

Fontenay-aux-Roses, le 31 juillet 2018

**Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté  
nucléaire**

**Avis/IRSN N°** 2018-00218

**Objet :** Avis relatif à la demande du PNGMDR 2016-2018 - Etudes sur les relations entre les flux rejetés d'uranium et de radium dans le réseau hydrographique après traitement et l'accumulation des sédiments marqués dans les étangs, cours d'eau ou zones humides

**Réf.** Voir Annexe 4

Par lettre CODEP-DRC-2017-029800 du 02 août 2017, vous avez sollicité l'avis de l'IRSN sur deux rapports transmis par Orano Mining<sup>1</sup> en novembre 2014 [1] et en janvier 2017 [2], relatifs aux relations entre les flux rejetés d'uranium et de radium dans le réseau hydrographique, après traitement, et l'accumulation de sédiments marqués dans le lac de Saint Clément situé en aval du site des Bois Noirs Limouzat (Loire). Vous demandez, en particulier, l'avis de l'IRSN sur les points suivants :

- la suffisance de la méthodologie retenue par Orano Mining pour établir, sur le principe, une relation entre les flux rejetés par le site des Bois Noirs Limouzat et l'accumulation de sédiments marqués dans le lac de Saint Clément ;
- la pertinence des analyses réalisées dans le cadre de la mise en œuvre de cette méthodologie au regard de l'objectif visé, ainsi que celle de l'interprétation présentée par Orano Mining ;
- la suffisance des éléments fournis par Orano Mining pour statuer sur la mobilité de l'uranium et du radium fixés dans les sédiments marqués du lac de Saint Clément.

**Adresse courrier**  
BP 17  
92262 Fontenay-aux-Roses  
Cedex France

**Siège social**  
31, av. de la Division Leclerc  
92260 Fontenay-aux-Roses  
Standard +33 (0)1 58 35 88 88  
RCS Nanterre B 440 546 018

Ces rapports ont été transmis par Orano Mining en réponse à la demande du PNGMDR d'étudier, afin d'évaluer les différentes options de gestion des sédiments marqués en aval des sites miniers, « *la relation entre les flux rejetés et l'accumulation de sédiments marqués dans les rivières et surtout les lacs, notamment par une étude sur un site de la spéciation de l'uranium dans les eaux et de la caractérisation radiologique fine des sédiments en fonction de leur granulométrie et en fonction du régime hydraulique des cours d'eau* ». Orano Mining a choisi d'engager, en 2011, des travaux de recherche sur l'environnement de l'ancien site minier des Bois Noirs Limouzat (BNL) drainé par la Besbre. Le premier rapport présente les résultats d'Orano Mining sur le transport des radionucléides dans les eaux de la Besbre et la caractérisation des sédiments du lac de Saint Clément [1]. Ces résultats concernent les processus responsables de l'accumulation de sédiments radiologiquement marqués en aval du site des BNL, les phases porteuses sur lesquelles se fixent les radionucléides et la

---

<sup>1</sup> Areva Mines est devenu Orano Mining depuis janvier 2018

stabilité de ces phases en fonction des conditions physico-chimiques. Orano Mining en déduit l'évolution du comportement de l'uranium et du radium 226 dans les sédiments pour différents scénarios de gestion des sédiments du lac de Saint Clément (maintien en place, curage et stockage sur un site existant ou dans une installation dédiée). En parallèle des études réalisées sur l'uranium et le radium, Orano Mining a effectué des caractérisations minéralogiques complémentaires afin de déterminer si le marquage polymétallique (cuivre, étain...) présent dans les sédiments du lac de Saint Clément est attribuable au site des BNL. Les résultats de cette étude sont présentés dans le second rapport [2]. Orano Mining indique ([3] et [4]) que ces documents sont des rapports d'avancement et que les études présentées seront complétées par des caractérisations microbiologiques et des analyses des eaux porales des sédiments du lac de Saint Clément conformément à l'article 65 de l'arrêté du 23 février 2017 établissant les prescriptions du PNGMDR.

L'examen par l'IRSN des deux rapports précités et des compléments apportés par Orano Mining au cours de l'instruction appelle les remarques suivantes.

#### 1. Méthodologie retenue par Orano Mining

La méthodologie retenue par Orano Mining pour établir la relation entre les flux de radionucléides rejetés et leur accumulation dans les sédiments repose sur une approche centrée sur trois aspects appliquée au site des BNL :

- l'étude des mécanismes à l'origine du transport de l'uranium et du radium 226 dans les eaux depuis l'ancien site minier des BNL jusqu'au lac de Saint Clément, via la rivière Besbre ;
- l'étude de l'accumulation des radionucléides dans le lac de Saint Clément au travers de la caractérisation radiologique, chimique et minéralogique des sédiments de ce lac ;
- la reconstitution des flux de radionucléides rejetés par le site des BNL, du début de son exploitation jusqu'à nos jours.

