

Évolution récente des recherches sur la métallogénèse de l'uranium

Michel Cuney¹.

Introduction

L'uranium est la seule ressource minérale naturelle à être exploitée à partir de gisements localisés dans tout le cycle géologique dans des environnements métamorphiques (800°C, 5 à 7 kbar), plutoniques, métasomatiques, hydrothermaux, diagénétiques, volcaniques, sédimentaires à surperficiels (25°C, 1bar). Des gisements d'uranium importants se trouvent sur tous les continents. Ils ont été regroupés en un minimum de 14 types majeurs en se basant principalement sur leur environnement géologique (OECD/NEA & IAEA).

Parmi ceux-ci, 3 types principaux représentent plus de 75% des ressources mondiales en uranium :

- **les gisements associés aux discordances** se localisent à proximité d'une discordance entre un socle cristallin et un bassin silicoclastique protérozoïque intracontinental. Les gisements majeurs sont situés au Canada (bassin de l'Athabasca, Saskatchewan) avec des teneurs moyennes généralement supérieures au pourcentage et jusqu'à des valeurs de 18% U pour des ressources de 200 000 tonnes d'U à McArthur River. En Australie (Alligator Rivers Uranium Field, Northern Territory), les teneurs sont généralement plus faibles (<1 % U) ;
- **les complexes brèche** avec Olympic Dam comme seul gisement de ce type exploité ; c'est le plus grand du monde mais à faible teneur (400-500 g/t U, avec des réserves supérieures à 350 000 t U et des ressources de 1 500 000 t U) ;
- **les gisements dans les grès** déposés dans des environnements continentaux fluviaux à bordure marine. Ils ont des teneurs faibles à moyennes (0,05 – 0,4% U) avec des gisements de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de t U. Ils sont exploités de manière croissante en « *in situ leaching* ». Kazakhstan, Ouzbékistan, Niger

et États-Unis renferment les ressources majeures connues, mais des potentialités importantes existent dans plusieurs autres pays : Mongolie, sud Argentine...

D'autres productions d'uranium importantes, passées ou actuelles, ont été tirées d'une très grande variété de gisements :

- **conglomérats à galets de quartz** où l'uranium a représenté un sous-produit de l'extraction de l'or (Witwatersrand, Afrique du Sud), avec des teneurs aussi basses que 0,01% U, et des gisements individuels allant de 5 000 à 150 000 t. Cependant, à Elliot Lake (Canada), seul l'U a été extrait mais les teneurs étaient plus élevées (0,13 % U) ; de nouvelles mines sont en développement dans le bassin du Witwatersrand ;
- **gisements filoniens**, les districts majeurs étant localisés dans l'auréole métamorphique ou à l'intérieur de leucogranites peralumineux, respectivement dans l'Erzgebirge (Allemagne et République Tchèque : 370 000 t U exploitées) et le Massif central français (50 000 t U exploitées), mais certains sont localisés dans des roches faiblement métamorphiques, loin de granites (Shinkolobwe, Zaïre ; Schwartzwalder, États-Unis...) ; seuls quelques gisements de ce type sont encore exploités en Chine et en République tchèque ;
- **gisements associés au volcanisme** : le district de loin le plus important est localisé dans la caldera jurassique de Streltsovskoye (Russie) avec 300 000 t U déjà exploitées et en ressources à 0,1 – 0,3 % U ; des gisements similaires se trouvent principalement en Mongolie, au Kazakhstan, et en Chine ;
- **gisements intragranitiques disséminés** où l'uranium est associé à des roches intrusives, avec Rössing (Namibie) (>150 000 t U à 0,03 – 0,04 % U), encore en exploitation actuellement ; de nombreuses autres occurrences de ce type existent dans le monde et font l'objet d'une exploration intensive ;

1. UMR G2R – CNRS – CREGU – Université Henri Poincaré, BP 239, 54506 Vandoeuvre-Lès-Nancy Cedex.

■ **gisements métasomatiques** localisés dans des roches fortement déformées de manière ductile et soumises à une métasomatose régionale à Na et Ca, avec les districts de Lagoa Réal (Bahia, Brésil) et de Zheltye Vody (Ukraine). Les ressources de chacun d'eux sont supérieures à 100 000 t U à 0,1 – 0,3 % U. Ils sont encore en exploitation.

Évolution globale de la recherche depuis 1990

Probablement encore plus que dans toute autre ressource, l'évolution de la recherche scientifique dans le domaine de la métallogénèse de l'uranium suit de très près l'évolution des budgets d'exploration qui sont une conséquence directe des cours du métal sur le marché spot. Après une période faste de la fin des années 70, suite à la crise pétrolière de 1973 et jusqu'à la fin des années 80, avec un pic des cours de l'uranium à 43\$/livre U₃O₈ en 1983, les recherches dans le domaine de la métallogénèse de l'uranium se sont pratiquement arrêtées dans la plupart des pays du monde jusqu'au début des années 2000. Elles ne faisaient plus que l'objet de travaux très isolés.

Le phénomène le plus important qui s'est produit depuis 1990 est l'ouverture des pays du bloc soviétique qui a permis d'accéder très progressivement à l'énorme effort de recherche qui avait été mené par des milliers de chercheurs depuis 1945 dans ces pays, avec une très faible diffusion des connaissances accumulées vers le monde occidental. La lecture des quelques travaux qui étaient diffusés vers l'occident avant 1990 ne permettait souvent pas de comprendre toute leur signification. Ceci, non seulement du fait d'une censure des informations, comme par exemple des cartes sans échelle et non localisées, l'absence de données de teneur et de tonnage, mais aussi et surtout par l'utilisation de concepts et d'une terminologie développée de manière indépendante dans le bloc soviétique.

Cette ouverture a permis de découvrir que l'URSS avait extrait la moitié de l'uranium produit dans le monde à partir de gisements d'une ampleur méconnue en Occident. Par exemple, la caldera jurassique de Streltsovsky (Transbaïkalie, Russie) qui a déjà produit plus de 100 000 t d'uranium, représente le principal gisement russe en production et renferme encore des ressources de 200 000 t. Aucun gisement d'uranium associé au volcanisme dans le monde occidental n'a dépassé des ressources supérieures à quelques milliers de tonnes U, exceptionnellement une dizaine de milliers de tonnes comme à McDermit aux États-Unis, mais à très faible teneur. De plus, s'il représente de loin le premier gisement de ce type, Streltsovsky n'est pas le seul découvert par les

prospecteurs soviétiques, de nombreux autres gisements associés à des volcanites présentant des ressources supérieures à 10 000 t U ont été découverts au sud de Streltsovsky en Mongolie avec les calderas de Dornot (33 000 t U) en Mongolie, de Xiangshan (20 000 t U) en Chine et plusieurs calderas dans le nord du Kazakhstan qui ont été exploitées. Les études scientifiques développées ces dernières années et en cours en collaboration avec les géologues russes, chinois et américains ont pour objectif de comprendre le rôle des différences de contexte géotectonique, de nature du magmatisme, de mécanismes minéralisateurs entre les ensembles volcaniques fortement et faiblement minéralisés, au-delà des différences dans les techniques d'exploration et des modèles conceptuels utilisés par les géologues soviétiques. L'enjeu est d'importance : devons nous reprendre complètement l'exploration des calderas dans le monde occidental ?

De même, le début des années 90 nous a fait découvrir que les gisements de type filoniens périgranitiques localisés au voisinage des granites à deux micas varisques de même âge, minéralogie et géochimie que ceux de France, d'Espagne ou du Portugal ont livré près de 300 000 t d'uranium à partir de la petite province de l'Erzgebirge (Mont Métallifères) à cheval entre la Saxe et la Bohême et connue pour ses minerais d'uranium depuis la découverte de l'oxyde d'urane par Hans Martin Klapproth en 1789 ! Ces mêmes gisements, principalement localisés au sein des massifs granitiques en France, n'ont livré qu'une cinquantaine de milliers de tonnes d'uranium. S'il est certain que les teneurs de coupures qui ont été utilisées à l'Est étaient beaucoup plus basses que celles du monde occidental et que l'exploitation a été menée à plus grande profondeur, cette énorme différence de production entre ces deux districts pose un problème métallogénique majeur qui fait l'objet de recherches en cours entre chercheurs français, allemands et russes.

