'à cette date tragique, présente un urbanisme très moderne pour l'époque, caractérisé par un plan en damier et par de grandes places et des avenues larges. Indirectement la catastrophe a eu des aspects positifs.**

*Photo 4: Russio Square, built by the marquis de Pombal in the aftermath of the 1755 Lisbon earthquake. The city, very densely built prior to that tragic event, features an urban concept that was very modern for the period, characterized by a grid pattern and by spacious squares and wide avenues. Indirectly, the disaster did turn out to have beneficial consequences as well.*

© Y. Veyret.

qui la rend particulièrement difficile à aborder. Les nouveaux aménagements effectués pour une ville durable devraient être réalisés en intégrant les risques naturels, mais la pression économique ou foncière va souvent à l'encontre d'une bonne intégration de ceux-ci aux politiques urbaines y compris quand elles se veulent durables. S'il est totalement utopique de penser atteindre le risque zéro, il faut tout de même rappeler l'inégalité criante face au risque entre populations et villes des pays riches et des pays pauvres. ■

“ La gestion des risques naturels ne peut se suffire de réponses techniques. ”



### From urban risk to urban management: the Sustainable City

*The level of urban development in the world today (now more than fifty percent of the world's population lives in cities) – expected to grow even more in the future, for the number of megacities (with over 8 million inhabitants) will be considerable – lays on us the obligation to address risk management in cities, particularly very large ones. How do sustainable development policies today take sufficient account of risks that threaten the planet's cities ? Indeed, many cities are exposed to natural hazards, and they represent potential sources for disaster as well as obstacles to progress towards sustainable development. The impact such hazards (floods, earthquake, storms, heat waves, ground movement...) have varies according to the specific vulnerability of the concerned cities. The level at which risk management is incorporated into urban policies for sustainable development is largely unequal according to whether the cities are located in wealthy or in developing countries. In this latter case, risks and crises are factors that aggravate pre-existing social and land-use inequalities. Conversely and for economic, technical and political reasons, cities in more affluent countries are better equipped to rebuild and in so doing to take measures to mitigate the impact of future events. Their resilience is considerable, yet even for them, although the direct impact of risks and crises may be fairly readily assessed and reduced, indirect impacts including economic losses, which are liable to emerge progressively over time, tend to increase the vulnerability of urban systems such as lifelines, integrated into ever more complex networks.*



# POINTS DE VUE

## Espace souterrain : une opportunité pour l'aménagement urbain

La lutte contre l'étalement urbain, la préservation d'un foncier de surface de plus en plus rare et coûteux, imposent d'engager une véritable réflexion sur l'aménagement urbain. Les espaces souterrains représentent une véritable opportunité pour les aménageurs et les urbanistes. Pas simplement pour enterrer des réseaux d'assainissement ou de transports mais aussi pour des équipements adaptés au grand public.

Trois acteurs de ce débat – le président d'une grande agglomération, le représentant d'un syndicat interdépartemental d'assainissement et un ingénieur de bureau d'études engagé dans un pôle de compétitivité - s'expriment sur cette même question : quelle opportunité pour l'aménagement urbain ?

Cave de tuffeau  
en Touraine.

A wine cellar in  
tuffeau in France's  
Touraine region.

© Fotolia





**CHARLES-ÉRIC LEMAIGNEN**

Président de la Communauté d'agglomération Orléans Val-de-Loire  
<http://www.agglo-orleans.fr/>



**Des sous-sols sous surveillance**

L'agglomération orléanaise se situe au cœur du système karstique dit du « Val d'Orléans » qui est le plus grand système noyé exploré en France. On y retrouve quatre grandes formations géologiques que sont le calcaire de Beauce, les sables et marnes de l'Orléanais, les sables et argiles de Sologne et enfin les alluvions anciennes. Le réseau hydrographique, outre la Loire, se caractérise par la présence d'étangs, mares, petits marais, mouillères, sources ou simplement des sols temporairement inondés.

Le sous-sol de l'agglomération peut se comparer à un véritable gruyère, fait de puits, de galeries, de caves et de carrières largement modelés par l'homme. Ces sous-sols se caractérisent également par des nappes phréatiques situées à faible profondeur et des natures de sols généralement meubles.

