



► AVRIL 2018



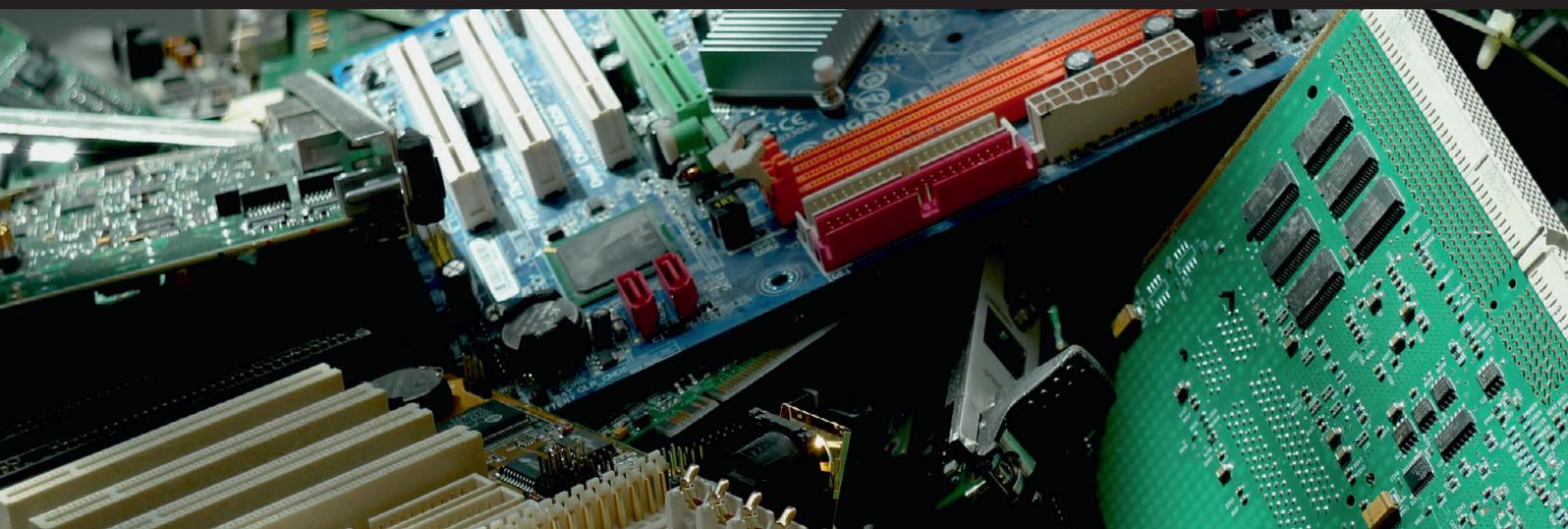
DOSSIER ENJEUX DES GÉOSCIENCES

ÉCONOMIE CIRCULAIRE



Geosciences pour une Terre durable

brgm



Déchets électroniques et
électriques © BRGM

1. L'économie circulaire, un nouveau défi pour les géosciences

Parce qu'elle met en jeu un ensemble de processus, depuis la connaissance des sources et flux de matières jusqu'à l'élaboration de procédés de valorisation, l'économie circulaire est au cœur de l'expertise des géosciences. Le BRGM en est aujourd'hui l'un des acteurs scientifiques et techniques majeurs, aux échelles française et européenne.

CONTACT PRESSE

Alice Chaumerat
Tél. 02 38 64 48 47
Port. 06 84 27 94 14
presse@brgm.fr

Face aux changements globaux (changement climatique, croissance démographique, élévation des standards de vie...) et à la pression considérable qu'ils engendrent sur les ressources et l'environnement, le développement de l'économie circulaire n'est plus un choix mais une nécessité. Il convient aujourd'hui de substituer au modèle linéaire consistant à extraire, fabriquer, consommer puis jeter, un modèle circulaire, où les produits appréhendés en tant que flux de matières et d'énergies sont réinjectés dans des boucles vertueuses successives.

Cela suppose le développement d'un système de production et d'échanges prenant en compte, dès leur conception, la durabilité et le recyclage des produits ou de leurs composants afin qu'ils puissent être réutilisés ou redevenir des matières premières, avec pour bénéfiques une réduction du volume de déchets, la préservation des ressources naturelles et de moindres consommations énergétiques.

QUELQUES CHIFFRES*

345 Mt de déchets produits.

17 Mt de matériaux recyclés (hors bois et granulats).

14,4 Mt de déchets non-dangereux incinérés avec récupération d'énergie.