Cet exemple permet d'illustrer également toute l'importance des modèles conceptuels dominants pour le développement de l'exploration. Dans les années 60, le modèle dominant en France pour les gisements d'uranium filoniens intragranitiques, repris dans certains autres pays par exemple pour les gisements de type discordance était le modèle *per descensum*, c'est-à-dire un lessivage de l'uranium des granites en surface pendant une période d'altération de type tropical et sa concentration par infiltration des fluides météoriques en profondeur le long de structures cassantes. Ces gisements se trouvaient actuellement presque dans leur position initiale avec des reliques de l'ancienne paléosurface encore préservées et ils se fermaient vers 100 à 200 m de profondeur, profondeur reconnue par l'exploration dans ces années.

À la même époque, les gisements de l'Erzgebirge étaient exploités jusqu'à 2 000 m de profondeur et les études d'inclusions fluides menées en URSS montraient le caractère hydrothermal de ces gisements. Ce n'est que pendant les années 70 que les études d'inclusions fluides menées à Nancy ont montré le caractère hydrothermal de ces gisements. Le dernier d'entre eux qui a été exploité en France et qui a fermé en 2001, celui du Bernardan dans la Marche occidentale a été reconnu par sondages jusqu'à 800 m de profondeur et les structures demeurent totalement ouvertes à ce niveau. Il est donc encore possible de trouver beaucoup d'uranium en France ! Tout dépendra du prix sociétal et environnemental que l'on voudra y mettre !

Depuis les années 90 et jusqu'au début des années 2000, les recherches dans le domaine de la métallogénie de l'uranium ont été principalement réalisées : en France, avec essentiellement le CREGU et l'UMR-G2R à Nancy et à l'UMR-HYDRASA à Poitiers ; au Canada, avec le laboratoire de l'Université de Queen's à Kingston, le *Saskatchewan Research Council* à Saskatoon et, très récemment, le Service Géologique du Canada à Ottawa ; en Russie, avec principalement l'IGEM à Moscou et en Chine avec différentes institutions ; la Chine est d'ailleurs le seul pays possédant actuellement une revue dédiée à l'uranium – *Uranium Geology* – qui publie des articles en chinois, avec un résumé en anglais. Des publications plus sporadiques ont émané de diverses autres institutions, mais qui ne peuvent être répertoriées au sein de cette courte note. La croissance des publications sur les gisements d'uranium va devenir exponentielle dans les années à venir du fait de l'explosion des budgets d'exploration et de recherche dans les grandes compagnies et la création de plus de 400 compagnies juniors dans le monde ces 3 dernières années. Cette évolution reflète la multiplication par 10 des cours de l'uranium sur le marché spot, depuis son étiage à 7\$/livre U_3O_8 en 2001 à 85\$ en février 2007. Cette croissance des budgets d'exploration a un impact direct sur les budgets affectés par les sociétés minières à la recherche scientifique en particulier dans des pays comme la France, le Canada, l'Australie, la Russie et la Chine. Cependant, si dans tous ces pays l'État accompagne l'effort de recherche dans ce domaine, ce n'est pas le cas de la France !

Les principales problématiques de recherche

Gisements d'uranium associés aux discordances

Ce type de gisement a été et reste de très loin le principal objet des recherches dans le domaine de la

métallogenèse de l'uranium pendant ces 15 dernières années du fait de leur exceptionnelle richesse pour des tonnages élevés qui en font les gisements dont l'exploitation demeurerait rentable malgré les cours très bas du métal. Si le modèle hydrothermal-diagénétique développé dans les années 1970 n'a pas été remis fondamentalement en cause depuis, il a été considérablement précisé.

Par exemple, la succession des événements structuraux, métamorphiques et plutoniques a fait l'objet de travaux considérables par plusieurs équipes canadiennes et en particulier par le Saskatchewan Research Council (Annesley *et al.*, 1997; Madore *et al.*, 2000 ; Portella *et al.*, 2000). Il a été montré que l'évolution de certaines structures tardi-hudsoniennes avait un rôle majeur pour la localisation ultérieure des failles inverses contrôlant la localisation des gisements. L'importance du stock d'uranium contenu dans les pegmatoïdes et leucogranites du socle sous forme de monazite anormalement riche en uranium et d'uraninite comme source potentielle d'uranium pour les gisements a été quantifiée.

Par ailleurs les âges du dépôt de la minéralisation déterminés vers 0,9 à 1 Ga par TIMS sur des échantillons massifs de minerai, ont été progressivement vieillissés, tout d'abord par une meilleure sélection des générations d'oxyde d'uranium les moins remobilisées par microprélèvement de plus en plus fin, puis par utilisation de méthodes de datation ponctuelles de type SIMS ou ablation laser ICPMS avec lesquels des âges de 1360 à 1560 Ma ont été déterminés (Fayek et Kyser, 1997 ; Fayek *et al.*, 2002 ; Cuney *et al.*, 2002 ; Alexandre *et al.*, 2003 ; 2005). Toutefois, le problème du dépôt de l'ensemble de la minéralisation à l'âge le plus ancien, les âges les plus récents ne représentant que des remobilisations, ou de la formation de la minéralisation riche par accréation de dépôts lors de plusieurs épisodes successifs n'est pas encore définitivement résolu.

Ces travaux ont montré en particulier qu'une forte proportion du plomb radiogénique avait migré non seulement à l'extérieur de la structure des oxydes d'uranium, mais également en dehors de l'enveloppe des gisements (Holk *et al.*, 2003 ; Annesley *et al.*, 2003 ; Kister *et al.*, 2004). Cette perte peut atteindre plus de 50 % du plomb radiogénique comme dans le cas du gisement de Shea Creek (ouest Athabasca, Canada). L'analyse systématique des isotopes du plomb dans le bassin de l'Athabasca, initialement envisagée comme méthode d'aide à l'exploration potentielle, s'est vite révélée inutilisable du fait de la trop grande diffusion du plomb radiogénique dans le bassin. Une telle mobilité du plomb après la formation des gisements, associée à une mobilité concomitante relativement faible de l'uranium, reste difficile à expliquer et contraste totalement avec les mobilités

relatives de ces deux éléments lors de la formation des gisements, les oxydes d'uranium ayant des compositions isotopiques extrêmement pauvres en plomb commun avec des rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ supérieurs à 10 000.

Il a été montré par plusieurs équipes que les minéraux accessoires des bassins protérozoïques auxquels étaient associés les gisements de discordance (Athabasca, Canada ; Kombolgie, Australie ; mais aussi celui de Franceville avec les gisements de la région d'Oklo présentant toutefois des caractéristiques un peu différentes) subissaient une altération importante lors de la diagenèse dans le bassin mais également dans les formations altérées du socle : monazite altérée en alumino-phosphates-sulfates (Fayek et Kyser, 1997 ; Hecht et Cuney, 2000 ; Gaboreau *et al.*, 2006) et zircon avec des domaines importants substitués par Al, P, Ca, REE, et enrichis en uranium aux dépens de Zr, Hf et Si (Hecht *et al.*, 2003). Il a été montré que si cette altération pouvait libérer de l'uranium à partir de l'altération d'une phase aussi réfractaire que la monazite, *a fortiori* toute autre source d'uranium pouvait être également lessivée. Un débat reste cependant entre les partisans d'un uranium provenant uniquement des formations silico-clastiques du bassin et ceux faisant du socle une source largement prédominante du fait de l'enrichissement beaucoup plus élevé des formations paléoprotérozoïques de type plateforme épicontinentale qui forment l'encaissant ou le sousbassement des gisements de discordance en Australie et au Canada.