Toutes ces contraintes géologiques donnent lieu à une attention particulière lors des projets d'aménagement même si les procédures varient en fonction des secteurs concernés : Val-de-Loire, plateau nord ou sud Loire... À titre d'exemple, ces problématiques ont largement orienté le cours des chantiers de construction des deux nouvelles stations de traitement des eaux usées (STEP) menés par l'AggLO. La station de la Source se situe sur le cheminement souterrain des sources du Loiret en amont de sa source située dans le parc floral au sud du territoire. Sa construction a donc nécessité études et analyses des sols pour garantir la stabilité des fondations, avec à la clé un retard dans les travaux et un surcoût non négligeable. La STEP en construction à l'île Arrault a donné lieu à plusieurs vagues de sondages (fontis de diamètre allant jusqu'à 7 mètres), qui ont révélé des zones de terrains décomprimés importantes qui impliquent de renforcer la structure des ouvrages et le sous-sol.

Chaque opération amène son lot de surprises qu'il convient d'anticiper autant que faire se peut. Les spécificités du sous-sol du territoire de l'AggLO ont également été prises en compte dans « L'étude sur la vulnérabilité de l'AggLO face aux risques majeurs », un document de travail interne qui synthétise les problématiques des cavités souterraines, qu'elles soient d'origine naturelle (karst) ou artificielle (carrières, marnières), des mouvements de terrains dus au

retrait-gonflement des argiles, de l'érosion et de la remontée de nappes. Cette étude a permis à l'AggLO de détecter la fragilité de certains équipements et de proposer des solutions techniques (déplacements des réseaux électriques ou informatiques). L'objectif pour nous est simple : appréhender au plus près les contraintes géologiques pour garantir un développement du territoire en harmonie avec ses spécificités environnementales.



**AHMED MORCHID**

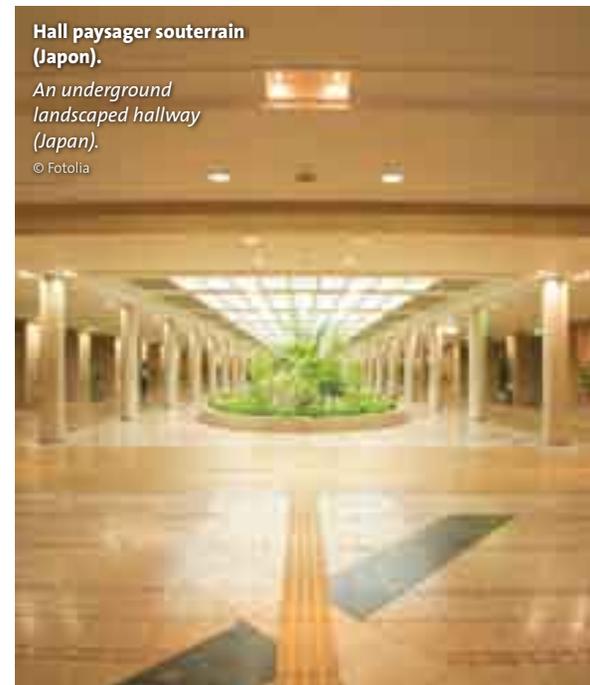
Pôle de compétitivité « ADVANCITY - Ville et mobilité durables »  
<http://www.advancity.eu/>  
 Directeur de projets, Groupe BURGÈAP  
[a.morchid@burgeap.fr](mailto:a.morchid@burgeap.fr)



**Il faut ouvrir le débat sur l'aménagement de l'espace souterrain**

Les aménageurs se sont rarement penchés sur la problématique de l'aménagement de l'espace souterrain dont les réalisations restent encore rares dans le monde. Mais cette absence d'intérêt résulte plus du poids des habitudes que de choix économiques ou environnementaux mûrement réfléchis.

Pourtant l'espace souterrain peut représenter une contribution importante à certains problèmes urbains où le foncier est de plus en plus rare et cher. L'utilisation du sous-sol peut aussi freiner l'expansion urbanistique spatiale, contribuer à protéger les espaces naturels, cacher des infrastructures inesthétiques et



Hall paysager souterrain (Japon).

An underground landscaped hallway (Japan).

