



Rapport de stage

THEME

Traçage des apports d'eau de nappe dans les rivières à l'aide du radon

Nom de l'étudiante :

Olabissi Bilkissou SADISSOU

Tuteur de stage :

Adriano MAYER (MCF)

L3/STE- 2022-2023

Table des matières

REMERCIEMENT	4
I. Introduction	5
II- Contexte du sujet	6
III. Revue Bibliographique	6
1.Rappel théorique sur le radon	6
2.Le radon comme traceur hydrologique	6
IV- Localisation du site d'étude	8
V. Matériels et méthodes	10
VI. Résultats et discussion	17
VII. Conclusion	22
Annexe 1 :	23
Annexe 2 :	24
Références Bibliographiques	25

REMERCIEMENT

Je tiens à remercier Mr Adriano MAYER, mon responsable de stage pour son aide, disponibilité et sa gentillesse pour m'avoir accompagné tout au long du stage.

I. Introduction

Le réchauffement climatique entraîne une augmentation de température et une modification des précipitations, ce qui peut entraîner une diminution des débits des rivières et une baisse du niveau des nappes phréatiques. Les échanges entre les nappes phréatiques et les rivières peuvent aider à atténuer ces impacts en fournissant de l'eau aux rivières pendant les périodes de faible débit et en reconstituant les réserves d'eau souterraines.

Les échanges hyporhéïques sont également importants pour : 1) recharger les nappes, 2) filtrer l'eau des rivières et éliminer les particules fines et les polluants qu'y peuvent être adsorbés, 3) constituer un habitats privilégié pour la reproduction les organismes aquatiques, en particulière les invertébrés à la base de le chaine alimentaire dans les rivières, 4) tamponner les variations de température de l'eau des rivières dans les périodes d'étiage et ainsi réduire la vulnérabilité des organisme sténothermes vivants dans les rivières.

Le travail de stage s'insère dans le cadre d'une étude plus vaste, effectué récemment sur la rivière Cèze, où un traçage des apports d'eau de nappe avait déjà effectué en 2016, et qui a mis en évidence les secteurs de cette rivière affectés par des entrées d'eau souterraine, sans pouvoir toutefois les évaluer précisément. En effet, il n'était pas possible dans cette étude de séparer la contribution du radon déterminée par les entrées nette d'eau de nappe à partir de l'aquifère karstique, où se trouve cette rivière, des contributions du radon dues aux échanges avec la zone hyporhéïque qu'accompagne la rivière dans les mêmes secteurs. Pour séparer ces deux contributions et déterminer les apports nets d'eau de nappe dans la rivière en se basant sur un bilan de masse du radon, il fallait déterminer expérimentalement l'activité du radon de l'eau interstitielle de la zone hyporhéïque. Le travail de stage effectué au laboratoire d'Avignon Université a consisté dans une série de mesures de l'activité de l'eau interstitielle extraite à partir d'une série d'échantillons de sédiments prélevés dans les bancs de galets de la rivière Cèze, dans l'objectif de trouver la signature isotopique de cette eau. Une partie des activités de recherche a eu l'objectif de mettre en place un premier protocole d'analyse pour effectuer ce type de mesures et mettre en évidence des possibles inconvénients.

Ce rapport présente la méthodologie utilisée, l'ensemble des résultats et les interprétations sur l'analyse des eaux interstitielles des sédiments.

II- Contexte du sujet

La Cèze est une rivière située dans le sud de la France, principalement dans le département du Gard. Elle est connue pour sa biodiversité, son importance pour l'agriculture locale, ses activités de loisirs et son attractivité touristique. Elle connaît de grandes crues en automne et printemps mais aussi des périodes de très basses eaux en été. Cependant, des problèmes liés à la période d'étiage entraînent des conflits de pompage d'eau souterraine. Ce site connaît souvent des manques d'eau en période d'étiage provoquant des conflits d'usage et un manque de cohérence entre les politiques territoriales. C'est pourquoi la DCE (Directive Cadre sur l'Eau) a confié à la ZABR (Zone d'Atelier Bassin du Rhône) en 2016 pour mission de localiser et quantifier les échanges nappes d'eau souterraine – rivière de plusieurs façons différentes afin de fixer un seuil de pompage des nappes à la population. A travers ce stage, nous avons effectué le traçage au radon sur des sédiments qui ont été échantillonnés lors des études précédentes.