S'agissant de la sélection du site d'étude, Orano Mining a retenu le site des BNL qui est un ancien site minier d'uranium exploité entre 1955 et 1980 situé dans le bassin versant de la Besbre. Entre 1960 et 1980, une usine de traitement du minerai d'uranium a été implantée sur le site et a produit 6919 tonnes d'uranium ainsi que 1,419 millions de tonnes de résidus. Les résidus sont stockés sur le site, dans un grand bassin sous une lame d'eau retenue par une digue (cf. annexe 2 au présent avis). Depuis 1981, les eaux en provenance des travaux miniers souterrains, celles provenant d'une partie des drains de la digue et les eaux de ruissellement sont traitées par une station située au pied de la digue, avant leur rejet dans la Besbre. Les autres eaux du site (notamment les rejets diffus et les eaux de surverse du grand bassin) sont rejetées directement dans l'environnement, en particulier dans la Besbre. D'autres anciennes mines polymétalliques, dont la mine de Charrier (mine de cuivre, de plomb et d'étain), localisées en aval du site des BNL se trouvent également dans le bassin versant de la Besbre. Le site a été choisi par Orano Mining du fait de sa configuration relativement simple : une seule source anthropique de radionucléides (le site des BNL), un seul vecteur de transport (la Besbre) et une seule retenue d'eau réceptrice (le lac de Saint Clément). Le lac a été mis en eau au début des années 30 antérieurement à l'exploitation de la mine des BNL. Compte tenu de l'ensemble de ces éléments, Orano Mining conclut que le lac de Saint Clément constitue un site privilégié pour étudier la relation entre les flux de radionucléides rejetés et l'accumulation de sédiments marqués. **L'IRSN considère que le choix du site des BNL comme site d'étude est effectivement pertinent pour répondre à la demande du PNGMDR.**

S'agissant de l'étude des mécanismes à l'origine du transport de l'uranium et du radium 226 dans les eaux de la Besbre, entre le rejet du site des BNL et le lac de Saint Clément, Orano Mining a analysé la répartition de ces deux éléments entre les différentes fractions présentes dans les eaux (particulaire, colloïdale et « vrai dissous »). A cet égard, l'activité de la fraction particulaire est déterminée par différence entre l'activité de l'eau brute et celle de l'eau filtrée à 0,22 µm ou 0,45 µm. L'activité de la fraction colloïdale est déterminée en soustrayant l'activité de la solution ultrafiltrée (correspondant à la fraction « vrai dissous ») à l'activité de la fraction filtrée à 0,22 µm ou 0,45 µm. Lorsque que l'activité de l'eau brute et des filtrats est équivalente, alors l'espèce est entièrement sous forme dissoute. Ces fractions ont été collectées en 3 points de prélèvements : en amont du site, au rejet de la station de traitement des eaux et en aval du site juste avant le lac de Saint Clément (points Amont, Rejet BNL et CEE, cf. annexe 3 au présent avis). En complément de ces analyses, Orano Mining a également réalisé une caractérisation de la chimie des eaux ainsi que des mesures des éléments majeurs et traces (Al, Fe, Mn et Ba) dans les trois fractions. Les résultats des analyses ont été croisés avec des calculs de spéciation de l'uranium et du radium dans les eaux de la Besbre. L'étude de l'évolution de ces différents paramètres au niveau de ces 3 points a permis à Orano Mining d'apprécier la capacité des différentes fractions des eaux à transporter les radionucléides entre le site des BNL et le lac de Saint Clément. **Les points de prélèvements retenus et l'approche mise en œuvre, classiquement utilisée pour caractériser les mécanismes de transport d'un élément dans l'eau, n'appellent pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

S'agissant de l'étude de l'accumulation des radionucléides dans les sédiments du lac, Orano Mining a réalisé des carottages dans les sédiments en différents endroits du lac (zone amont, zone intermédiaire et zone aval proche du barrage). Sur chacune des carottes prélevées, des analyses radiologiques, chimiques et minéralogiques ont été pratiquées afin de préciser le lien entre les rejets miniers et l'accumulation des radionucléides et des métaux observée dans les sédiments du lac de Saint Clément en combinant différentes informations :