© Fotolia

**TIMA, le tunnel de stockage des eaux de pluie du SIAAP. Construit dans Paris, sous la Seine, il a une capacité de stockage de 80 000 m<sup>3</sup> et a été mis en service en juin 2009.**

*TIMA, SIAAP's rainwater storage tunnel. Installed in Paris beneath the Seine River, with a storage capacity of 80,000 m<sup>3</sup>, it went into operation in June 2009.*

© SIAAP/Le Bar Floréal.



apporter d'importantes économies d'énergies. Il faut donc un nouvel état d'esprit et considérer que l'espace souterrain n'est pas voué qu'à accueillir canalisations, locaux de stockage ou d'entretien. On attend des urbanistes et aménageurs qu'ils fassent preuve d'autant d'imagination et d'ingéniosité pour le sous-sol que pour l'urbanisme vertical.

L'aménagement du sous-sol impacte naturellement l'urbanisme de surface et doit être mené en coordination complète. La ville est une mégastucture avec une tri-dimension spatiale et pas seulement verticale. C'est pourquoi les schémas d'urbanisme doivent à la fois intégrer la surface mais aussi le sous-sol.

L'espace souterrain est naturellement confronté à des contraintes : inondations, présence de nappes, des mines et carrières, etc. C'est pourquoi il importe de disposer d'études fiables, de banques de données, de cartographies, de diagnostics, d'études hydrogéologiques et géotechniques. Ces études doivent être préalables à tout nouvel aménagement pour aboutir à un véritable zonage de l'espace souterrain. L'aménagement de l'espace souterrain ne saurait stopper à lui seul l'étalement urbain ni résoudre les problèmes des grands ensembles urbains ; mais il peut être porteur de nombreuses solutions innovantes. C'est pourquoi il importe d'ouvrir rapidement un débat !



**GÉRARD MARY**

Directeur des grands travaux du SIAAP  
<http://www.siaap.fr/>  
[Gerard.MARY@siaap.fr](mailto:Gerard.MARY@siaap.fr)

**Utiliser les tréfonds pour les stockages faute de foncier disponible**

Le Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne (SIAAP) est chargé d'assurer le transport et l'épuration des eaux usées pour quatre départements franciliens et une trentaine de syndicats de la grande couronne. La problématique du sous-sol est importante, essentiellement pour les réseaux enterrés qui présentent un diamètre important comme pour notre station de Seine-aval où convergent cinq émissaires de quatre mètres. Nous sommes aussi confrontés à la nécessité de stocker des eaux de pluies excédentaires pour éviter de saturer les réseaux ou de déverser dans le milieu naturel avec des risques de pollutions, surtout en été quand le débit

de la Seine est faible et la température de l'eau plus importante. Ces stockages sont désormais réalisés par deux techniques : les bassins-enterrés et les tunnels-réservoirs. Nous venons de livrer le TIMA (tunnel Ivry-Masséna) enterré sous Paris et Ivry-sur-Seine avec une capacité de 80 000 m<sup>3</sup> sur 1,6 km de long et un diamètre de 6,70 mètres. L'autre technique est celle des bassins enterrés comme ceux situés sous le Stade de France, à Ivry et bientôt à Clichy. Au total, nous avons une capacité enterrée de 900 000 m<sup>3</sup> que nous voulons porter à 1,5 million d'ici à 10 ans. Ces travaux souterrains nous imposent de bien connaître le sous-sol et de réaliser de nombreux sondages de reconnaissance, en particulier pour éviter les couches de sables de Beauchamp. Avec des réservoirs ou des tunnels parfois enterrés de 35 mètres, nous devons aussi construire des puits de service avec des chantiers moins sales et moins contraignants. Nous projetons pour cela d'utiliser la technique de puits mécanisés par havage, un peu comme des tunneliers verticaux. Le stockage souterrain des eaux de ruissellement est naturellement une technique contraignante, mais elle va s'imposer dans les grandes agglomérations où les surfaces sont de plus en plus imperméabilisées et où le foncier est rare et donc coûteux.

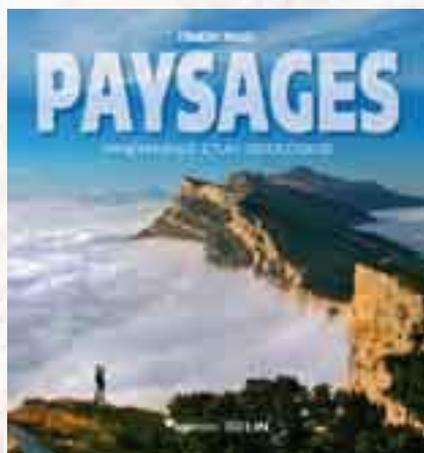
# Vient de paraître !