Ce débat a des conséquences directes sur les modèles de circulation des saumures diagénétiques : le modèle de type « *per descensum* », implicite si la source de l'uranium est considérée être le bassin lui-même, nécessite une infiltration profonde des saumures dans le socle, pour une source principale de l'uranium localisée dans ce dernier. Les conséquences sont également importantes pour l'exploration, une infiltration importante des saumures dans le socle avec émergence permet d'envisager la présence de gisements plus profonds sous la discordance et par voie de conséquence dans des domaines périphériques au bassin, recouverts auparavant par les formations silicoclastiques dont l'extension a été beaucoup plus importante que les limites cartographiées actuellement. Les progrès majeurs réalisés dans la détermination de la composition des fluides par analyse individuelle des inclusions fluides (microsonde Raman, Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LA-ICPMS), (Derome *et al.*, 2007) ont permis d'apporter des arguments importants en faveur d'une infiltration profonde des fluides dans le socle (Derome, 2002 ; Derome *et al.*, 2003 ; 2005).

Cette analyse a permis de reconnaître deux types de fluides : une saumure diagénétique précoce à dominante sodique correspondant à de l'eau de mer ayant dépassé le stade de saturation en halite (du fait des faibles valeurs de leurs rapports Cl/Br) et une saumure à dominante calcique, plus tardive, trouvée dans l'environnement des gisements. Cette seconde saumure est interprétée comme résultant de l'évolution de la première par interaction avec les minéraux calciques du socle lors de sa percolation dans celui-ci. Si les premières déterminations des teneurs en uranium dans les fluides par ablation laser ICP-MS ont permis de trouver l'uranium dans les saumures à dominante calcique (coopération avec l'ETH, Zürich), ce résultat reste cependant à confirmer par des mesures plus systématiques (Cuney, 2005). D'une manière générale les mesures de composition *in situ* des inclusions fluides bien qu'ayant fait d'importants progrès ces dix dernières années, nécessitent encore non seulement des études plus systématiques, mais également des améliorations afin de pouvoir déterminer la nature des complexants possibles (F, P, sulfates, carbonates...), les métaux à très faible concentration ainsi que les compositions des isotopes stables et radiogéniques. Par ailleurs, le mécanisme de la réduction de l'uranium qui a aussi fait l'objet de nombreux travaux (rôle du graphite, des sulfures, ou du méthane) reste encore fortement débattu (Landais *et al.*, 1993 ; Annesley *et al.*, 2001 ; Sangély *et al.*, 2003 ; Wilson *et al.*, 2005). Une recherche plus systématique des évidences de fluides réducteurs en particulier dans les gisements localisés profondément dans le socle devrait être entreprise.

La signature isotopique D-O-C des fluides a été déterminée principalement à partir de l'analyse des minéraux d'altération associés à ces gisements et plus rarement à partir de l'analyse directe des fluides des cristaux de quartz par extraction globale : (Kotzer et Kyser, 1995 ; Fayek et Kyser 1997 ; Kyser *et al.*, 2000 ; Polito *et al.*, 2004). Il est montré que les fluides de bassins sont impliqués dans la genèse des minéralisations uranifères et qu'ils ont une signature homogène dans tous les gisements, ce qui suppose des circulations à l'échelle du bassin sur de longues périodes de temps. Lors de l'exhumation du bassin, l'infiltration des fluides météoriques n'a que modérément affecté les compositions isotopiques des argiles mais a, par contre, totalement rééquilibré la signature isotopique de l'oxygène des oxydes d'uranium (Fayek et Kyser, 1997 ; Fayek *et al.*, 2002), en relation avec une perte importante de plomb radiogénique. Les valeurs δD (-57‰) mesurées sur les fluides extraits des quartz du gisement de McArthur River (Kotzer and Kyser, 1995), plus légères que celles de l'eau de mer ayant atteint la satura-

tion en halite, peuvent résulter d'une contamination des fluides extraits globalement par des inclusions fluides secondaires ayant piégé ces fluides météoriques, provoquant une diminution des valeurs de δD comme cela est observé dans la composition des minéraux argileux associés.

Les paragenèses d'altérations ont fait l'objet de nombreux travaux qui ont permis de préciser considérablement la nature et la succession de celles-ci, leur distribution à l'échelle du bassin et des gisements (Beaufort *et al.*, 2005 ; Kister *et al.*, 2006 ; Laverret *et al.*, 2006) et de proposer un modèle thermodynamique permettant de déterminer les paramètres intensifs contrôlant leur stabilité (Kister *et al.*, 2005).

Un autre paramètre important dans la genèse des gisements d'uranium de type discordance qui a été bien quantifié ces dernières années est la dissolution du quartz qui a permis la création d'espaces importants qui ont contrôlé en grande partie le développement des minéralisations les plus riches, plus que les ouvertures qui ont pu être créées par le jeu des failles inverses associées à la plupart des gisements (Lorilleux, 2001 ; Lorilleux *et al.*, 2002 ; 2003). Cependant, le mécanisme permettant d'aussi importantes dissolutions du quartz dans un domaine très riche en ce minéral, aussi bien dans le bassin que dans le socle, n'est pas encore cerné de manière satisfaisante.

Ainsi, un effort expérimental important doit être développé afin de quantifier le rôle des saumures chlorurées sodiques et calciques sur la solubilité de l'uranium et de la silice, sur la stabilité des minéraux accessoires (monazite et zircon surtout) et sur la réactivité du graphite à basse température. De telles données sont indispensables pour obtenir une modélisation thermodynamique plus satisfaisante du développement des altérations, du transport et du dépôt de l'uranium que celles qui ont été tentées pour les gisements d'uranium associés aux discordances protérozoïques (Komninou et Sverjensky, 1995 ; 1996 ; Raffensperger et Garven, 1995 a et b). Les données thermodynamiques de solubilité de l'uranium actuellement disponibles dans les conditions de formation de ces gisements proviennent essentiellement de l'extrapolation de données expérimentales obtenues à basse température ou avec des concentrations en complexants très faibles telles que celles calculées par Shock *et al.* (1997), et elles sont très probablement fortement sous estimées.

Les gisements de la région d'Oklo, localisés dans le bassin paléoprotérozoïque de Franceville au Gabon ont continué d'être l'objet de travaux à l'échelle internationale, mais la plupart de ceux-ci ont concerné l'étude des réacteurs nucléaires et de leur environnement comme analogue naturel pour l'entreposage des déchets

nucléaires de haute activité. Cuney et Mathieu (2000) et Mathieu *et al.* (2001) ont proposé que la principale source d'uranium pour ces gisements soit représentée par l'altération de la monazite des formations gréseuses basales FA. Dans cette formation, la quantité de monazite – beaucoup plus abondante que dans les grès des bassins de Kombolgie et de l'Athabasca – suffit à rendre compte des tonnages beaucoup plus limités découverts dans le bassin de Franceville.

Gisements d'uranium associés aux volcanites

Bien que ce type de gisements ne représente pas des ressources aussi importantes que beaucoup d'autres types, la découverte de la province de Streltsovsky en Transbaïkalie a été un des moteurs du développement de nouvelles recherches dans ce domaine.