- l'origine du marquage radiologique en radionucléides dans les sédiments à partir de la mesure des principaux radionucléides de la chaîne de l'uranium 238 et de leurs rapports d'activités. L'exploitant considère que si l'uranium 238 et ses descendants sont à l'équilibre séculaire alors ils sont issus d'un apport naturel détritique provenant de l'érosion du bassin versant tandis qu'un déséquilibre est un marqueur d'un apport d'uranium sous forme dissoute d'origine anthropique. L'IRSN considère qu'en première approche l'étude des rapports d'activité  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  peut apporter des informations sur l'apport détritique mais relève que des déséquilibres radioactifs  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  existent dans les milieux naturels comme les sols et les sédiments [5]. Aussi, la seule étude des déséquilibres radioactifs de la chaîne de l'uranium 238 n'est pas suffisante pour déterminer l'origine naturelle ou anthropique des radionucléides. **En conséquence, l'IRSN recommande qu'Orano Mining fournisse des éléments complémentaires permettant de confirmer l'origine du marquage radiologique dans le lac de Saint Clément.** A cet égard l'étude du traçage des sources par l'analyse des isotopes stables du plomb peut être une approche à explorer [6];
- l'origine du marquage en éléments polymétalliques dans les sédiments du lac de Saint Clément à partir de caractérisations minéralogiques d'échantillons de résidus et de stériles de l'ancienne mine de Charrier ([1] et [2]) ;
- l'historique des dépôts sédimentaires à partir d'une étude radiochronologique basée sur l'étude du profil du césium 137 dans les carottes afin de procéder à la datation des dépôts sédimentaires. Au cours de l'instruction, Orano Mining a indiqué que des mesures d'américium 241 ont également été réalisées. Cette méthode a été appliquée afin de calculer un taux de

sédimentation dans les différentes parties du lac puis d'établir une corrélation entre les activités du site des BNL et les profils d'activité massique en uranium 238 et en radium 226 mis en évidence dans les carottes de sédiments. Cette méthode de datation permet de tracer des événements postérieurs à 1963 en prenant pour référence, d'une part les dépôts de césium 137 attribués aux essais nucléaires atmosphériques (1963-1964), qui ont la caractéristique d'être associés aux dépôts d'américium 241, et, d'autre part, les dépôts en césium 137 seul liés aux retombées de l'accident de Tchernobyl (1986). L'IRSN observe que l'exploitation du pic de césium 137 associé à un pic significatif d'américium 241 a déjà été utilisée pour dater les dépôts sédimentaires de lacs du Massif Central (Aydat et Villerest) situés à moins de 100 km du lac de Saint Clément ([7] à [9]). Aussi, l'IRSN considère que la méthode retenue par Orano Mining pour dater les sédiments et déterminer des taux de sédimentation au niveau du lac de Saint-Clément est, sur le principe, adaptée pour reconstituer l'historique des dépôts sédimentaires.

S'agissant de la reconstitution des flux de radionucléides rejetés par la station de traitement des eaux du site des BNL, Orano Mining a établi une corrélation qualitative entre les variations des concentrations de l'uranium 238 et du radium 226 dans les sédiments en fonction de la profondeur et les événements ayant marqué l'activité du site des BNL après 1981, notamment le réaménagement du site. Ainsi les flux à la sortie de la station de traitement des eaux ont été obtenus en multipliant le débit des rejets par la concentration de l'élément d'intérêt. Ces flux ont été mis en regard avec l'historique des dépôts sédimentaires obtenu par datation (cf. *supra*). L'IRSN considère qu'Orano Mining a, sur ce point, exploité au mieux les données en sa possession.

## 2. Pertinence des analyses réalisées au regard de l'objectif visé et de leur interprétation par Orano Mining

S'agissant de l'étude des mécanismes de transport de l'uranium et du radium 226 dans les eaux de la Besbre, Orano Mining a effectué des caractérisations radiologiques de différentes fractions des eaux (particulaire, colloïdale et « vrai dissous ») obtenues suite à des opérations de filtration simple à 0,22 µm ou 0,45 µm et d'ultrafiltration. En complément, Orano Mining a réalisé des calculs de spéciation de l'uranium et du radium 226 dans les eaux de la Besbre, à l'aide du logiciel PHREEQC en utilisant les constantes thermodynamiques issues des revues de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN).