## La France sous nos pieds Atlas en 50 géocartes

Pour connaître l'organisation du sous-sol et mieux anticiper les enjeux de demain, cet Atlas grand public vous permettra de découvrir en 50 cartes les différents domaines des géosciences : géologie, énergie, eau souterraine, risques naturels...



128 pages – 30 x 30 cm – 28 € TTC



256 pages – 25 x 26 cm – 32 € TTC

## Paysages Itinéraires d'un géologue

L'auteur du *Tour de France d'un géologue* nous invite à voyager au cœur d'une multitude de paysages bouleversés par de grands phénomènes géologiques. Cette « encyclopédie visuelle » réunit à elle seule une extraordinaire diversité de paysages tant par leurs formes et leurs dimensions que par leurs palettes de couleurs.

## Minéraux remarquables de la collection UPMC-La Sorbonne

« *Les minéraux sont les étoiles du Monde inférieur* ». Paracelse.

C'est par cette citation que commence ce beau livre, dans lequel les minéraux sont traités comme des œuvres d'art.

La collection de minéraux de l'université

Pierre et Marie Curie-La Sorbonne est l'une des collections les plus réputées à travers le monde.



Coédition BRGM - Éditions Le Pommier  
252 pages – 30,5 x 32,5 cm – 69 € TTC

### Pour commander :

BRGM Éditions  
3, av. Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 Orléans cedex 2  
fax : (33) 2 38 64 36 82

[www.brgm.fr/editions.jsp](http://www.brgm.fr/editions.jsp)



# chiffres clés

106

CHIFFRES CLÉS

▲  
**São Paulo (Brésil).**  
*São Paulo (Brazil).*  
© PhotoDisc

## Concentration progressive des populations dans les villes

- ▶ Dans les **années 1950, 30 %** de la population mondiale était **urbaine**.
- ▶ En **2008, 3,3 milliards** de personnes vivaient dans les **villes**, soit à peu près **50 %** de la population mondiale.
- ▶ D'ici **2030**, près de **5 milliards** de personnes, soit **60 %** de la **population mondiale**, vivront dans les **villes**.

- ▶ La **croissance des villes** sera, au cours des 3 décennies à venir, d'une ampleur sans précédent dans le monde en développement. Le phénomène sera particulièrement frappant en Afrique et en Asie où la **population urbaine doublera**.

- ▶ De ce fait, **d'ici 2030**, les **villes du monde en développement** abriteront **81 %** de la **population urbaine** de la planète.

- ▶ On compte aujourd'hui :
  - **30 km<sup>2</sup>** de ville souterraine sous **Pékin**, où **90 km<sup>2</sup>** sont prévus en **2020**.
  - À **Montréal**, **40 km<sup>2</sup>** d'espaces souterrains s'échelonnent sur **3 niveaux** (centres commerciaux, bureaux).

## Consommation d'eau

- ▶ Une ville européenne d'**un million d'habitants** consomme chaque jour **320 000 tonnes d'eau** et rejette, parallèlement, **300 000 tonnes** d'eaux usées (EEA, 1995).

## Assainissement

- ▶ Le seul **réseau d'assainissement** occupe **2 m<sup>3</sup>** de **sous-sol urbain par habitant** dans les pays industrialisés [Barles et Guillaume (1995)].

## Matériaux

► Dans les villes européennes, on estime à **300 tonnes** la quantité de **matériaux utilisés** pour bâtir les infrastructures nécessaires à **chaque nouveau citoyen**.

► Les matériaux de construction représentent plus de **50 % du tonnage** des marchandises transportées en France ; leur **distance moyenne d'acheminement** est très courte (**34 km**).

► L'**agglomération parisienne** consomme chaque année **50 millions de tonnes de granulats**.

## Déchets ménagers et déchets de démolition

► Production moyenne européenne = **500 kg par personne et par an** respectivement. Ces derniers sont utilisés dans les terrassements et la construction.

## Friches industrielles

En Île-de-France, **20 % des friches industrielles** de la première couronne sont polluées et **70 % des emprises foncières disponibles** nécessitent d'être traitées.