En dehors des contributions concernant principalement des synthèses de travaux antérieurs (Andreeva *et al.*, 1996 ; Ishukova *et al.*, 1998 ; Fan Hong-hai, 2003 ; Castor et Henri, 2000) et la datation de l'épisode minéralisateur (Chernyshev and Golubev, 1996), les études ont principalement porté sur la caractérisation des sources, à partir de l'analyse ponctuelle à la microsonde électronique et ionique de la composition des verres volcaniques dont la composition originelle a été préservée dans les inclusions magmatiques des phénocristaux de quartz des tufs ou des laves acides (Chabiron, 1999 ; Chabiron *et al.*, 2001a, b ; 2003 ; Chemillac *et al.*, 2003 ; Chemillac, 2004). Il apparaît que les districts les plus fortement minéralisés sont associés à du volcanisme peralcalin très fractionné, fortement enrichi en U (15-20 ppm) et F (1 à 2,5 wt%). Les ressources particulièrement importantes du district de Streltsovsky résulteraient de la présence d'une deuxième source d'uranium majeure représentée par un sous-bassement constitué en grande partie de granites calcoalcalins fortement potassiques, également enrichis en uranium, sur lesquels la caldera s'est développée. Des études plus complètes ont été menées sur la caldera de Xiangshan en Chine, mais la plupart d'entre elles ne sont publiées qu'en chinois.

Les gisements d'uranium associés aux grès post-ordoviens

Peu de travaux ont été réalisés ces dernières années dans le monde occidental sur ce type de gisement, du fait de la fermeture de la plupart des mines de ce type en particulier aux États-Unis qui en ont extrait l'essentiel de leurs ressources. Les gisements associés aux grès connaissent un renouveau non seulement en raison de la remontée des cours de l'uranium mais aussi et surtout du fait des

possibilités d'exploitation par *in situ leaching*. Au niveau académique, les principales recherches sont réalisées en Chine sur les gisements localisés dans des formations silico-clastiques fluviodeltaïques tertiaires, dans le Nord du pays, et présentant des modèles analogues à ceux développés pour certains gisements du Wyoming aux États-Unis (Lin et Shi, 2000). Il a été montré que les conditions nécessaires à la réduction de l'ion uranyle en solution étaient créées par des infiltrations, le long de failles, d'hydrocarbures gazeux et parfois liquides depuis des réservoirs pétroliers profonds se piégeant dans des niveaux de grès poreux jouant le rôle de réservoir secondaire.

Des travaux ont été repris très récemment en France sur les gisements de la région d'Arlit au Niger afin de préciser leur contexte structural (Gerbault, 2006), diagénétique (Cavellec, 2006) et sur la nature des sources d'uranium (Wagani, 2007). L'âge de la mise en place des minéralisations, localisées dans des grès d'âge dévonien à fini-jurassique est encore mal contraint du fait du caractère finement disséminé de la minéralisation conduisant à la perte de certains des descendants de la chaîne de désintégration de l'uranium, tels que le radium, par les effets de recul alpha. Le prochain enjeu dans cette région est de déterminer le modèle de genèse du gisement d'Imouraren, localisé dans le même contexte que les gisements de la région d'Arlit, mais dont la minéralisation est constituée essentiellement de minéraux d'uranium hexavalent au lieu de pechblende et de coffinite.

Autres types de gisements

L'origine des concentrations en uraninite des **conglomérats à galets de quartz** éoarchéens du Witwatersrand (Afrique du Sud) a fait l'objet d'une controverse renouvelée avec la mise en évidence d'une forte remobilisation hydrothermale de l'or dans la partie ouest du bassin (Barnicoat, 1997). De ce fait, une origine épigénétique de ces concentrations en uranium a également été proposée. Cependant, la corrélation très forte entre Au et les minéraux lourds, et les âges obtenus récemment sur des particules d'or et de pyrite à 3.03 Ga, antérieurs à ceux des sédiments encaissants les plus anciens (2.90 Ga) démontrent l'existence d'une minéralisation U-Au originellement détritique (Frimmel, 2005). Enfin, le fait que les cristaux d'uraninite des conglomérats soient riches en thorium atteste de leur origine magmatique, les oxydes d'uranium déposés à basse température (< 300°C) n'incorporant que très peu de thorium du fait de sa faible solubilité dans ces conditions. Par ailleurs la variabilité des teneurs en thorium de ces cristaux d'uraninite atteste de la diversité des types de granitoïdes

sources : uraninites à faibles valeurs de Th dans les leucogranites et à forte teneur en Th dans les granites calcoalcalins fortement potassiques (Cuney et Friedrich, 1987).

Des travaux de recherches sporadiques ont continué d'être réalisés sur les gisements d'uranium de **type filonien du Massif central français** pour une caractérisation plus régionale des circulations fluides (André *et al.*, 1996) et une reconstitution de l'évolution thermotectonique d'un des principaux complexes leucogranitiques minéralisés, celui de St-Sylvestre (Marche occidentale), à partir de mesures géochronologiques systématiques $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ sur muscovite (Scaillet *et al.*, 1999 a et b) et de son intégration dans l'histoire géologique de la chaîne varisque (Marignac et Cuney, 1999). Le synchronisme de l'évènement minéralisateur principal au Permien, pour les gisements d'uranium de la chaîne varisque, sur plus de 2 000 km, a été confirmé par de nouvelles datations sur les pechblendes de l'Erzgebirge (Golubev *et al.*, 2000) et les caractéristiques physico-chimiques des fluides associés ont été précisées (Krylova *et al.*, 2000). Par contre, Patrier *et al.* (1997) proposent un âge jurassique pour l'évènement minéralisateur du gisement du Bernardan. Cependant, dans ce travail, seules les minéralisations présentant les caractéristiques typiques des remobilisations jurassiques observées dans la plupart des autres gisements, ont été étudiées. Les filons à pechblende également observés dans ce gisement et possédant des caractéristiques similaires aux autres minéralisations filoniennes varisques mériteraient d'être datés afin de vérifier l'existence ou non de minéralisations d'âge permien.

Les **alaskites de Rössing** et les indices du même type localisés dans le même domaine ont fait l'objet de quelques travaux récents principalement en matière de géologie structurale. Basson et Greenway (2004) ont montré que la mise en place des alaskites était contrôlée par une tectonique extensive fini-orogénique. Des minéralisations du même type que celles de Rössing ont été caractérisées à Goanikontes dans le même contexte lithostructural (Nex *et al.*, 2001).

Les **pyroxénites à uranothorianite** de Madagascar, exploitées par le CEA dans les années 50, ont fait l'objet de recherches récentes pour préciser leurs conditions de genèse (Rakotondrazafy *et al.*, 1996 ; Moine *et al.*, 1998 ; Ramambazafy, 1998 ; Boulvais *et al.*, 1998 ; 2000). Ces travaux montrent que les minéralisations uranothorifères dérivent de magmas et de fluides riches en CO₂ et fluor provenant de la fusion partielle et de la déshydratation de formations sous jacentes au cours d'une granulitisation (800°C, 5 kbar). L'injection de ces magmas et fluides dans des marbres calcomagnésiens produit des skarns

d'amplitude régionale avec la zonalité la plus typique suivante : granitoïde potassique, endoskarn avec syénite à diopside (dysogénite) puis scapolite, ensuite exoskarn formé de diopsidites et finalement marbre. Dans ces conditions, l'uranium est mobilisé simultanément avec Th, Zr et les terres rares. La minéralisation la plus riche se dépose au niveau des pyroxénites, mais les scapolites et les marbres peuvent être également localement minéralisés.

Dans le cas du gisement d'**Olympic Dam** qui renferme de loin les plus grosses ressources en uranium du monde, très peu de travaux ont été réalisés, orientés sur la compréhension de la minéralisation uranifère, tout à fait exceptionnelle par ses teneurs en uranium relativement élevées comparativement aux autres gisements de type IOCG dans le monde. La compréhension de la genèse de la minéralisation nécessiterait d'une part l'étude de la distribution 3D des minéraux porteurs de l'uranium et d'autre part leur datation isotopique U-Pb par SIMS. Le dépôt de la principale minéralisation uranifère est-il synchrone de celui de la minéralisation précoce à Fe-Cu-Au, ou est-il plus tardif ? Le dépôt de l'uranium n'est-il pas contrôlé par les conditions réductrices créées par l'amas d'oxydes et de sulfures préalablement déposé ? Les études menées sur la région de Kwijybo au Québec (Magrina *et al.*, 2005), qui possède des indices de type IOCG riches en uranium, ont démontré la présence de granites de type calcoalcalin fortement potassiques et très fractionnés qui ont pu servir de source à ces minéralisations et qui sont semblables à celui de Roxbydowns encaissant le gisement d'Olympic Dam.