III. Revue Bibliographique

1.Rappel théorique sur le radon

Le radon est un gaz radioactif. Il est incolore, inodore et insipide, ce qui rend difficile sa détection sans équipement spécialisé. Les propriétés du radon ont été largement étudiées dans le cadre de l'utilisation de ce gaz comme traceur hydrologique. Le radon présent dans les eaux souterraines provient généralement de la désintégration radioactive de l'uranium et du thorium présents dans les sols et les roches. La mesure du radon est essentielle pour l'utilisation de ce gaz comme traceur hydrologique. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour mesurer la concentration de radon dans l'eau et l'air, telles que la spectrométrie gamma et les détecteurs à semi-conducteurs. Le radon-222 est facilement détectable et a une demi-vie de 3,8 jours.

Production du radon

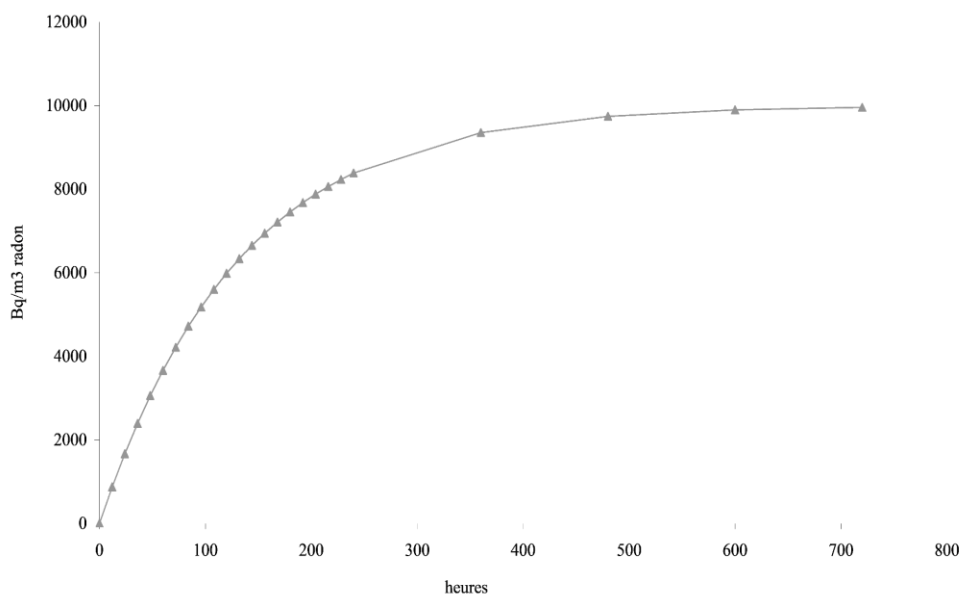
^{230}Th -> ^{226}Ra -> ^{222}Rn -> ^{218}Po

2.Le radon comme traceur hydrologique

L'analyse de traceurs radioactifs naturels pour évaluer les échanges entre eaux de surface et eaux souterraines s'est développée depuis une vingtaine d'années, avec des applications de plus en plus nombreuses. Les principaux isotopes utilisés sont le radium-223, radium-224 et radon-222. Seul ce dernier a été utilisé ici, les deux premiers étant probablement inadaptés à l'étude de petites rivières car le contraste de concentrations entre surface et souterrain y est sans doute faible. Les termes d'apports et de sorties en ^{222}Rn devant être évalués dans une portion de rivière pour établir le bilan de masse de cet élément sont présentés en figure 1.

Le radon est largement utilisé comme traceur hydrologique pour étudier les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Cette technique repose sur la mesure de la concentration en radon dans l'eau de surface et dans l'eau souterraine à différents points le long de la rivière. En utilisant des modèles mathématiques, il est possible de déterminer l'origine de l'eau souterraine qui contribue à l'écoulement de la rivière et de quantifier les échanges entre les eaux souterraines et de surface. L'utilisation du radon comme traceur hydrologique présente plusieurs avantages, notamment sa sensibilité élevée et sa capacité à tracer les eaux souterraines même dans les zones où la circulation de l'eau est faible. De plus, la mesure du radon est relativement simple et peu coûteuse, ce qui en fait une technique de choix pour les études à grande échelle. Cependant, cette technique présente également des limites. Tout d'abord, la concentration de radon dans l'eau peut varier en fonction de nombreux facteurs tels que la géologie locale, la saison, les conditions météorologiques, etc. Il est donc important de prendre en compte ces facteurs lors de l'analyse des résultats. De plus, l'utilisation du radon comme traceur hydrologique nécessite une certaine expertise technique pour la collecte et l'analyse des échantillons. Les applications du traçage au radon dans la caractérisation des échanges nappe-rivière sont nombreuses. Par exemple, cette technique peut être utilisée pour étudier l'impact des activités humaines sur les ressources en eau souterraine et de surface, pour évaluer la vulnérabilité des zones côtières à l'intrusion d'eau salée ou pour comprendre l'écoulement des eaux souterraines dans les aquifères karstiques.