Pour ce qui concerne l'uranium, les résultats des mesures dans les échantillons d'eaux brutes, filtrées et ultrafiltrées, prélevés en amont du site et au point de rejet du site (points Amont et Rejet BNL, cf. annexe 3 au présent avis) étant équivalentes et toutes supérieures à la limite de détection (1 µg/L), Orano Mining en conclut que ce radionucléide est transporté sous forme dissoute (*i.e.* dans la fraction « vrai dissous »). En revanche, les résultats des mesures dans les différentes fractions des échantillons prélevés à l'aval du site juste avant le lac de Saint Clément (point CEE, cf. annexe 3 au présent avis) sont toutes inférieures à la limite de détection. Orano Mining en déduit qu'il n'est pas possible d'écarter la présence d'uranium sous forme colloïdale et/ou particulaire. Toutefois, en conclusion de son étude sur les mécanismes de transport, Orano Mining retient que l'uranium se trouve à 100 % dans la fraction « vrai dissous » [1]. Pour ce qui concerne le radium 226, Orano Mining indique que les résultats des mesures dans les échantillons d'eaux brutes, filtrées et ultrafiltrées, prélevés aux 3 points de prélèvement sont équivalents. Orano Mining en déduit que ce radionucléide est transporté

sous forme dissoute. En outre, les calculs de spéciation de l'uranium et du radium 226 dans les eaux de la Besbre conduisent Orano Mining à confirmer que ces radionucléides sont majoritairement sous forme dissoute. Toutefois Orano Mining indique que l'adsorption de l'uranium et du radium sur des colloïdes ou des particules présentes dans la Besbre ne peut être exclue.

L'IRSN convient, sur la base des éléments présentés par Orano Mining, que l'uranium et le radium 226 sont vraisemblablement majoritairement sous forme dissoute dans les eaux de la Besbre. Cependant, l'IRSN constate que la limite de détection de la technique d'analyse de l'uranium utilisée par Orano Mining est trop élevée pour lever le doute sur l'existence de formes colloïdales ou particulaires de l'uranium. **En conséquence, l'IRSN recommande qu'Orano Mining valide ses conclusions sur l'existence ou non d'un transport colloïdal ou particulaire d'uranium pour le point CEE, notamment en réalisant des mesures par des moyens analytiques présentant une limite de détection adaptée au besoin de l'étude.**

En complément, l'IRSN note qu'Orano Mining a prévu de déterminer la concentration de l'uranium et du radium dans la fraction « vrai dissous » de l'eau de la Besbre en utilisant des dispositifs DGT (Diffusive Gels in Thin films). Ces dispositifs, constitués d'un filtre, d'une couche de diffusion et d'une résine, permettent de déduire la concentration de l'élément d'intérêt à partir de la quantité piégée sur la résine pendant la durée de leur déploiement. Ces résultats, présentés dans un prochain rapport, pourront être confrontés aux mesures sur la fraction « vrai dissous » des eaux obtenues par ultrafiltration. L'IRSN estime que les protocoles relatifs à la préparation et à la validation des dispositifs DGT retenus par Orano Mining sont, de manière générale, adaptés à la mesure des radionucléides dans des eaux naturelles de rivière, caractérisées par des pH proches de la neutralité et des conditions généralement oxydantes et donc *a priori* adaptés pour la Besbre. Cependant, au vu de la sensibilité des dispositifs DGT à de nombreux paramètres du milieu d'étude (pH, présence d'ions compétiteurs, température, développement d'un film bactérien etc. [10]), **l'IRSN recommande qu'Orano Mining détermine, préalablement à leur déploiement, les conditions d'utilisation de ces dispositifs pour l'eau de la Besbre.**

Enfin, l'IRSN appelle l'attention sur le fait que les résultats obtenus par Orano Mining sur les mécanismes de transport l'ont été pour la configuration actuelle de la station de traitement des eaux du site des BNL. Dans la mesure où des évolutions de cette station sont envisagées (procédé de traitement, dimensionnement, nature des eaux traitées), l'IRSN considère qu'Orano Mining devra en évaluer l'impact sur les mécanismes de transport de l'uranium et du radium dans les eaux précédemment présentés.

S'agissant de la datation des dépôts sédimentaires, Orano Mining différencie deux pics de césium 137 sur les profils de concentration de ce radionucléide réalisés sur les carottages sédimentaires du lac de Saint Clément. Orano Mining attribue le premier pic aux retombées de l'accident de Tchernobyl et le second aux anciens essais nucléaires atmosphériques ce qui lui permet d'associer les concentrations en uranium 238 et en radium 226 dans les sédiments aux événements survenus sur le site des BNL, du début de son exploitation dans les années 50 jusqu'à nos jours.