Minéralogie de l'uranium

Un travail systématique de cristallographie des minéraux d'uranium, principalement d'uranium hexavalent, avec découverte de nombreuses espèces nouvelles a été poursuivi ces quinze dernières années essentiellement par deux minéralogistes belges (Piret et Deliens) du Muséum des Sciences Naturelles de Bruxelles et deux minéralogistes américains (P. Burns de l'Université Notre Dame, Indiana et R. Finch du laboratoire d'Argonne, Illinois). Un des résultats les plus remarquables est la mise en évidence pour la première fois d'uranium à la valence 5 dans un minéral d'uranium : la wyartite (Burns et Finch, 1999), démontrant la possibilité du transport de l'uranium sous la forme pentavalente.

L'étude analytique des solutions solides naturelles entre différents pôles de minéraux accessoires uranifères (monazite, xénotime, zircon, thorite, coffinite...) sur différents types de granites (Förster, 1998 ; 2006) a montré que le couplage de différents types de substitution dans

un même minéral, permet d'accroître l'étendue des solutions solides et en particulier la quantité d'uranium.

Approches expérimentales

Ainsi que pour d'autres minéraux accessoires (zircon, apatite, monazite, columbo-tantalite), la solubilité de l'uraninite a été déterminée de manière expérimentale dans les liquides silicatés en fonction de leur peraluminosité et peralcalinité et à différentes fugacités en oxygène, ainsi que les coefficients de partage entre liquide silicaté et fluide (Peiffert *et al.*, 1994 ; 1996) à 800°C et 2 kbar. Ces expériences montrent que l'uraninite peut cristalliser à partir du magma pour des teneurs en uranium de l'ordre de quelques dizaines de ppm dans le cas d'un liquide silicaté fortement peralumineux. Inversement dans le cas de magmas fortement peralcalins, l'uranium a un comportement parfaitement incompatible avec des solubilités de plusieurs pourcents en poids. De telles expériences devraient être poursuivies pour tester l'effet de la température et de la pression.

Podor *et al.* (1995), Podor et Cuney (1997) ont montré qu'à 800°C, 2 kbar il existait une solution solide complète entre le pôle monazite et les pôles thorifère et uranifère, avec une substitution couplée du calcium comme compensateur de charge. La monazite peut donc représenter un hôte majeur de l'uranium dans les roches. Un travail expérimental important reste à faire pour quantifier plus précisément l'étendue des solutions solides dans les différents minéraux accessoires porteurs d'uranium en fonction des conditions P, T, X de leur milieu de croissance.

Conclusions

Ainsi malgré le ralentissement considérable des activités d'exploration pour l'uranium et des recherches académiques sur la métallogénèse de l'uranium dans la plupart des pays depuis la fin des années 80, des progrès importants dans la compréhension de la genèse des gisements de type discordance ont été acquis. Par contre, les recherches ont été beaucoup plus limitées pour les autres types de gisements.

La classification des gisements d'uranium la plus couramment utilisée est celle proposée par l'IAEA qui est basée sur la nature des formations lithologiques environnant les minéralisations. Les progrès réalisés dans la compréhension des mécanismes de formation des gisements devraient permettre de développer une classification génétique, afin de rendre compte de la diversité exceptionnelle des processus impliqués dans leur genèse et permettre la prédiction de nouveaux types

de gisements. Il va être nécessaire dans les prochaines années d'étudier les nouveaux gisements qui seront découverts afin d'accompagner l'énorme effort d'exploration qui redémarre depuis 2003 dans le monde. Par exemple le gisement d'Elkon en Yakoutie (Russie), dont les réserves seraient de plus de 344 000 t U (www.russia-intelligence.fr/getdoc/ri/), n'a pas encore fait l'objet de recherches scientifiques significatives.

Enfin, l'un des besoins les plus fondamentaux dans le domaine de la métallogénèse de l'uranium est l'acquisition de données expérimentales sur les solubilités de l'uraninite et des principaux porteurs d'uranium qui sont encore très mal connues à haute température et à haute pression et en présence de concentrations très élevées en complexants et plus particulièrement en chlorures. Cette étape est indispensable pour le développement d'une modélisation thermodynamique satisfaisante des conditions de genèse de ces gisements. De même, l'application accrue des méthodes d'analyse ponctuelle pour les datations, pour la détermination des compositions isotopiques ainsi que pour les concentrations en éléments en traces dans les inclusions fluides et les phases minérales permettra d'obtenir une liaison plus directe et plus quantitative entre les paramètres mesurés et ceux contrôlant effectivement le dépôt de la minéralisation.

Références

- Alexandre P., Kyser K., Polito P. et D. Thomas D., 2005. Alteration mineralogy and stable isotope geochemistry of Paleoproterozoic basement-hosted unconformity-type uranium deposits in the Athabasca Basin, Canada. *Econ. Geol.*, 100, 1547 - 1563.
- André A.S., Lespinasse, Cathelineau M., Boiron M.C., Cuney M. et Leroy J., 1999. Percolation de fluides tardi-hercyniens dans le granite de Saint Sylvestre (NW Massif Central français) : données des inclusions fluides sur un profil Razès-Saint Pardoux. *C.R.Acad.Sci.*, 329, 23-30.
- Andreeva O.V., Golovin V.A. et Kozlova P.S., 1996. Evolution of Mesozoic Magmatism and Ore-Forming Metasomatic Processes in the Southeastern Transbaikal Region (Russia). *Geology of ore deposits, MAIK Nauka*, 38, 101-113.
- Annesley I.R., Madore C., Shi R. et Krogh T.E., 1997. U-Pb geochronology and thermotectonic events in the Wollaston Lake area, Wollaston Domain: A summary 1994-1996; in *Summary of Investigations 1997: Saskatchewan Geological Survey, Saskatchewan Energy and Mines, Miscellaneous Report 97-4*, 162-173.
- Annesley I.R., Madore C. et Cutler J., 2001. Synchrotron X-ray analyses of graphite pelitic gneisses in the vicinity of unconformity-type uranium mineralization; *Summary of Investigations. Saskatchewan Geol. Survey*, 132-140.
- Barnicoat A.C., 1997. Hydrothermal gold mineralization in the Witwatersrand basin. *Nature* 386, 820– 824.
- Basson I.J., et Greenway G., 2004. The Rössing uranium deposit: a product of late-kinematic localization of uraniferous granites in the Central Zone of the Damara Orogen, Namibia. *Journal of African Earth Sciences* 38, 413-435.
- Beaufort D., Patrier P., Laverret E., Bruneton P. et Mondy J., 2005. Clay Alteration Associated with Proterozoic Unconformity-Type Uranium Deposits in the East Alligator Rivers Uranium Field, Northern Territory, Australia. *Econ. Geol.*, 100, 515 - 536.
- Boulvais P., Fourcade S., Gruau G., Moine B. et Cuney M., 1998. Persistence of premetamorphic C and O isotopic signatures in marbles subject to Pan-African granulite facies metamorphism and U-Th mineralization (Tranomaro, South East Madagascar). *Chem. Geol.*, 150, 247-262.
- Boulvais P., Fourcade S., Moine B., Gruau G. et Cuney M., 2000. Rare-earth elements distribution in granulite-facies marbles: a witness of fluid-rock interaction, *Lithos*, 53, 117-126.
- Burns P.C. et Finch R.J., 1999. Wyartite: Crystallographic evidence for the first pentavalent-uranium mineral. *Am. Mineral.*, 84, 1456-1460.
- Castor S.B. et Henry C.D., 2000. Geology, geochemistry, and origin of volcanic rock-hosted uranium deposits in northwestern Nevada and southeastern Oregon, USA. *Ore Geol. Rev.* 16, 1-40.
- Cavellec S., 2006. Évolution diagénétique du bassin de Tim Mersoï et conséquences sur la genèse des minéralisations uranifères dans les formations du Guézouman et du Tarat (district d'Arlit-Akokan, Niger). Thèse Univ. Orsay, 463 pages.
- Chabiron A., 1999. Les gisements d'uranium de la caldeira de Strel'tsovska (Transbaïkalie, Russie). Thèse, Univ. Henri Poincaré, Nancy. 266p.
- Chabiron A., Alyoshin A., Cuney M., Golubev V., Velitchkin V., Deloué E. et Poty B., 2001 a. Geochemistry of the rhyolitic magmas associated with the Strel'tsovska U deposits (Transbaikalia): a magmatic inclusion study. *Chem. Geol.*, 175, 273-290.
- Chabiron A. et Cuney M., 2001b. Allanite alteration in the Strel'tsovska granites: A source of uranium. *C.R. Acad. Sci.*, 332, 99-105.
- Chabiron A., Cuney M. et Poty B., 2003. Possible uranium sources for the largest uranium district associated with volcanism: the Stel'tsovska caldera (Transbaikalie, Russia). *Mineralium Deposita*. 38, 127-140.
- Chemillac R. 2003. Géochimie des magmas associés aux gisements d'uranium intravolcaniques. Thèse, Univ. Henri Poincaré, Nancy.
- Chemillac R. Cuney M. et Leroy J., 2003. The Ben Lomond Uranium-Molybdenum deposit related to acid volcanics (Queensland, Australia): Original magma composition and effects of hydrothermal alteration. *In* Cuney M., ed., *Uranium Geochemistry 2003*, Intern. Conf. Proceedings: Univ. Henri Poincaré, Nancy, France.
- Chernyshev I.V. et Golubev V.N., 1996. The Strel'tsovskoye deposit, Eastern Transbaikalia: isotope dating of mineralization in Russia's largest uranium deposit. *Geochemistry Int.*, 34, 834-846.
- Cuney M., 2005. World-class unconformity-related uranium deposits: Key factors for their genesis. 17-21 Août 2005, Society of Applied Geology Conference, Beijing, China.