## Voirie

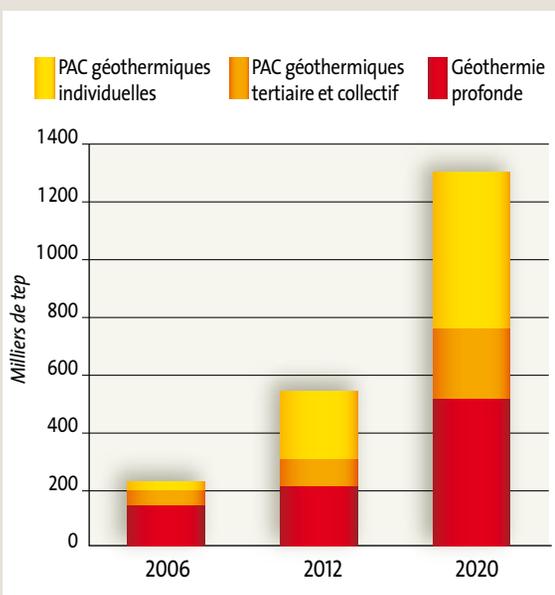
► À Paris, pour **1 350 km de voirie**, on compte **15 000 ouvertures** de la chaussée par an. À Honk Kong, ce sont **25 000 ouvertures** pour **1 400 km** [Berosh M. in EUS (1995)].

## La géothermie dans la ville

► Le nombre de **pompes à chaleur géothermiques** installées en Europe a dépassé **un million**. Le **marché annuel** est supérieur à **100 000 unités**.

► **29 réseaux de chaleur** sont alimentés par géothermie profonde dans le Bassin parisien et permettent de chauffer plus de **150 000 équivalents logements**. En 2013, **30 000 nouveaux logements** seront chauffés par la géothermie.

### Zoom sur la géothermie – Objectifs pour la France



## Quelques chiffres français pour mesurer l'importance des travaux en sous-sol :

► **850 000 km** de canalisations d'eau potable.

► **350 000 km** de réseaux électriques et de télécommunications.

► **250 000 km** de canalisations d'assainissement.

► **35 000 km** de canalisations de transport de gaz.

► **185 000 km** de canalisations de distribution de gaz.

► Taux annuel de renouvellement des réseaux souterrains inférieur à **2 %**.

► Coût des travaux de renouvellement de l'ordre d'**un milliard d'euros par an**.

► Coût des dommages annuels de l'ordre de la **dizaine de millions d'euros** pour les seuls dommages matériels.

# brèves

## DeepCity3D

### Visualisation 3D intégrée du sol et du sous-sol de la ville

Le BRGM, en collaboration avec l'institut allemand Fraunhofer IGD et la mairie de Toulouse, vient de lancer le projet DeepCity3D pour développer des outils de visualisation 3D du sol et du sous-sol. Ces outils intègrent pour la première fois les données du sous-sol et de modèles urbains avec des fonctionnalités avancées pour la prise de décision dans l'aménagement urbain, le bâtiment ou la protection de l'environnement.



Pour les professionnels, la localisation des infrastructures enterrées représente une information cruciale pour la gestion des réseaux et des urgences. Sur ces sujets, peu de recherches ont été menées pour déterminer le meilleur moyen de partager ces connaissances entre scientifiques, gestionnaires et citoyens. Le projet veut donc développer une plate-forme innovante pour leur permettre une participation aux prises de décision.

<http://www.deepcity3D.eu>

## D<sup>2</sup>SOU

### Des outils pour la connaissance du sous-sol

En cours de démarrage, le projet D<sup>2</sup>SOU pour « Développement Durable et Sols Urbains » est labellisé par le pôle ADVANCITY et soutenu par l'Agence nationale de recherche (ANR). Ce projet veut développer les bases nécessaires à la prise en compte intégrée du sol et du sous-sol dans le développement urbain en temps que composante du développement durable. À partir de l'analyse des critères de soutenabilité à différentes échelles, il vise à établir une architecture organisant les indicateurs pertinents. Le croisement avec les indicateurs déjà identifiés ainsi qu'avec les méthodes et outils de connaissance du sous-sol doit aboutir à un modèle conceptuel permettant la représentation de la problématique du sous-sol vis-à-vis des différents types de projet

d'urbanisme. Le projet D<sup>2</sup>SOU se traduira par le développement d'outils qualitatif et quantitatif d'aide à la délibération et à la décision qui seront expérimentés sur deux sites tests : l'axe Bordeaux-Pessac-Arcachon et Achères en région parisienne.