18 Mt de déchets non-valorisables envoyés dans des installations de stockage.

21 Mt d'émissions de CO₂ évitées par le recyclage.

*Chiffres annuels, France / Source Ademe (Déchets chiffres-clés, édition 2016).



De l'observation à l'action

Fort de son expertise minière «historique», le BRGM s'est engagé très tôt dans la voie d'une utilisation plus efficiente des ressources, l'un des piliers de l'économie circulaire, en y transposant ses savoir-faire. Sa recherche est aujourd'hui clairement positionnée pour accompagner l'Etat, les collectivités et les entreprises.

Il a ainsi apporté son concours à l'élaboration de la feuille de route pour l'économie circulaire portée par le ministère de la Transition Écologique et Solidaire. Coordinateur et/ou partie prenante de projets français et européens d'intelligence minérale (voir «Métaux»), le BRGM couvre un large champ d'intervention, depuis l'aide à la priorisation des enjeux (sur la criticité de certains métaux, par exemple) jusqu'à la mise au point de procédés de valorisation, en passant par la caractérisation des ressources (primaires et secondaires) ou encore l'étude des flux de matières dans l'économie à différentes échelles territoriales, grâce au développement de méthodologies spécifiques.

Il mobilise pour ce faire les moyens scientifiques et techniques de ses laboratoires et plateformes d'expérimentation (voir «Plat'Inn»), pour élaborer des éco-procédés visant l'optimisation du traitement (notamment de préparation de la matière, en vue du recyclage), de sédiments, déchets du BTP, déchets miniers, déchets d'équipements électriques et électroniques... ; des technologies de valorisation de rupture dont l'impact économique et environne-

mental est systématiquement évalué (voir «Mine urbaine»). Pour d'évidentes considérations éthiques et environnementales, la traçabilité des matériaux est un autre volet des travaux du BRGM, par des approches analytiques multi-outils (minéralogie, chimie, isotopie) qui permettent d'identifier la signature et donc la source de tout matériau ou métal.

Rapprocher économie circulaire et transition énergétique

Les perspectives sont encore nombreuses. Un renforcement des recherches s'impose désormais pour la conception de procédés optimisant la préparation des matériaux en amont de la séparation de leurs composants recyclables, avec à la clé un gain énergétique et une facilitation des étapes ultérieures. De nouvelles initiatives devront également être prises pour augmenter la part des matériaux recyclés pour fabriquer de nouveaux produits, notamment pour les déchets du BTP. Un fort enjeu, enfin, est celui du rapprochement entre l'économie circulaire et la transition énergétique. La mise en place des énergies vertes, voraces en aciers, terres rares... devra intégrer un pourcentage de matériaux recyclés, en complément de ressources naturelles pour lesquelles de nouvelles explorations restent à mener (voir «Métaux»).

QUESTIONS DE VOCABULAIRE*

Déchet : toute substance ou objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire.

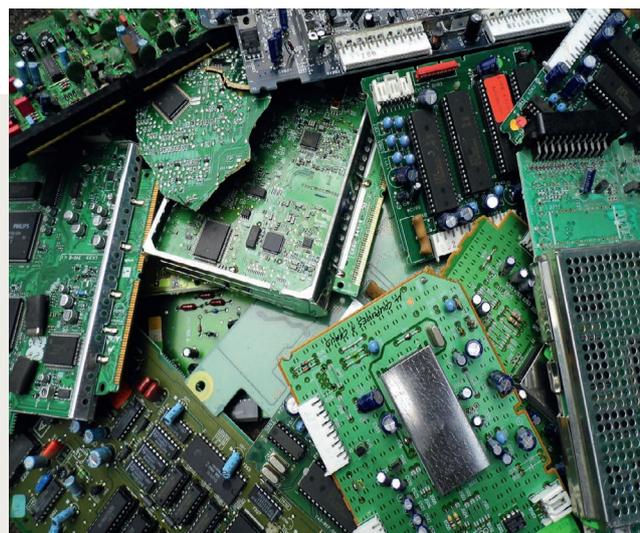
Réemploi : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus.

Réutilisation : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau.

Recyclage : toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins.

Valorisation : toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière.

* Selon le Code de l'environnement, Article L541-1-1 (extraits).