- Cuney M., Chabiron A., Kister P., Golubev V. et Deloule E., 2002. Chemical versus ion microprobe isotopic dating (Cameca IMS 3f) of the Shea Creek unconformity type uranium deposit (West Athabasca, Saskatchewan, Canada), in Abstracts Volume 27, Geological Association of Canada - Mineralogical Association of Canada, Joint Annual Meeting, Saskatoon.
- Cuney M. et Friedrich M., 1987. Physicochemical and crystal-chemical controls on accessory mineral paragenesis in granitoids. Implications on uranium metallogenesis. *Bull. Minéral.*, 110, 235-247.
- Cuney M. et Mathieu R., 2000. Extreme Light Rare Earth Element mobilization by diagenetic fluids in the geological environment of the Oklo natural reactor zones, Franceville basin, Gabon. *Geology*, 28, 8, 743-746.
- Derome D., 2002. Caractérisation P-T-X-t des circulations fluides à l'interface socle-/couverture dans les bassins gréseux protérozoïques liés aux gisements d'uranium de type discordance. Thèse Université Henri Poincaré, Nancy.
- Derome D., Cuney M., Cathelineau M., Dubessy J. et Bruneton P., 2003. A detailed fluid inclusion study in silicified breccias from the Kombolgie sandstones (Northern Territory, Australia) : application to the genesis of Middle-Proterozoic unconformity-type uranium deposits. *J. of Geochemical Exploration*. 80: 259-275.
- Derome D., Cathelineau M., Cuney M., Fabre C. et Lhomme T., 2005. Evidences of brine mixings in the McArthur River unconformity-type uranium deposit (Saskatchewan, Canada). Implications on genetic models. *Econ. Geol.*, 100, 8, 1529-1545.
- Derome D., Cathelineau M., Fabre C., Boiron M.C., Banks D., Lhomme T. et Cuney M., 2007. Reconstitution of paleo-fluid composition by Raman, LIBS and crushleach techniques: Application to mid-proterozoic evaporitic brines (Kombolgie formation basin, northern territories, Australia). *Chem. Geol.*, 237, in press.
- Fan Hong-hai, Ling Hong-fei et Wang De-zi, 2003. Study on metallogenic mechanism of Xiangshan uranium ore-field, uranium *Geology*, 19, 208-213 (in Chinese).
- Fayek M. et Kyser T.K., 1997. Characterization of multiple fluid events and rare-earth-element mobility associated with formation of unconformity-type uranium deposits in the Athabasca Basin, Saskatchewan. *Can. Mineral.* 35: 627-658.
- Fayek M., Kyser T.K. et Riciputi L.R., 2002. U and Pb isotope analysis of uranium minerals by ion microprobe and the geochronology of the McArthur River and Sue Zone U deposits, Saskatchewan, Canada: *Can. Mineral.* 40, 1553-1569.
- Förster H.J., 1998. The chemical composition of REE-Y-Th-U-rich accessory minerals in peraluminous granites of the Erzgebirge-Fichtelgebirge region, Germany. *Il.xenotime*. *Am. Mineral.* 83, 1302-1315.
- Förster H.J., 2006. Composition and origin of intermediate solid solutions in the system thorite-xenotime-zircon-coffinite. *Lithos*, 88, 1-4, 35-55.
- Frimmel H.E., 2005. Archaean atmospheric evolution: evidence from the Witwatersrand gold fields, South Africa. *Earth-Science Reviews* 70, 1-46.
- Gaboreau S., Cuney M., Quirt D., Beaufort D., Patrier P. et Mathieu R., 2007. Aluminium Phosphate Sulfate minerals associated with Proterozoic unconformity-type deposits in the Athabasca basin, Canada. *Am. Mineral.*, accepté.
- Gerbeaud O., 2006. Evolution structurale du bassin de Tim Mersoï : Le rôle des déformations de la couverture sédimentaire sur la mise en place des gisements uranifères du secteur d'Arlit (Niger). Thèse de l'Université de Paris Sud. 260p.
- Golubev V.N., Cuney M. et Poty B., 2000. Phase composition and U-Pb isotopic systems of pitchblende of quartz-calcite-pitchblende veins at the Schlemma-Alberoda deposit (Erzgebirge). *Geology of Ore Deposits*, 42, 6, 761-773.
- Hajnal Z., Takacs E., White D.J., Györfi I., Powell B. et Koch R., 2005. Regional seismic signature of the basement and crust beneath the McArthur River mine district, Athabasca Basin, Saskatchewan; in Jefferson, C.W., and Delaney, G., eds., EXTECH IV: Geology and Uranium EXploration TEChnology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta. *Geol. Surv. Canada, Bull.* 588, in prep.
- Hecht L. et Cuney M., 2000. Hydrothermal alteration of monazite in the Precambrian basement of the Athabasca basin: implications for the genesis of unconformity related deposits. *Mineralium Deposita*, 35, 791-795.
- Hecht L., Cuney M. et Brouand M., 2003. Tracing the sources of unconformity-type U deposit. ; in Cuney M., ed., *Uranium Geochemistry 2003*, International Conference Proceedings. Université Henri Poincaré, Nancy, France.
- Hiatt E.E., Kyser T.K. et Dalrymple R.W., 2003. Relationships among sedimentology, stratigraphy and diagenesis in the Proterozoic Thelon Basin, Nunavut, Canada: implications for paleo-aquifers and sedimentary-hosted mineral deposits. *J. Geochem. Explor.* 80, 221-240.
- Holk G.J., Kyser T.K., Don Chipley, Hiatt E.E. et Marlatt J., 2003. Mobile Pb-isotopes in Proterozoic sedimentary basins as guides for exploration of uranium deposits. *J. Geochem. Explor.* 80 (2003) 297-320.
- Ishukova L.P., Igoshin Yu.A. et Avdeev B.V. *et al.*, 1998. Geology of the Urukunghuevsky ore district and molybdenum-uranium deposits of the Streltsovsky ore field. *Geoinformmark, Moscow*. 526 p (in Russian).
- Jefferson C.W., Thomas D.J., Gandhi S.S., Ramaekers P., Delaney G., Brisbin D., Cutts C., Portella P. et Olson R.A., 2005. Unconformity associated uranium deposits. In Jefferson C.W., and Delaney G., eds., EXTECH IV: Geology and Uranium EXploration TEChnology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta. *Geol. Surv. Canada, Bull.* 588, (sous presse).
- Jiang Y-H, Ling H-F, Jiang S-Y, Shen W-Z et Fan H-H, Ni P., 2006. Geochemical and isotopic constraints on ore-forming fluid origin and ore genesis of the world-class Xiangshan uranium deposit, SE China. *Econ. Geol.* (sous presse).
- Kister Ph., 2003. Métallogénèse des gisements d'uranium de type discordance et géochronologie. Thèse INPL, Nancy.
- Kister P., Cuney M., Golubev V.N., Royer J.J., Le Carlier De Vesuld Ch. et Rippert J.C., 2004. Radiogenic lead mobility in the Shea Creek unconformity-related uranium deposit (Saskatchewan, Canada): migration pathways and Pb loss quantification. *Comptes Rendus Geosciences*,

