

Nucléaire : énergie, environnement, déchets, société

Projet fédérateur Ressources

Annexe 1 : programme scientifique

Ce projet fédérateur RESSOURCES est destiné à recréer une nouvelle communauté scientifique sur les ressources uranifères intégrant tout l'amont du cycle. L'objectif est de développer une approche fondamentale de la géologie de l'uranium et du thorium, des méthodes de traitement des minerais et du stockage des résidus avec l'ambition dans ces domaines de renouveler l'état des connaissances dans une perspective de moyen à long terme.

Les projets innovants des jeunes chercheurs, de bonnes qualités scientifiques et bien présentés, seront particulièrement financés.

Axe 1: Géologie de l'Uranium et du thorium (source – transport – dépôt – préservation)

Les recherches se feront par une approche pluridisciplinaire, analytique, expérimentale et modélisatrice, en particulier sur le fonctionnement des sources et la libération des métaux, les conditions physico-chimiques de transport de l'uranium et du thorium associés aux chemins de circulation et aux paramètres essentiels qui déterminent le dépôt de l'uranium et du thorium.

Les thématiques qui se dégagent sont explicitées ci-dessous :

Une meilleure connaissance du cycle de l'uranium et du thorium (?) lors de l'évolution précoce de la Terre est une voie de recherche qu'il faut approfondir. Même si des concentrations d'uraninite de type placer ont été indubitablement mises en évidence, il n'est pas certain que localement des remobilisations de l'uranium n'aient pas eu lieu, résultant de variations locales de fO_2 . Enfin pour les uraninites détritiques, il reste à expliquer les processus magmatiques qui ont abouti à la formation de roches granitiques et/ou pegmatitiques archéennes riches en uraninite.

Lors de la dernière décennie, très peu de gisements nouveaux ont été découverts et ils l'ont été dans des provinces uranifères connues. Il est donc très important de caractériser les provinces fertiles (U,Th) et de comprendre à quelle époque de l'histoire de la Terre et par quels mécanismes naissent ces provinces. A partir des données géochronologiques, la formation des gisements est reliée à des événements géodynamiques sans que l'on sache exactement quels sont les paramètres qui entrent en jeu. Durant certaines orogénèses, la formation de gisements d'uranium est rare, alors que d'autres orogénèses sont productives. Bien que les concentrations uranifères devraient être les plus faciles à dater par U/Th/Pb, il existe un problème de compréhension des données obtenues sur des concentrations uranifères. Une réflexion à l'échelle des continents est nécessaire associant la géologie structurale, la géodynamique et la géochimie.

Pour la formation de certains gisements, il est communément admis que l'uranium provient du lessivage de minéraux accessoires, les uraninites, par exemple, présentes dans les roches fertiles (granites, roches volcaniques,). Or, il existe peu de données sur la solubilité des minéraux accessoires uranifères et thorifères (thorianite, thorite, monazite) en fonction du Eh, du pH, de la chimie des solutions, de la température, des ligands organiques...). L'objectif est donc de déterminer par expérimentation les paramètres importants et d'aboutir si possible à une modélisation du fonctionnement des sources et de mettre en évidence les conditions optimales pour leur remobilisation. Le rôle de la sorption est mal connu, elle pourrait dans certains cas être un relais nécessaire entre la

source passive primaire et la source passive secondaire. De plus, dans cette approche, il faut prendre en compte les interactions entre les radiations et les minéraux. Le phénomène de métamictisation (recul alpha) en détruisant partiellement ou totalement le réseau cristallin entraînera une forte augmentation de la solubilité de l'uranium. Ce phénomène est bien connu mais il n'existe à ce jour aucune quantification applicable en métallogénie de l'uranium.

Avec les formidables progrès techniques de ces dernières années, il est maintenant possible d'obtenir des signatures isotopiques sur un grand nombre d'éléments. Il est par exemple intéressant de prendre en compte les isotopes des éléments de masse intermédiaire, accompagnateurs de l'uranium (Se, Mo, Fe, ...) et d'en définir les domaines d'application (source, transport, dépôt) pour les minéralisations uranifères et thorifères. L'utilisation de traceurs élémentaires est encore possible, par exemple la teneur en Cl dans les uraninites est susceptible de donner des informations sur la nature des solutions minéralisatrices en combinant avec des approches géochimiques plus classiques (isotopes de l'O, du C, du S, ...).