L'IRSN relève que le pic attribué par Orano Mining aux essais nucléaires n'est pas accompagné d'un pic d'américium 241 (valeurs inférieures à la limite de détection). L'IRSN considère qu'il conviendrait de s'assurer que la limite de détection pour la mesure de l'américium 241 est suffisamment basse pour valider l'absence ou la présence de ce radionucléide. A cet égard, dans le cadre d'une étude à laquelle l'IRSN a contribué [11], des mesures de césium 137 et d'américium 241 ont été réalisées sur des échantillons de carottes de longueurs équivalentes à celles de l'étude d'Orano Mining. Ces mesures ont indiqué l'absence d'américium 241 dans l'ensemble de la carotte et n'ont permis d'identifier qu'un seul pic de césium 137 qui est attribuable avec certitude aux retombées de

l'accident de Tchernobyl. Les niveaux de césium 137 observés dans les sédiments déposés antérieurement à Tchernobyl sont, selon l'IRSN, attribuables à la rémanence des retombées des essais nucléaires. Le pic correspondant aux essais, s'il est observable, est vraisemblablement situé plus en profondeur que les carottages effectués. **En conséquence, l'IRSN considère que les résultats des mesures de césium 137 et d'américium 241 obtenus par Orano Mining ne permettent pas, à eux seuls, de valider l'attribution du second pic aux essais nucléaires atmosphériques. De ce fait, l'IRSN estime que seul le taux de sédimentation calculé à partir du pic attribué à l'accident de Tchernobyl est utilisable.**

S'agissant enfin de la corrélation qualitative établie par Orano Mining entre les variations des activités massiques de l'uranium 238 et du radium 226 dans les sédiments et la reconstitution des flux de radionucléides rejetés par le site, le résultat le plus marquant est l'association d'un fort marquage en radionucléides des sédiments à des travaux de réaménagement du site qui ont été réalisés dans les années 80. L'IRSN considère que cette hypothèse est très vraisemblable.

### 3. Suffisance des éléments fournis par Orano Mining pour statuer sur la mobilité de l'uranium et du radium dans les sédiments du lac

Afin d'évaluer la mobilité de l'uranium et du radium dans les sédiments, Orano Mining a déterminé l'état d'oxydoréduction du sédiment et la ou les phases porteuses des radionucléides étudiés dans la phase solide du sédiment. Orano Mining s'appuie sur ces informations pour statuer sur la stabilité des phases porteuses d'uranium et de radium en fonction des conditions physico-chimiques présentes dans le sédiment et évaluer l'évolution du comportement de l'uranium et du radium dans les sédiments en fonction de différents scénarios de gestion des sédiments du lac de Saint Clément. Orano Mining indique par ailleurs qu'il fournira, dans un prochain rapport, les résultats des analyses des radionucléides dans les eaux porales, ainsi que des éléments sur la microbiologie des sédiments.

Pour ce qui concerne l'étude de l'état d'oxydoréduction du sédiment, les travaux d'Orano Mining ont consisté, d'une part en l'interprétation des teneurs totales en soufre dans les carottes de sédiments et, d'autre part, en l'identification de phases minérales soufrées réduites comme la pyrite framboïdale. Les résultats d'Orano Mining suggèrent que les conditions réductrices apparaissent à des profondeurs variables selon les carottes (de 0 à 54 cm).

Pour ce qui concerne la détermination des phases porteuses du radium dans la phase solide du sédiment, Orano Mining retient, à ce stade de l'étude, différentes phases porteuses notamment les monazites, les xénotimes, la barytine, la matière organique, les oxhydroxydes de fer et de manganèse. Pour ce qui concerne la détermination des phases porteuses d'uranium dans la phase solide du sédiment, Orano Mining a mis en évidence dans la majorité des échantillons principalement des minéraux détritiques (monazite et zircon). Dans 3 échantillons, quelques phases néoformées (uraninite et méta-torbernite) issues d'un transport d'uranium seul sous forme dissoute ont également été observées. Orano Mining indique que l'ensemble des phases observées sont stables et conclut que l'uranium est immobile quelles que soient les conditions d'oxydoréduction, en l'absence de perturbation des sédiments du lac de Saint Clément.

Concernant l'état d'oxydoréduction, l'IRSN a montré, à travers ses travaux collaboratifs avec le CNRS sur la mobilité de l'uranium et du radium dans les sédiments du lac de Saint Clément [12], l'apparition de conditions réductrices seulement quelques millimètres sous l'interface eau-sédiment