Les déchets électroniques et électriques : un gisement de métaux et de terres rares. © BRGM





2. Métaux : combiner recyclage et recherche de nouvelles ressources

Même en atteignant l'objectif (théorique) de 100 % de recyclage, il ne sera pas possible de faire face à la croissance régulière des besoins en métaux. La connaissance des filières et l'optimisation des procédés de valorisation des déchets métalliques doit aujourd'hui s'accompagner de la recherche de nouvelles ressources.

La demande en métaux «structurels» (fer, cuivre, zinc, aluminium...), connaît depuis vingt ans une croissance annuelle de 2 à 4 %. Et avec l'avènement des nouvelles technologies de l'énergie et de la communication, d'autres métaux font désormais l'objet d'une forte demande : cobalt et lithium (batteries), terres rares (aimants permanents, lampes basse consommation), silicium (panneaux solaires)...

En Europe, où 30 millions d'emplois sont liés aux matières premières minérales, la dépendance vis à vis de pays producteurs tels la Chine, l'Afrique du Sud, le Brésil..., facteur de tensions, de spéculation et de volatilité des prix, a amené l'UE à se doter en 2008 du dispositif «Initiative matières premières», relayé en France par un Comité pour les métaux stratégiques doté d'un plan d'action dont le BRGM est partie prenante. Le programme-cadre européen de recherche et développement «Horizon 2020 - 2014/2020» comporte également un volet «Economie circulaire», qui vise une forte augmentation de la part du recyclage dans les approvisionnements, afin de réduire la dépendance de l'UE et de limiter l'impact environnemental de ses activités.

Intelligence minérale et procédés

Opérant une veille mondiale sur les matières minérales (base de données BE3M / Mineralinfo), le BRGM est au premier rang des recherches sur la connaissance des flux et stocks des métaux à enjeux à l'échelle française (MFA : Material Flow Analysis et TES tables entrée/sortie) afin d'apporter aux pouvoirs publics des éléments de compréhension, d'analyse et de suivi. Cette intelligence minérale

s'exprime également à l'échelle européenne, avec les projets Mica (plateforme des fiches méthodologiques, depuis la prospection jusqu'au recyclage des matières minérales), Forwast (cartographie des flux et stocks de européens de métaux), Promine (cartographie des ressources secondaires : déchets miniers...) ou encore Prosum (base données métaux stratégiques à partir de trois types de produits et déchets associés : véhicules, DEEE, batteries).

C'est aussi avec le développement de procédés innovants de valorisation des déchets (voir «Mine urbaine») que le BRGM exploite les géosciences au profit de l'économie circulaire.

Mais quelles que soient les performances du recyclage, le besoin en matières premières primaires demeure, imposant de lancer de nouvelles prospections. C'est en ce sens que le BRGM, porteur à l'international du concept de «mine responsable», développe de nouvelles méthodes d'exploration et de traitement, moins intrusives et plus respectueuses de l'environnement.

17,5

MILLIONS DE TONNES

C'est la production française annuelle d'acier et de fonte. Les métaux issus du recyclage y entrent pour 51%.



3. Terres excavées : un enjeu foncier et environnemental

La gestion des terres excavées est au confluent d'enjeux fonciers, notamment dans les agglomérations, et environnementaux, car elles peuvent être dégradées. De la caractérisation des sols jusqu'à leur réutilisation, les géosciences accompagnent aménageurs et pouvoirs publics.

En remblais, sous-couches routières, buttes paysagères... la valorisation des terres excavées est une alternative à l'utilisation de matériaux de carrières. Très encadrée par la réglementation, elle requiert plusieurs étapes : caractérisation (notamment chimique), dépollution éventuelle, détermination des usages ultérieurs, traçabilité... afin de garantir une totale sécurité du processus.

Le BRGM possède une expertise reconnue, grâce à des travaux sur les meilleures stratégies de requalification de sols (projet Reffrind), la géochimie du sous-sol, le comportement des polluants et leurs modes de transfert, ainsi que les procédés in situ de dépollution. C'est le cas des récents projets Geotex (technique d'épuration mécanique de la couche