Que ce soit pour la compréhension de la formation des gisements ou le développement des techniques de récupération in-situ de l'uranium, des données précises sont nécessaires sur l'effet de la texture et de la minéralogie des roches sur les écoulements et le transport des solutés. Il est donc indispensable de faire une analyse quantitative de la distribution spatiale 3D et multi-échelle du squelette minéral et du réseau poral associé dans le but d'établir le lien entre texture et propriétés macroscopiques relatives au transport des solutés et au comportement mécanique.

La reconnaissance des chemins de circulation des solutions minéralisantes en 4D est probablement une thématique où des progrès considérables peuvent être réalisés à partir d'études géochimiques et minéralogiques. Pour l'uranium et le thorium, il faut tirer profit des défauts d'irradiation qu'ils induisent dans les minéraux. Des études en laboratoire sont nécessaires pour connaître la stabilité des défauts d'irradiation à l'échelle géologique. Il est à noter que la géochimie des gaz rares a un potentiel énorme, encore très peu développé, pour la datation et le traçage des solutions minéralisatrices. Il est également important de caractériser précisément un front redox dans différents contextes minéralogiques et géochimiques. De nouvelles approches très prometteuses devraient permettre de déterminer le sens de circulation des fluides à partir de la dissymétrie des cimentations et de l'enregistrement de l'Anisotropie de Susceptibilité Magnétique (ASM). Il est aussi nécessaire de développer des méthodes de datation innovantes permettant de fixer dans le temps les différentes circulations.

La communauté scientifique française est riche en géophysiciens ayant fait considérablement progresser les disciplines scientifiques fondamentales (IPGP, Paris, EOST, Grenoble, ...). L'enjeu sociétal en matière de ressources minérales et énergétiques est d'accéder à de nouveaux domaines d'exploration et notamment aux parties profondes de provinces fertiles, aux régions sous-explorées car masquées sous divers recouvrements (sables, latérites, glace, ...) ou pénalisées par des barrières diverses (eaux salées, argiles, ...).

Parallèlement aux recherches scientifiques des progrès technologiques essentiels ont été réalisés ces dernières années dans différentes méthodes géophysiques (citons notamment l'ensemble des méthodes électromagnétiques-magnéto-telluriques), augmentant de façon très sensible le rapport signal sur bruit et par voie de conséquence la profondeur d'investigation et/ou la précision des données (exemple équipement TDEM TEMFAST). Dans le même temps la rapidité d'acquisition a été fortement augmentée (par exemple les résistivimètres multi-electrodes) en même que la masse de données disponibles à interpréter (par exemple enregistrement des séries temporelles complètes en AMT, MT et RMP). En revanche, les algorithmes de traitement de données sont restés en retrait par rapport à ces avancées, pénalisant la recherche d'anomalies très discrètes; bien que la communauté des mathématiciens ait largement progressé dans le domaine des "signaux faibles".

En même temps, de nouvelles méthodes sont apparues (RMP) ou des équipements nouveaux ont été développés (gravimètre en forage) avec des besoins en algorithmes de traitement et d'interprétation spécifiques.

Les champs de progrès sont également attendus dans les couplages de méthodes (par exemple gravi-Mag-EM), dans le couplage des dispositifs géophysique en forage / surface / voir aéroportée, dans l'approche multi-méthodes, dans l'acquisition 3D et la modélisation 3D). Par exemple, la modélisation 3D géologique, outil de visualisation et de compréhension / prédiction des structures géologiques, est indispensable à l'évaluation des ressources et doit être renforcée par un apport accru de données géophysiques et pétrophysiques. Les logiciels commerciaux actuels en font un élément d'analyse performant et puissant à même de prendre en compte les structures et environnement géologiques les plus complexes. Toutefois, basées pour l'essentiel sur les observations géologiques de terrain et sur les corrélations entre forages, les limites des modélisations actuelles sont celles de la densité des observations (mailles et profondeur de forages). Un moyen de repousser ces limites et de réduire les incertitudes sur les modèles géologiques est d'intégrer les données géophysiques (i.e. aériennes, sol, entre forages, sismique de puits, ...), et en particulier leur part quantifiable.