- 336, 3, 205-215.
- Kister P., Laverret E., Quirt D., Cuney M., Patrier P., Beaufort D. et Bruneton P., 2006. Mineralogy and geochemistry of the host-rock alterations associated to the Shea Creek unconformity-type uranium deposits (Saskatchewan, Canada), Part 2. Spatial distribution of the Athabasca Group sandstone matrix minerals. *Clays And Clay Minerals*, 54, 295-313.
 - Kister Ph., Vieillard Ph., Cuney M., Quirt D. et Laverret R., 2005. Thermodynamic constraints on the mineralogical and fluid composition in a Proterozoic clastic sedimentary basin: the Athabasca Basin (Saskatchewan, Canada). *European J. of Mineral.*, 17, 325-342.
 - Komninou A. et Sverjensky D.A., 1995. Hydrothermal alteration and the chemistry of ore-forming fluids in an unconformity-type uranium deposit. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 59, 2709-2723.
 - Komninou A. et Sverjensky D.A., 1996. Geochemical modeling of the formation of an unconformity-type uranium deposit. *Econ. Geol.*, 91, 590-606.
 - Kotzer T.G. et Kyser T.K., 1995. Petrogenesis of the Proterozoic Athabasca Basin, northern Saskatchewan, Canada, and its relation to diagenesis, hydrothermal uranium mineralization and paleohydrogeology. *Chem. Geol.* 120, 45-89.
 - Kribek B., Zak K., Spangenberg J.E., Jehlicka J., Prokes S. et Kominek J. 1999. Bitumens in the late Variscan hydrothermal vein-type uranium deposit of Příbram, Czech Republic; sources, radiation-induced alteration, and relation to mineralization. *Econ. Geol.*, 94, 1093-1114.
 - Krylova T., Velitchkin V.I., Poty B., Cuney, Pironon J. et Timofeev A.V., 2000. Nouvelles données sur la composition des fluides minéralisateurs des gisements uranifères de l'Erzgebirge (Allemagne). *Doklady Akad., Nauk.*, 371, 5, 675-677 (en russe).
 - Kyser K., Hiatt E., Renac C., Durocher K., Holk G. et Deckart K., 2000, Chapter 10. Diagenetic fluids in Paleo- and Meso-proterozoic sedimentary basins and their implications for long protracted fluid histories; *in* Kyser K., ed., *Fluids and Basin Evolution: Mineralogical Association of Canada, Short Course Series Volume 28, Calgary 2000* (Series Editor Robert Raeside), 225-262.
 - Landais P., Dubessy J., Dereppe J.M. et Philp, R.P., 1993. Characterization of graphite alteration and bitumen genesis in the Cigar Lake deposit (Saskatchewan, Canada): *Can. J. of Earth Sciences* 30, 743-753.
 - Laverret E., Patrier Mas P., Beaufort D., Kister P., Quirt D., Bruneton P. et Clauer N., 2006. Mineralogy and geochemistry of the host-rock alterations associated with the Shea Creek unconformity-type uranium deposits (Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada). Part 1. Spatial variation of illite properties. *Clays and Clay Minerals* 54 (3), 275-294.
 - Lin S. et Shi Z., 2000. Analysis of metallogenic conditions of sandstone type Uranium deposits in interlayer oxidation zone in the north of Junggar Basin, Xinjiang. *Uranium Geology*, v.16, 193-198 (in Chinese with English abstract).
 - Lorilleux G., 2001. Les brèches associées aux gisements d'U de type discordance du bassin Athabasca (Saskatchewan, Canada). Thèse INPL, Nancy.
 - Lorilleux G., Cuney M., Jebrak M., Rippert J.C. et Portella P., 2003. Chemical brecciation processes in the Sue unconformity-type uranium deposits, Eastern Athabasca Basin (Canada). *J. of Geochemic. Explor.* 80, 241-258.
 - Lorilleux G., Jebrak M., Cuney M. et Baudemont D., 2002. Polyphased hydrothermal breccias associated with unconformity uranium mineralization (Northern Saskatchewan, Canada). *Journal of Structural Geology*, 24, 323-338.
 - Madore C., Annesley I. et Wheatley K., 2000, Petrogenesis, age, and uranium fertility of peraluminous leucogranites and pegmatites of the McClean Lake / Sue and Key Lake / P-Patch deposit areas, Saskatchewan; extended abstract *in* *GeoCanada: the Millennium Geoscience Summit, GAC-MAC, Abst.* 25, 1041, 4 p.
 - Magrina B., Jebrak M. et Cuney M., 2005. Le magmatisme de type A de la région de Kwijibo, Province du Grenville, Canada. Intérêt pour les minéralisations de type fer-oxydes associées. *Can. J. of Earth Sciences.* 42, 10, 1849-1864.
 - Marignac C. et Cuney M., 1999. Ore deposits of the French Massif Central: insight into the metallogenesis of the Variscan collision belt. *Mineralium Deposita*, 34, 472-504.
 - Mathieu R., 1999. Migrations de fluides et de matière dans les champs proches et lointains des réacteurs d'Oklo (Gabon). Thèse INPL, Nancy.
 - Mathieu R., Cuney M. et Cathelineau M., 2000. Geochemistry of paleofluids circulation in the Franceville basin and around Oklo natural reaction zones (Gabon). *J. Geochem. Explor.* 69-70, 245-249.
 - Mathieu R., Zetterström L., Cuney M., Gauthier-Lafaye F. et Hidaka H., 2001. Alteration of monazite and zircon and lead migration as geochemical tracers of fluid paleocirculations around Oklo-Okélobondo and Bangombé natural nuclear reaction zones (Gabon). *Chem. Geol.*, 171, 147-171.
 - McCready A.J., Annesley I.R., Parnell J. et Richardson L.C., 1999, Uranium-bearing Carbonaceous Matter, McArthur River Uranium Deposit, Saskatchewan. Summary of Investigations, Saskatchewan Geological Survey, 110-120.
 - Moine B., Ramambazafy A., Rakotondrazafy M., Ravololomiandrinarivo B., Cuney M. et Parseval P., 1998. The role of fluor-rich fluids in the formation of the thorianite and sapphire deposits from SE Madagascar. *Mineral. Mag.*, 62, 999-1000.
 - Molchanov A.V., 2002. Major unconformities on the Siberian platform and their uranium potential: Examples from the Aldan and Anabar shields: GAC-MAC, Joint Annual Meeting, Saskatoon, Abstracts Volume 27, 76.
 - Nakashima S., Disnar J.R., et Perruchot A., 1999. Precipitation kinetics of uranium by sedimentary organic matter under diagenetic and hydrothermal conditions. *Econ. Geol.*, 94, 993-1006.
 - Nex P.A.M., Kinnaird J.A. et Oliver G.J.H., 2001. Petrology, geochemistry and uranium mineralization of post-collisional magmatism around Goanikontes, southern Central Zone, Damaran Orogen, Namibia. *J. of African Earth Sciences* 33, 481-502.
 - Patrier P., Beaufort D., Bril H., Bonhomme M., Fouillac A.M. et Aumaitre R., 1997. Alteration-mineralization at the Bernardan U deposit (Western Marche, France); the contribution of alteration petrology and