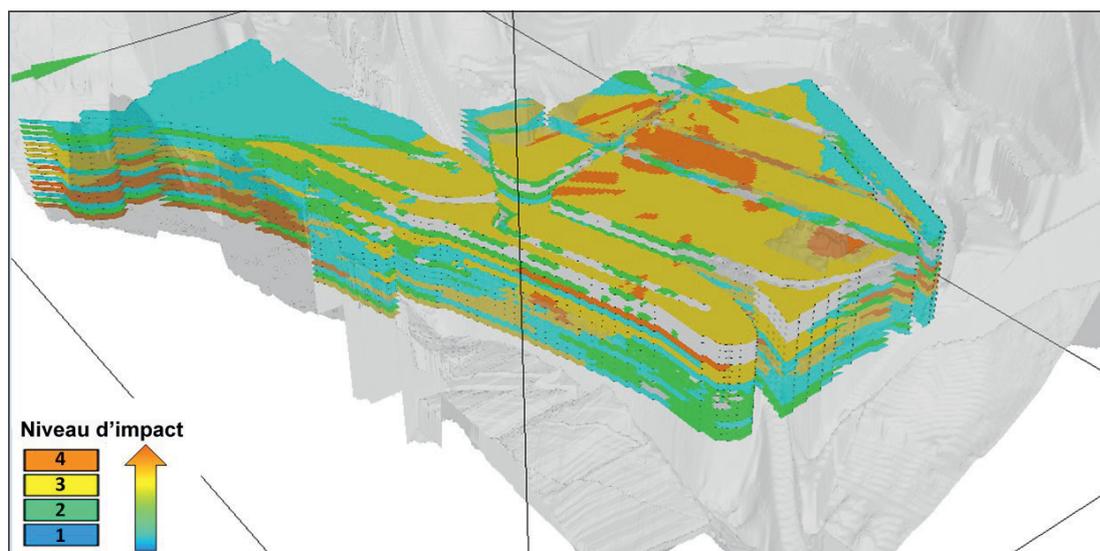


Gravats issus de la déconstruction de bâtiment en attente de concassage et de criblage avant valorisation en sous-couche routière. © BRGM - P.Bataillard



Plateforme de bioremédiation des terres avant valorisation dans le cadre du réaménagement d'une ancienne friche industrielle. © BRGM - P.Bataillard

supérieure de sols pollués par des solvants organiques) ou Silphes (dépollution de sols contaminés par des solvants chlorés via l'injection d'un réactif et d'une mousse optimisant la circulation du flux). D'autres procédés, biotechnologiques, utilisent les capacités épuratrices de consortiums de bactéries. D'autres encore (Siterre, Agrege) portent sur la reconstruction de sols fertiles («technosols») à partir de déchets urbains valorisés. Tous sont associés à des méthodes d'analyse des risques sanitaires et écologiques liés aux opérations effectuées.



**Cartographie 3D
de la qualité chimique des
sols du site de Micheville
(Lorraine).** © BRGM

Aux côtés des pouvoirs publics

Rédacteur avec l'Inéris et le MTES d'un «Guide méthodologique de gestion des terres excavées» (nouvelle édition 2017), le BRGM s'est vu confier par l'État l'élaboration de la plateforme interactive Terrass. Bancarisant les données relatives aux terres excavées (origine, qualité et quantité de matériaux, usages, modalités de transport et de réutilisation...) elle rapproche, via une «Bourse aux terres», sites producteurs et sites receveurs. Le BRGM intervient également aux côtés des collectivités. Il a réalisé à Nantes (1 million de m² constructibles d'ici 2030 sur «l'île de Nantes»), un état des lieux du sous-sol : typologie des terres selon leur qualité chimique, volumes par type de matériaux..., prélude à un schéma de gestion globale facilitant la réaffectation des terres excavées en fonction des travaux prévus. Une démarche similaire a été conduite sur la friche sidérurgique de Micheville (Lorraine), où le BRGM a produit des outils (cartographies 3D, tableaux Excel) permettant d'estimer le gisement des terres potentiellement réutilisables.



Exemple de création d'une offre de terres réutilisables à partir de la fiche d'un site d'excavation et recherche de demandes de terres compatibles via la «Bourse aux terres» en ligne : <http://terrass.brgm.fr/> © BRGM / MEDDE

LES SÉDIMENTS : UN ENJEU DE VALORISATION

Rejetés en mer ou mis en décharge, les 50 millions de m³/an de sédiments retirés des ports, canaux et fleuves ont généralement, comme les terres excavées, le statut de déchets. Leurs caractéristiques minéralogiques et granulométriques sont également très similaires, plaçant pour leur valorisation selon des scénarios identiques.

Guide méthodologique de gestion, projets de caractérisation (Ceamas), de valorisation à terre (Vaise), de suivi temporel du comportement des contaminants (Castor), de traitement (Axelera, pour les sédiments du Rhône pollués au PCB)... sont autant de travaux du BRGM sur ces différentes questions.