et ce quelle que soit la localisation du prélèvement étudié. Concernant les phases porteuses du radium dans la phase solide du sédiment, l'IRSN convient que leur identification directe est techniquement complexe. Toutefois, les phases porteuses de radium proposées par Orano Mining sont en accord avec la littérature scientifique. Concernant les phases porteuses de l'uranium dans la phase solide du sédiment, l'IRSN considère que les minéraux détritiques contenant de l'uranium, comme les zircons, peuvent être effectivement détectés dans les sédiments du lac de Saint Clément. Cependant, les études menées par l'Institut montrent [12], au travers des résultats d'analyses spectroscopiques sur rayonnement synchrotron, que 60 à 80% de l'uranium est adsorbé sur des surfaces minérales ou organiques, beaucoup plus sensibles à la remobilisation/dissolution. Les différences d'observation entre Orano Mining et l'IRSN concernant l'état d'oxydoréduction et l'identification des phases porteuses pourraient s'expliquer par le protocole de conservation des échantillons. En effet, de manière générale, l'étude de la mobilité de l'uranium et du radium dans les sédiments nécessite la conservation des conditions d'oxydoréduction des échantillons prélevés, en limitant leur contact avec l'oxygène de l'air pour éviter l'oxydation d'une phase réduite en une phase oxydée. Orano Mining a indiqué dans le cadre de l'instruction que les échantillons ont été congelés sans précaution particulière pour limiter leur contact avec l'oxygène de l'air.

**Compte tenu de l'ensemble de ces éléments, l'IRSN estime que les études transmises par Orano Mining ne permettent pas de valider les résultats sur l'état d'oxydoréduction des sédiments du lac de Saint Clément et les phases porteuses de l'uranium et considère que les conclusions d'Orano Mining sur la stabilité des phases porteuses de l'uranium ne sont, à ce stade de l'étude, pas démontrées. Aussi, l'IRSN recommande qu'Orano Mining mette en œuvre des techniques d'analyses plus poussées pour l'identification des phases porteuses de l'uranium, notamment les formes adsorbées sur des surfaces minérales ou organiques. Ces compléments sont un préalable pour statuer sur la mobilité de l'uranium présent dans les sédiments et évaluer la pertinence des différents scénarios de gestion envisageables de ces sédiments.**

En complément, Orano Mining prévoit d'utiliser des dispositifs DGT pour étudier la distribution de l'uranium et du radium dans les eaux porales des sédiments du lac. L'IRSN rappelle (cf. *supra*) que les dispositifs DGT choisis par Orano Mining ne sont, à l'heure actuelle, pas applicables à l'étude de la mobilité des radionucléides dans les eaux porales d'un sédiment dans la mesure où ils ont été validés pour des eaux naturelles en conditions généralement oxydantes. Or, l'IRSN rappelle, sur ce point, que des conditions réductrices ont été observées dès les premiers millimètres sous l'interface eau-sédiment dans le lac de Saint Clément [12]. **Aussi, l'IRSN recommande qu'Orano Mining justifie la faisabilité de l'utilisation des dispositifs DGT pour l'étude des eaux porales des sédiments en prenant notamment en compte l'effet des ions compétiteurs de l'uranium et du radium et les conditions d'oxydoréduction régnautes dans les sédiments.**

#### 4. Conclusion

L'étude réalisée par Orano Mining dans le cadre du PNGMDR présente un ensemble important de nouvelles données de caractérisation chimique, radiologique et minéralogique des sédiments du lac de Saint Clément. Bien que la méthodologie retenue par Orano Mining pour répondre à la demande du PNGMDR soit globalement satisfaisante, des compléments et des éléments de validation doivent être apportés afin d'évaluer la pertinence des différents scénarios envisageables pour la gestion des sédiments du lac de Saint Clément. Ainsi, des travaux complémentaires doivent être menés par Orano

Mining, tout particulièrement sur la caractérisation des formes de l'uranium adsorbées sur des surfaces minérales ou organiques, formes les plus sensibles à la remobilisation/dissolution. Les résultats des études complémentaires de caractérisation microbiologique et des eaux porales, annoncées par Orano Mining, devraient également apporter des éléments essentiels à la compréhension des processus de mobilité de l'uranium et du radium dans les sédiments. En outre, certains résultats acquis à ce stade par l'exploitant devront être consolidés et, pour partie, validés en tenant compte des recommandations et observations formulées par l'IRSN et rappelées en annexe 1 au présent avis.

Pour le directeur général et par délégation

BESNUS François

Directeur de l'Environnement



**Annexe 1 : Recommandations de l'IRSN**

**R1 :** l'IRSN recommande qu'Orano Mining fournisse des éléments complémentaires permettant de confirmer l'origine du marquage radiologique dans le lac de Saint Clément.

**R2 :** l'IRSN recommande qu'Orano Mining valide ses conclusions sur l'existence ou non d'un transport colloïdal ou particulaire d'uranium pour le point CEE, notamment en réalisant des mesures par des moyens analytiques présentant une limite de détection adaptée au besoin de l'étude.