La simulation génétique des gisements, très balbutiante à ce jour, est certainement une voie d'avenir prometteuse. Les gisements de type roll-front pourraient constituer le point de départ de cette modélisation. L'objectif serait de cerner les éléments de l'environnement géologique ayant une influence sur la forme et les teneurs des corps minéralisés. La communauté ressent un manque criant de données expérimentales permettant de bien interpréter la solubilité, le transport et le dépôt de l'uranium et du thorium. Le rôle des composés organiques mérite une étude particulière concernant l'uraninite, la thorianite, la thorite, la coffinite. Celui du graphite reste encore très discuté.

Des travaux sont encouragés sur les concentrations d'uranium non conventionnelles. Il est nécessaire de comprendre la variabilité spatiale des teneurs en uranium et pourquoi certaines zones sont plus riches (phosphates, shales noirs, anatexite). Dans ce registre, le comportement de l'uranium et du thorium lors de la migmatization mérite d'être expliqué. Pourquoi aboutit-on parfois à des concentrations uranifères et/ou thorifères. La réponse devrait surtout provenir de données expérimentales et de l'analyse fine de ces concentrations en particulier en terme d'oxydo-réduction. L'uranium contenu dans ces concentrations non conventionnelles est extrêmement difficile à extraire. Des progrès notables pourraient être obtenus par une approche concertée entre géologues et chimistes. En effet, en déterminant des analogues naturels, il devrait être possible de mieux comprendre la libération de l'uranium dans le milieu naturel et ainsi de déboucher sur de nouvelles méthodes de traitement de minerais. Le traçage de la migration/concentration de l'uranium et du thorium par les déséquilibres radioactifs est bien adaptée à cette approche, associée à des études minéralogiques et géochimiques plus couramment utilisées.

Enfin jusqu'à maintenant les gisements d'uranium exploités contiennent essentiellement l'uranium sous forme d'oxydes d'U(IV) ou de minéraux à U(VI). Or il existe des concentrations à plus faibles teneurs associées à des concentrations en Elements des Terres Rares (ETR). Avec les tensions actuelles sur le marché des ETR, il apparaît intéressant de travailler sur les processus qui aboutissent à la concentration de l'U et des ETR.

Axe 2: Traitement des minerais d'uranium et de thorium

La description de l'axe 1 qui porte sur la géologie du thorium et de l'uranium montre que des études de chimie analytique (mesures de solubilités, influence du pH, potentiels redox) en relation avec la géologie pourraient permettre de comprendre, d'expliquer et de prévoir certains comportements naturels. Par ailleurs, la chimie de l'uranium et du thorium interviendra également dans les procédés d'extraction et de traitement des minerais.

Pour faire face à la demande prévisible d'uranium et évaluer le potentiel d'alimentation des futurs réacteurs, il faudra renouveler et augmenter les capacités de production sachant que la ressource (uranium et thorium) existe. Un des enjeux de cette augmentation est une exploitation avec des rejets maîtrisés des opérations minières.

Néanmoins, pour atteindre ce but, de nombreux défis scientifiques et technologiques doivent être relevés afin d'avoir une extraction plus efficace qui permettrait de traiter des minerais faiblement concentrés, de diminuer les volumes d'effluents, de traiter le minerai dans son intégralité en valorisant les éléments d'intérêt (terres rares, métaux nobles,...) et en conditionnant les toxiques. Répondre à ces défis imposent d'acquérir des données, prenant en compte la diversité des gisements et des compositions minérales, et de se donner les moyens d'identifier les phénomènes de sorption, de dissolution et d'extraction et le comportement des espèces chimiques selon les milieux et les solutions. En lien avec l'acquisition de données, la modélisation, la chimie analytique et les techniques de caractérisations spécifiques seront développées.

Par ailleurs, le rapprochement de la chimie et de la biologie pour l'extraction sélective d'éléments est également recherché, que ce soit pour la sorption ou pour l'oxydation ou la réduction sélective d'éléments. Ce nouveau champ d'études multidisciplinaire sera favorisé.

Les sujets d'études pourront porter sur l'exploitation de minerais à faible teneur en uranium ou de stériles, sur la réduction de l'impact environnemental de l'exploitation minière, sur les techniques de lixiviation (en tas, heap leaching, ...) et d'extraction (Flottation, Précipitation, Extraction Liquide Liquide, In Situ Leaching).