4. Mine urbaine : les nouveaux gisements de matières valorisables

Déchets du BTP, ménagers, d'équipements électriques et électroniques... la mine urbaine est un formidable gisement en matériaux et métaux. Transposant son expertise minière et en intelligence minérale, le BRGM développe des outils d'évaluation, de caractérisation et de valorisation de ces ressources en vue de leur réintégration dans le circuit économique à l'échelle locale ou européenne.

Le BRGM a consacré de nombreux travaux à la mine urbaine (projets Forwast, Asuret, Extrade, Cofrage...). De l'évaluation des gisements à l'appréhension des flux matières, il a développé une connaissance globale du cycle des ressources disponibles.

Des outils et méthodes permettant de valider la démarche d'économie circulaire, en incluant la dimension environnementale, ont également été élaborés. C'est le cas avec les projets Cleanwast et Espeer, outils de cartographie des flux et stocks de matières et d'évaluation économique et environnementale des filières de gestion des déchets, afin d'en mesurer les bénéfices ou les impacts négatifs.

Outre cette expertise, largement mise à profit dans l'accompagnement des politiques publiques, le BRGM conduit des recherches visant la mise au



Projets de recherche pour le recyclage des déchets industriels et le développement de procédés innovants en économie circulaire, halle pilote expérimentale du BRGM. © BRGM - P. d'Armancourt



Station mobile de concassage des bétons de démolition destinés à être recyclés dans le cadre du projet Cofrage (2011).

© BRGM

point de méthodologies de gestion et de procédés de valorisation de la mine urbaine à différentes échelles : locale, en particulier pour les filières non-métalliques (déchets à faible valeur économique et dont la valorisation répond principalement à des enjeux locaux : déchets du BTP, terres excavées), et à l'échelle française, voire européenne, pour les métaux, porteurs d'une forte valeur ajoutée.



PROJETS ET PROCÉDÉS

AGREGA : ressources en granulats

Projet ANR (PIA), Agrega vise à anticiper la répartition géographique des besoins en granulats d'ici 2040, pour l'implantation des futures carrières et centres de recyclage. Un outil de simulation a été développé pour planifier les enjeux régionaux en granulats terrestres, secondaires et marins.

COFRAGE ET HISER : déchets de béton

Cofrage (Projet ANR Ecotech) est un procédé de libération sélective des constituants du béton, pâte de ciment hydratée, sables et granulats, via deux techniques : le chauffage par micro-ondes et l'utilisation de puissances électriques pulsées. Avec le projet européen H 2020 Hiser, la technique d'électro-fragmentation a été adaptée pour libérer des matériaux plus complexes (bétons fibrés).

VALOPLUS : poudres lumineuses

Les poudres lumineuses des ampoules basse-consommation contiennent des composés minéraux (yttrium, terbium, europium) rares et coûteux. Valoplus combine plusieurs procédés (densimétriques, magnétiques, par flottation ou par extraction liquide-liquide) pour les séparer des déchets associés.

EXTRADE : terres rares des aimants permanents

Les aimants permanents des disques durs, hauts-parleurs, petits moteurs électriques... contiennent de nombreuses terres rares. Extrade (projet ANR) est un procédé de récupération sélective des aimants et d'extraction des TR fondé sur des techniques séparatives physico-chimiques novatrices.



Dans le cadre du programme d'investissements d'avenir, le BRGM participe au projet AGREGA, pour l'anticipation et la gestion régionale des ressources en granulats (Orléans, 2017). © BRGM