- crystal chemistry of secondary phases to a new genetic model. *Econ. Geol.*, 92, 448-467.
- Peiffert C., Cuney M. et Nguyen Trung C., 1994. Uranium in granitic magmas. Part I : Experimental determination of uranium solubility and fluid-melt partition coefficients in the UO_2 -haplogranite- H_2O - Na_2CO_3 system at 720-770°C, 200 MPa. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58, 11, 2495-2507.
 - Peiffert Ch., Nguyen Trung Ch. et Cuney M., 1996. Uranium in granitic magmas. Part II : Experimental determination of uranium solubility and fluid-melt partition coefficients in the UO_2 - haplogranite - H_2O -halides system at 720-770°C, 200 MPa. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 9, 1515-1529.
 - Philippot P., Menez B., Simionovici A., Chabiron A., Cuney M., Snigirev A. et Snigireva A.I. 2000. X-ray imaging of uranium in individual fluid inclusion. *Terra Nova*, 12, 84-89.
 - Podor R. et Cuney M., 1997. An experimental study of the solid solution between $LaPO_4$ and $(Ca_{0,5}Th_{0,5})PO_4$ at 780°C and 200MPa. *Am. Mineral.* 82, 765-771.
 - Podor R., Cuney M. et Nguyen Trung C., 1995. An experimental study of the solid solution between $LaPO_4$ and $(Ca_{0,5}U_{0,5})PO_4$ at 780°C and 200MPa. *Am. Miner.*, 80, 1261-1268.
 - Polito P.A., Kyser T.K., Marlatt J., Alexandre P., Bajwah Z., et Drever G., 2004, Significance of alteration assemblages for the origin and evolution of the Proterozoic Nabarlek unconformity-related uranium deposit, Northern Territory, Australia. *Econ. Geol.*, 99, 113-139.
 - Portella P. et Annesley I.R. 2000. Paleoproterozoic thermotectonic evolution of the eastern sub-Athabasca basement, northern Saskatchewan: Integrated geophysical and geological data; *in* Summary of Investigations 2000, Volume 2, Saskatchewan Geological Survey, Saskatchewan Energy and Mines, Miscellaneous Report 2000-4.2, 191-200.
 - Quirt D.H., 2003, Athabasca unconformity-type uranium deposits: one deposit type with many variations; *in* Cuney M., ed., Uranium Geochemistry 2003, International Conf. Proceedings. Univ. Henri Poincaré, Nancy, France, 309-312.
 - Raffensperger J.F. et Garven G., 1995a. The formation of unconformity-type uranium ore deposits. 1. Coupled groundwater flow and heat transport modeling. *Am. J. of Science*, 295, 581-636.
 - Raffensperger J.F. et Garven G., 1995b. The formation of unconformity-type uranium ore deposits. 2. Coupled hydrochemical modeling. *Am. J. of Science*, 295, 639-696.
 - Rainbird R.H., Stern R.A., Rayner N. et Jefferson C.W., 2005, Age, provenance, and regional correlation of the Athabasca Group, Saskatchewan and Alberta, constrained by igneous and detrital zircon geochronology; *in* Jefferson, C.W., and Delaney, G., eds., EXTECH IV: Geology and Uranium EXploration TECHnology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta: Geological Survey of Canada, Bulletin 588, in prep.
 - Rakotondrazafy M.A.F., Moine B. et Cuney M., 1996. Mode of formation of Hibonite ($CaAl_2O_9$) in the U-Th skarns from the granulites of S-E Madagascar. *Contrib. Mineral. Petrol.* 123, 190-201.
 - Ramaekers P. et Catuneanu O., 2004, Development and sequences of the Athabasca Basin, Early Proterozoic, Saskatchewan and Alberta, Canada; *in* Eriksson P.G., Altermann W., Nelson D.R., Mueller W.U. and Rayner N.M, Stern R.A. and Rainbird R H., 2003, SHRIMP U-Pb detrital zircon geochronology of Athabasca Group sandstones, northern Saskatchewan and Alberta; Geological Survey of Canada, Current Research, 2003-F2, 20 p.
 - Ramambazafy A., Moine B., Rakotondrazafy M. et Cuney M., 1998. Signification des fluides carboniques dans les granulites et les skarns du S.E. de Madagascar. *C.R. Acad. Sci.* 327, 743-748.
 - Renac C., Kyser T.K., Drever G. et O'Connor T., 2002. Comparison of diagenetic fluids in the Proterozoic Thelon and Athabasca basins, Canada: implications for long protracted fluid histories in stable intracratonic basins. *Can. J. Earth Sci.* 39, 113-132.
 - Sangély L., Michels R., Chaussidon M., Brouand M., Cuney M., Richard L. et Huault V., 2003, Origin of carbonaceous matter in discordance-type uranium ore-deposit of Saskatchewan (Canada): clues to an abiogenic synthesis; *in* Cuney M., ed., Uranium Geochemistry 2003, International Conference Proceedings, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 323-326.
 - Scaillet S, Cheilletz A., Cuney M., Farrar E. et Archibald D., 1996 a. Cooling patterns and mineralization history of the Saint Sylvestre and Western Marche leucogranite plutons, French Massif Central. I - $40Ar/39Ar$ isotopic constraints. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 23, 4653-4671.
 - Scaillet S, Cuney M., Le Carlier De Veslud Ch., Cheilletz A. et Royer J.J., 1996b. Cooling patterns and mineralization history of the Saint-Sylvestre and Western Marche leucogranite plutons, French Massif Central. II - Thermal modelling and implications for the mechanisms of U-mineralization. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 23, 4673-4688.
 - Shock E.L., Sassani D.C. et Betz H., 1997. Uranium in geologic fluids: Estimates of standard partial molal properties, oxidation potentials, and hydrolysis constants at high temperatures and pressures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 4245-4266.
 - Wagani I., 2007. Potentialités uranifères des sources volcaniques envisageables pour la formation des minéralisations de la région d'Arlit (Niger). Thèse, Univ. Orsay, 260 p.
 - Wilson N.S.F., Stasiuk L.D. et Fowler M.G., 2005. Origin of organic matter in the Proterozoic Athabasca Basin of Saskatchewan and Alberta, and significance to unconformity uranium deposits; *in* Jefferson C.W. and Delaney G., eds., EXTECH IV: Geology and Uranium EXploration TECHnology of the Proterozoic Athabasca Basin. Geol Surv. Canada, Bull. 588, in prep.
 - Zhao Z.F., Zheng Y.F., Wei C.S., et Gong B., 2004, Temporal relationship between granite cooling and hydrothermal uranium mineralization at Dalongshan in China: A combined radiometric and oxygen isotopic study. *Ore Geol. Rev.*, 25, 3-4, 221-236.