Le thorium n'étant pas actuellement un élément fertile de référence pour l'énergie nucléaire, il n'y a que peu d'études, notamment sur la chimie, de cet élément. Si le thorium est un élément extrêmement abondant sur Terre, son extraction est rendue difficile du fait de sa très faible mobilité et, donc, de sa faible concentration dans les minerais.

Cependant, à ce jour, ont déjà été extraites des tonnes de thorium, sous-produit du traitement des minerais pour la production des terres rares dont l'industrie est en pleine expansion particulièrement en Chine.

Une question se pose: doit-on considérer le thorium, sous-produit de l'industrie des terres rares actuellement en entreposage de surface, comme un déchet qu'il faudra stocker de manière sûre dans les années à venir ou comme un élément pouvant être valorisé pour produire de l'énergie nucléaire?

Dans l'attente d'une réponse à cette question, les recherches sur le thorium doivent se poursuivre afin d'enrichir la littérature en données fondamentales relatives à la chimie du thorium, données qui seront exploitées ultérieurement quelle que soit l'option - "stockage" ou "combustible" - retenue.

La difficulté d'utiliser le thorium en tant que combustible réside essentiellement en sa difficulté de le traiter. Un procédé, THOREX, a été développé et est, à l'instar de PUREX (mis en oeuvre pour le combustible U-Pu), basé sur l'extraction liquide-liquide entre une phase aqueuse et une phase organique. La première étape de THOREX, comme de PUREX, est la dissolution du combustible oxyde usé. Si les pastilles d'oxyde d'uranium(IV) sont aisément solubilisées, la dissolution de la thorie nécessite la mise en oeuvre de solutions acides très concentrées et additionnées d'acide fluorhydrique. L'utilisation de ces solutions très acides rend complexe l'extraction liquide-liquide avec la formation d'une troisième phase. Même si le procédé THOREX n'a pas été optimisé avec la recherche de molécules extractantes spécifiques au thorium, un procédé hydrométallurgique nécessitera la dissolution des pastilles de combustible. Des études suggèrent une relation entre la cinétique de dissolution et les spécificités des pastilles de combustible thorié, à savoir la méthode de préparation, la densité, la granulométrie.

Il est donc essentiel d'établir et de comprendre la relation entre la préparation de pastilles à base de ThO₂ et sa cinétique de dissolution en solution aqueuse. Le principal problème dans la réaction de dissolution du thorium est que le thorium n'est stable que dans deux états d'oxydation: Th(0) et Th(IV). Quand il est sous forme ThO₂, sa solubilisation ne repose que sur ses propriétés acido-basiques et non sur des propriétés redox. Il serait donc nécessaire de rechercher des complexants permettant d'augmenter la solubilité du thorium (IV) en solution aqueuse.

D'autres voies, telles que la pyrochimie peuvent également être regardées pour le traitement du combustible thorié.

Axe 3 : Acteurs et marchés des matériaux fissiles

Le projet Ressources exprime un intérêt particulier à soutenir des recherches abordant la question de l'extraction et de l'approvisionnement en uranium par les méthodes conjointes des sciences humaines et sociales, et de la géologie/géochimie. En effet, les évaluations des ressources en uranium disponibles au niveau international ont tendance à occulter les contextes géologiques et socio-économiques dans lesquels les ressources sont susceptibles d'être inventées, exploitées et échangées. De ce fait, les approches « réalistes » des ressources et des marchés sont rares. Le projet indique son souhait de soutenir des recherches portant sur :

- La structuration institutionnelle et géographique des marchés
- L'évaluation des ressources secondaires en matériaux fissiles
- La prospective énergétique et l'équilibre ressources-besoins
- L'analyse économique du cycle du combustible, y compris ses enjeux économiques et sociétaux
- L'analyse des contextes sociaux et géographiques de l'extraction des minerais d'uranium et de thorium

Depuis 2009, deux journées sont organisées à Orsay chaque année fin novembre sur l'uranium naturel. Ce sera le lieu de synthèse et de discussion des travaux entrepris dans le cadre du projet fédérateur RESSOURCES. De 130 à 140 personnes sont présentes à cette manifestation et permettent la présentation de toutes les études faites en France sur l'uranium naturel. Un volume des résumés est édité à cette occasion.

Un suivi très étroit des publications internationales issues du Projet Fédérateur RESSOURCES sera réalisé. Ce sera le moyen privilégié de valoriser les travaux entrepris.