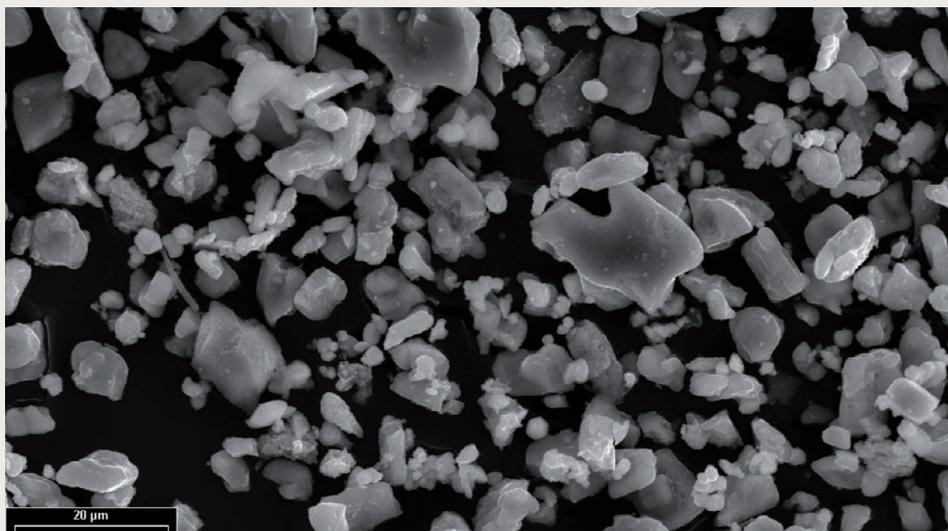


Photo d'une poudre de luminophores mélangés, prise au microscope électronique à balayage (MEB), échelle 20 μm .

© BRGM





Test de traçage effectué sur le site d'Agon-Coutainville (projet Aquanes) en Normandie afin d'estimer les caractéristiques hydrodynamiques et épuratoire du sol.

© BRGM - M. Pettenati

5. Eaux usées : de nouvelles ressources à valoriser

Le changement climatique et les pressions croissantes sur les ressources en eau font craindre des pénuries ou des dégradations de la qualité des eaux qui, localement, pourraient être dramatiques. De nouvelles approches de gestion sont à développer, en particulier la réutilisation des eaux usées traitées.*

En 2050, la modification du régime des pluies, la multiplication des épisodes caniculaires et des sécheresses, combinés à la surexploitation et à la pollution des ressources pourraient impacter 5 milliards de terriens. Toutes les parties du monde ne seront pas égales devant les pénuries, mais toutes seront touchées**.

Développer des approches vertueuses est une urgence : adaptation des cultures, des process industriels, usage optimisé de l'eau domestique, protection des ressources... L'une des voies qui mobilise les équipes du BRGM est celle de la recharge artificielle des nappes souterraines par la réutilisation des eaux en sortie de stations d'épuration (STEU) en utilisant les capacités épuratoires du sol pour parachever leur traitement ; un principe qui peut s'appliquer également aux eaux pluviales et eaux de surface.

Vue du stockage des résidus de traitement des eaux usées du site de La Combe du Saut. © L. Mignaux - MEDDE



EN FRANCE, PRÈS DE...

21500 stations de traitement des eaux usées rejettent chaque année après traitement plus de **4 milliards de m³ d'eau** dans les fleuves et rivières, dont environ **0,1% sont réutilisés** essentiellement pour l'irrigation agricole et l'arrosage de golfs.



Optimiser l'épuration naturelle

La réinjection souterraine permettrait de soustraire de considérables quantités d'eau à l'évaporation et au déversement à l'océan, exutoire des fleuves où les eaux traitées sont généralement rejetées.

Cela suppose de prendre en compte plusieurs facteurs, et d'abord l'hétérogénéité des sols et sous-sols et de leurs potentiels épuratoires. Il faut en effet réunir les conditions d'une barrière réactive efficace pour rabattre les teneurs résiduelles en métaux, micro-organismes, polluants organiques et émergents avant que ces eaux ne réalimentent les nappes.

C'était l'objet des projets Regal (Recharge artificielle et gestion active des nappes littorales, volet Reuse) et Actisol (Ecotechnologie de recharge artificielle de nappes par les eaux usées) conduits par Veolia (VERI) avec le BRGM, pour mieux comprendre les phénomènes à l'œuvre dans la zone non saturée (pression, température, perméabilité, activité bactérienne, cycles chimiques et biochimiques, transferts de polluants...) avec des tests à l'échelle du pilote de barrières minérales offrant les performances recherchées.

C'était aussi l'objet du projet MicroReuse à La Réunion dont les résultats ont amené une réduction des micropolluants en sortie de station d'épuration. Par ailleurs, le projet FRAME (Water JPI) a permis de fournir un outil d'aide à la décision pour la planification des installations de réutilisation de l'eau usée traitée pour l'eau potable.