**R3 :** au vu de la sensibilité des dispositifs DGT à de nombreux paramètres du milieu d'étude (pH, présence d'ions compétiteurs, température, développement d'un film bactérien etc.), l'IRSN recommande qu'Orano Mining détermine, préalablement à leur déploiement, les conditions d'utilisation de ces dispositifs pour l'eau de la Besbre.

**R4 :** l'IRSN recommande qu'Orano Mining mette en œuvre des techniques d'analyses plus poussées pour l'identification des phases porteuses de l'uranium, notamment les formes adsorbées sur des surfaces minérales ou organiques.

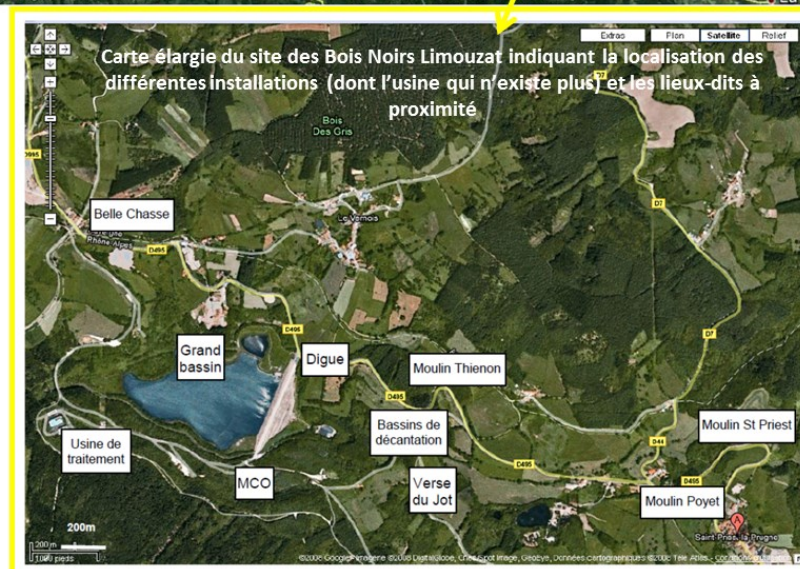
**R5 :** l'IRSN recommande qu'Orano Mining justifie la faisabilité de l'utilisation des dispositifs DGT pour l'étude des eaux porales des sédiments en prenant notamment en compte l'effet des ions compétiteurs de l'uranium et du radium et les conditions d'oxydoréduction régnantes dans les sédiments.

**Annexe 2 : Réseau hydrologique et mines présentes entre le site des Bois Noirs Limouzat et le Lac de Saint Clément**

**Carte du site des Bois Noirs Limouzat**

Source : Areva, Novembre 2014, Relation entre les flux rejetés par le site de Bois Noirs-Limouzat et l'accumulation de sédiments marqués dans le lac de Saint-Clément-Rapport intermédiaire-Ref : AMS-DEXP-DRD-RT-0044

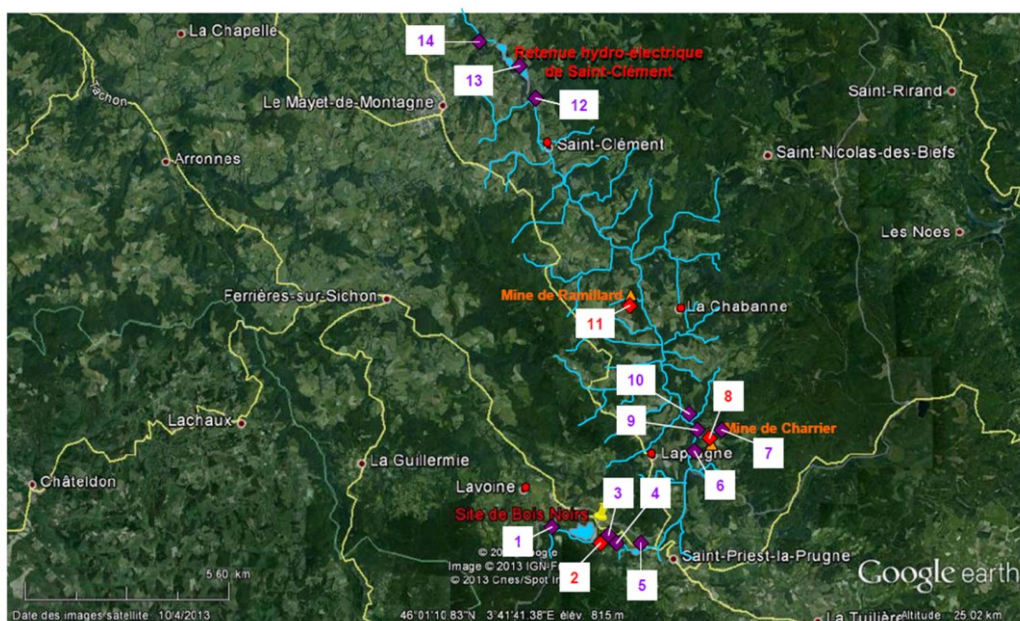
**Réseau hydrologique et mines présentes entre le site des Bois Noirs Limouzat et le lac de St Clément**