## Géothermie

### Projet géothermique dans la ville chinoise de Yanqing

CFG Services, filiale du BRGM, a mené en 2006 avec l'appui de l'ADEME une première analyse du potentiel géothermique de Yanqing à 60 km de Beijing. Les travaux se poursuivent actuellement dans le cadre d'un Fasep-études signé en 2008 et mené en collaboration avec Dalkia. Yanqing est installée au sein d'un bassin tectonique avec un réservoir géothermique constitué par des dolomies karstifiées et fracturées de la formation du Jixian dont le toit se situe entre 1 300 et 1 700 mètres de profondeur. Cinq forages ont déjà été réalisés par les autorités chinoises avec des températures de production comprises entre 53 et 71 °C. L'étude actuelle porte sur deux zones qui accueilleront



400 000 et 900 000 m<sup>2</sup> de bâtiments à chauffer, nécessitant 5 à 6 doublets géothermiques. Le recours à la géothermie devrait s'étendre à toute la ville en substitution au charbon.

## Risque sismique

### Analyse et réduction du risque sismique dans quatre capitales provinciales en Iran

Durant le dernier siècle, plus de 180 000 Iraniens sont morts lors des séismes majeurs, bilan qui s'explique par la fragilité du parc immobilier, les difficultés liées à l'organisation des secours, la conscience et la formation des secours d'urgence et l'organisation de la sécu-



© BRGM im@gé - T. Winter

rité civile. Le doublement de la population iranienne au cours des 25 dernières années, l'exode rural et l'expansion des villes laissent entrevoir des bilans plus dramatiques encore dans les prochaines décennies. C'est pourquoi, la Banque mondiale finance depuis 2007 un projet visant à évaluer le risque sismique de quatre capitales provinciales (Kermanshah, Qazvin, Zanjan et Hamadan) et à développer un plan d'action sur 30 ans afin de réduire ce risque de manière significative. Ce travail est conduit par le BRGM avec son partenaire iranien (bureau d'ingénierie Daryakhakpay) sur la base du développement de scénarios sismiques.

# Découvrez toute la collection

# géo**sciences**

LA REVUE DU BRGM POUR UNE TERRE DURABLE

## Déjà parus...



**N° 1 – Ressources minérales et développement durable**  
janvier 2005 – 80 pages



**N° 2 – L'eau souterraine**  
septembre 2005 – 94 pages



**N° 3 – Le changement climatique**  
mars 2006 – 112 pages



**N° 4 – Les risques telluriques**  
septembre 2006 – 96 pages



**N° 5 – Géosciences et santé**  
mars 2007 – 116 pages



**N° 6 – Terre virtuelle : les systèmes d'information géoscientifique**  
octobre 2007 – 120 pages



**N° 7/8 – Découvrir le patrimoine géologique de la France**  
mars 2008 – 252 pages



**N° 9 – Terre active, Terre en mouvement : les systèmes d'observation d'une Terre dynamique**  
avril 2009 – 121 pages



**N°10 – Villes et géologie urbaine**  
décembre 2009 – 108 pages

## ...et bientôt

**N°11 – Les frontières géologie – biologie**  
À paraître juin 2010

**N° 12 – La Loire**  
À paraître décembre 2010

Tous les numéros peuvent être consultés sur notre site [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

Abonnez-vous à **Géosciences**

- ▶ Par courrier en commandant la version imprimée (numéros 5 à 10 uniquement) au prix de 8 € le numéro
  - sur notre site internet [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)
  - en écrivant à :  
**BRGM** – Direction de la communication et des éditions  
Revue *Géosciences* – 3, avenue Claude-Guillemin  
45060 Orléans cedex 2
- ▶ Par mail, recevez gratuitement la version électronique en vous inscrivant sur : [communication@brgm.fr](mailto:communication@brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



prochain numéro ► été 2010

# Les frontières géologie-biologie

*Activité des cyanobactéries  
visible dans une source  
hydrothermale –  
Yellowstone, USA.*

*Activity of cyanobacteria  
visible in a hydrothermal  
spring in Yellowstone  
National Park (USA).*

© BRGM Im@gé. V. Laperche

Abonnez-vous à *Géosciences* sur notre site Internet : [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)



**Siège**  
Tour Mirabeau, 39-43 quai André-Citroën  
75739 Paris Cedex 15 - France  
Tél. : (33) 1 40 58 89 00 - Fax : (33) 1 40 58 89 33

**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemin - BP 36009  
45060 Orléans Cedex 2 - France  
Tél. : (33) 2 38 64 34 34 - Fax : (33) 2 38 64 35 18

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