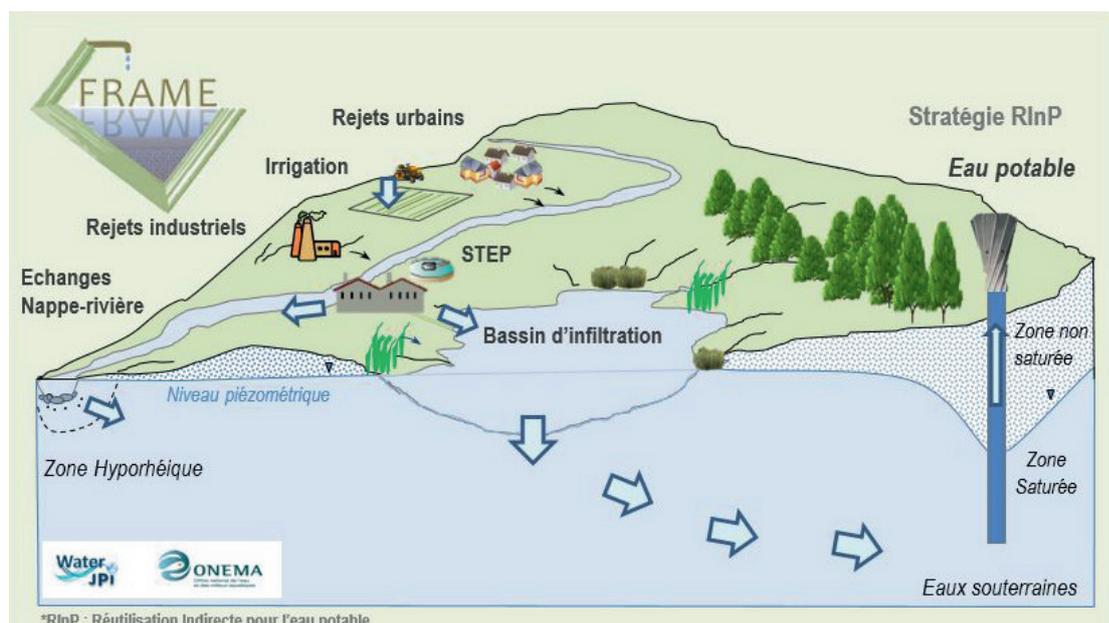


Le pilote RE-USE (projet Regal) contient une colonne de sol à travers laquelle est injectée de l'eau d'une station d'épuration. Ce réacteur permet d'étudier le pouvoir d'épuration des sols (2009). © BRGM - J. Casanova

Enfin, le BRGM est également impliqué dans le projet européen Aquanes (H 2020), qui propose une approche combinant les capacités naturelles du sol et du sous sol et leur enrichissement pour optimiser le processus, voire un pré-traitement avant réinjection (filtration, traitement à l'ozone...) par infiltration indirecte. Pilotant un démonstrateur en Normandie (Agon-Coutainville), le BRGM y déploie son expertise en matière hydrogéologique et dans la modélisation numérique des processus (transport réactif) avec, en perspective, la finalisation d'une solution susceptible d'intégrer l'échelle industrielle.

** Aujourd'hui, seuls l'irrigation agricole et l'arrosage d'espaces verts sont autorisés ; les projets de recharge de nappes sont étudiés au cas par cas par les autorités sanitaires et environnementales.*

*** Forum Mondial de l'Eau, Brasilia - 2018.*



*RInP : Réutilisation Indirecte pour l'eau potable

Description schématique d'un système de réutilisation des eaux usées.

©BRGM M.Pettenati



6. Plateforme Plat'Inn : entre le laboratoire et l'échelle industrielle

Avec Plat'Inn, sa nouvelle plateforme de développement technologique, le BRGM renforce ses capacités expérimentales au service de l'économie circulaire et des écotechnologies. Chaînon intermédiaire entre la recherche et l'application, ce nouvel outil est notamment destiné aux PME-PMI et aux programmes de RDI (Recherche, Développement, Innovation) des grands donneurs d'ordre du secteur.

Avec Plat'Inn, sa nouvelle plateforme de développement technologique, le BRGM renforce ses capacités expérimentales au service de l'économie circulaire et des écotechnologies.

Chaînon intermédiaire entre la recherche et l'application, ce nouvel outil est notamment destiné aux PME-PMI et aux programmes de RDI (Recherche, Développement, Innovation) des grands donneurs d'ordre du secteur.

Plat'Inn cible le développement d'éco-technologies pour le traitement des ressources minérales primaires et secondaires et le recyclage des déchets, avec des capacités de quelques dizaines de kilos à près de 5 tonnes, soit l'échelle pilote ou semi-industrielle, étape ultime avant l'industrialisation des procédés mis au point.