Annexe 3 : Carte des points de prélèvement d'eau

**Avec** : 1: Amont ; 2: Rejet BNL ; 3: Aval BNL-0m ; 4: Aval BNL-10m ; 5: Paradou ; 6: Pré-Charrier ; 7: Amont ruisseau Charrier ; 8: Charrier ; 9: Post Charrier ; 10: GIT ; 11: Ramillard ; 12: CEE ; 13: Lac de Saint Clément ; 14: Aval Saint Clément

Source : Areva, Novembre 2014, Relation entre les flux rejetés par le site de Bois Noirs-Limouzat et l'accumulation de sédiments marqués dans le lac de Saint-Clément-Rapport intermédiaire-Ref : AMS-DEXP-DRD-RT-0044



Annexe 4 : Références bibliographiques

- [1] Areva, Novembre 2014, *Relation entre les flux rejetés par le site de Bois Noirs-Limouzat et l'accumulation de sédiments marqués dans le lac de Saint-Clément-Rapport intermédiaire-Ref : AMS-DEXP-DRD-RT-0044.*
- [2] Areva, Janvier 2017, *Relation entre les flux rejetés par le site de Bois Noirs-Limouzat et l'accumulation de sédiments marqués dans le lac de Saint-Clément - 2nd rapport d'avancement-Ref : AMS-DOP-RDR-NT-0101.*
- [3] Areva, 21/11/2014, *Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs 2013-2015-Ref : AMS-DSIT-DIR-CE-0004.*
- [4] Areva, 23/01/2017, *PNGMDR 2016/2018 : Rapport d'avancement de l'étude AREVA Mines sur la relation entre les flux rejetés et l'accumulation de sédiments marqués dans les lacs-Ref : AMS-DSIT-DIR-CE-0008.*
- [5] Dowdall, M.; O'Dea, J., 2002,  *$^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  disequilibrium in an upland organic soil exhibiting elevated natural radioactivity.* Journal of environmental radioactivity, 59, (1), 91-104.
- [6] Cuvier, A., Pourcelot L., Probst A, Prunier J., Le Roux J., 2016, *Trace elements and Pb isotopes in soils and sediments impacted by uranium mining,* Science of the Total Environment 566-567, 238-249.
- [7] Lavrieux, M.; Disnar, J.-R.; Chapron, E.; Bréheret, J.-G.; Jacob, J.; Miras, Y.; Reyss, J.-L.; Andrieu-Ponel, V.; Arnaud, F., 2013, *6700 yr sedimentary record of climatic and anthropogenic signals in Lake Aydat (French Massif Central).* The Holocene, 23, 1317-1328.
- [8] Dhivert, E.; Grosbois, C.; Coynel, A.; Lefèvre, I.; Desmet, M., 2015, *Influences of major flood sediment inputs on sedimentary and geochemical signals archived in a reservoir core (Upper Loire Basin, France).* Catena, 126, 75-85.
- [9] Latour, D.; Salençon, M. J.; Reyss, J. L.; Giraudet, H., 2007, *Sedimentary imprint of microcystis aeruginosa (cyanobacteria) blooms in Grangent Reservoir (Loire, France).* Journal of Phycology, 43, 417-425.
- [10] Davison W. , 2016, *Diffusive Gradients in thin-films for environmental measurements,* Cambridge - Environmental Chemistry.
- [11] Reyss, J.-L.; Mangeret, A.; Courbet, C.; Bassot, S.; Alcalde, G.; Thouvenot, A.; Guillevic, J., 2016, *Estimation of sedimentation rates based on the excess of radium 228 in granitic reservoir sediments.* Journal of environmental radioactivity, 162, 8-13.
- [12] Stetten, L.; Mangeret, A.; Brest, J.; Seder-Colomina, M.; Le Pape, P.; Ikogou, M.; Zeyen, N.; Thouvenot, A.; Julien, A.; Alcalde, G.; Reyss, J. L.; Bombled, B.; Rabouille, C.; Olivi, L.; Proux, O.; Cazala, C.; 2018, Morin, G., *Geochemical control on the reduction of U(VI) to mononuclear U(IV) species in lacustrine sediments.* Geochimica et Cosmochimica Acta, 222, 171-186.