Fruit du redéploiement et du renforcement, sur 1000 m², des moyens expérimentaux de la Halle pilote du BRGM, la plateforme a bénéficié de 2M d'investissements - soutenus par la Région Centre-Val de Loire et Orléans Métropole - qui lui ont permis de se doter d'équipements de dernière génération pour le traitement/valorisation de la matière.

Selfrag, matériel de diffraction par champ magnétique disponible au sein de la plateforme Plat'Inn du BRGM sur les matières premières et l'économie circulaire.

© BRGM - C. Boucley





Installation pilote de traitement par biolixiviation destinée à extraire les métaux contenus dans les minerais sulfurés par biohydrométallurgie.

© BRGM - Y. Ménard

Une trentaine de projets en cours

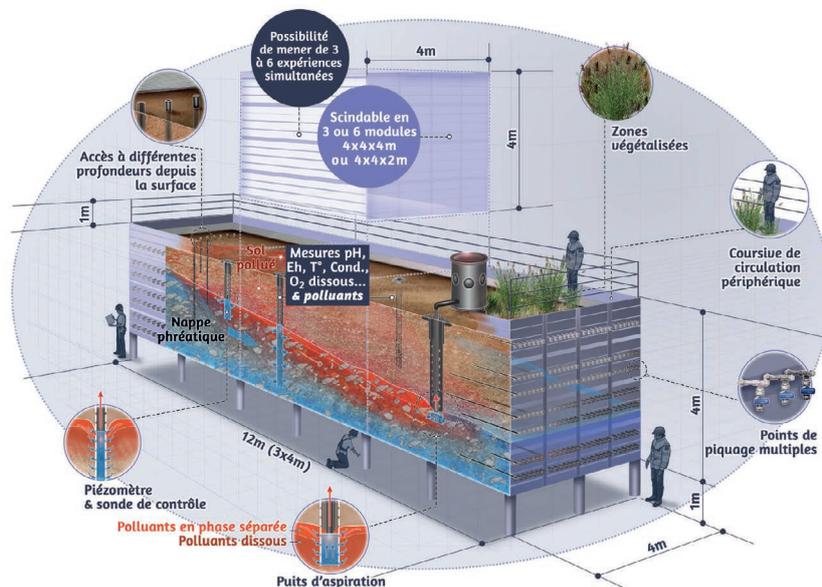
Plat'Inn intègre différents outils multi-échelle de minéralurgie/métallurgie (concassage/broyage, déchetage, échantillonnage, tri physico-chimique, traitement thermique, traitement hydrométallurgique) permettant des traitements en voie humide et en voie sèche. La plateforme vise également le renforcement des domaines d'excellence du BRGM que sont aujourd'hui la biolixiviation

(extraction de métaux par des méthodes biologiques), l'électro-fragmentation ou les micro-ondes (fragilisation de la matière et séparation sélective) et la flottation (concentration). Elle dispose, enfin, d'outils de modélisation des procédés et d'évaluation environnementale (ACV : analyse du cycle de vie).

Une trentaine de projets sont actuellement conduits au sein de ce véritable «laboratoire-usine». Ils résultent des programmes de recherche et d'expérimentation propres au BRGM, de projets de RDI collaborative français (ANR) ou européens (Horizon 2020), et de nombreux partenariats industriels. Ces projets s'intéressent plus spécifiquement à la valorisation des déchets miniers et industriels, des déchets de la déconstruction urbaine et des déchets de produits en fin de vie, comme les équipements électriques et électroniques (DEEE).

TROIS PLATEFORMES POUR L'INNOVATION

Mobilisant les géosciences sur des thèmes porteurs d'enjeux et à fort potentiel d'innovation, Plat'Inn (économie circulaire) fait partie d'un dispositif de plateformes expérimentales du BRGM qui compte également «Prime» (ingénierie, métrologie, gestion et remédiation environnementales ; intégrée au dispositif Pivots, qui regroupe plusieurs plateformes d'innovation, de valorisation et d'optimisation technologique environnementales), et Mimaroc (utilisation du sous-sol pour la transition énergétique et l'atténuation du changement climatique : stockage d'énergie, de CO₂, géothermie...).



Le pilote plurimétrique de la plateforme PRIME, plateforme pour la recherche et l'innovation en métrologie environnementale.

© BRGM - H. Fournié



SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL



Géosciences pour une Terre durable

brgm

SIÈGE - CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 Orléans Cedex 2 - France
Tél. : (33) 2 38 64 34 34
Fax : (33) 2 38 64 35 18

www.brgm.fr