Evolution du radon dans un système fermé



$$Rn(t) = Rn_{eq} * (1 - \exp(-\lambda t))$$

Rn_{eq} = activité du radon à l'équilibre

$$\lambda = \ln(2) / t_{1/2}$$

Pour t court par rapport au demi-vie du ^{226}Ra :

$Rn(t)$ = activité radon (Bq)

t = temps (s)

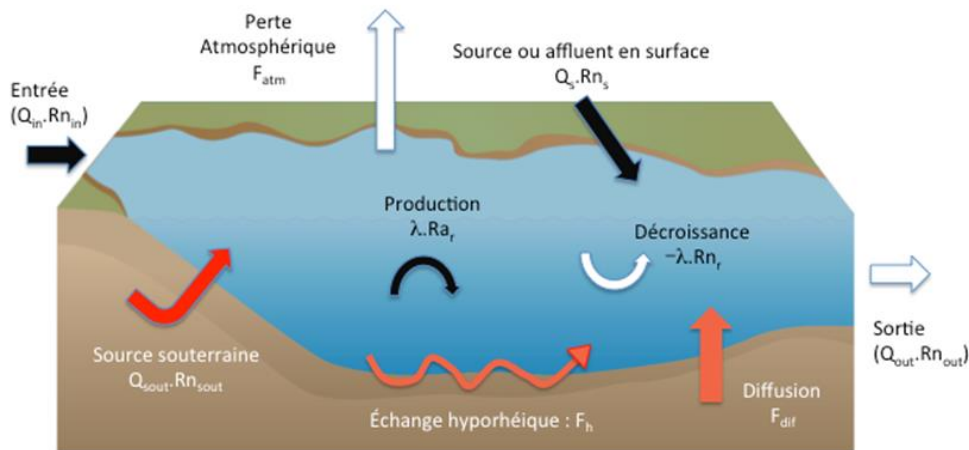


Figure 1 : Termes du bilan de masse du ^{222}Rn dans une portion de rivière

IV- Localisation du site d'étude

Les sédiments utilisés pour nos expériences ont été échantillonnés dans la rivière Cèze. La rivière Cèze est un cours d'eau situé dans le sud de la France, principalement dans les départements du Gard et de l'Ardèche. La rivière Cèze prend sa source sur le versant oriental du Mont Lozère, à Saint-André-Capcèze, à environ 800 m d'altitude, pour aller rejoindre le Rhône entre Codolet et Laudun-l'Ardoise, à 27 m d'altitude. La longueur totale de la rivière entre sa source et sa confluence est d'environ 135 km, pour un dénivelé de 773 m. Le régime hydrologique, ainsi que la chimie des eaux de la rivière, sont fortement conditionnés par les formations géologiques parcourues (Pierre Marmonier et al, 2019). Elle coule principalement à travers des formations de roches sédimentaires, notamment des calcaires, des marnes et des argiles. Ces roches sont relativement perméables, ce qui permet une bonne infiltration des eaux de surface dans les nappes phréatiques. Du point de vue de l'hydrogéologie, la Cèze est considérée comme une rivière karstique, c'est-à-dire qu'elle s'écoule en grande partie à travers un réseau de fractures, de fissures et de cavernes dans les roches calcaires. Ce type de réseau permet une grande perméabilité et une importante recharge des nappes phréatiques, mais peut

également entraîner des fluctuations importantes du débit de la rivière en fonction des conditions hydrologiques.

La zone d'étude correspond au plateau karstique de Méjannes-le-Clap. Elle s'étend de Tharaux à l'Ouest jusqu'à La Bastide à l'Est.

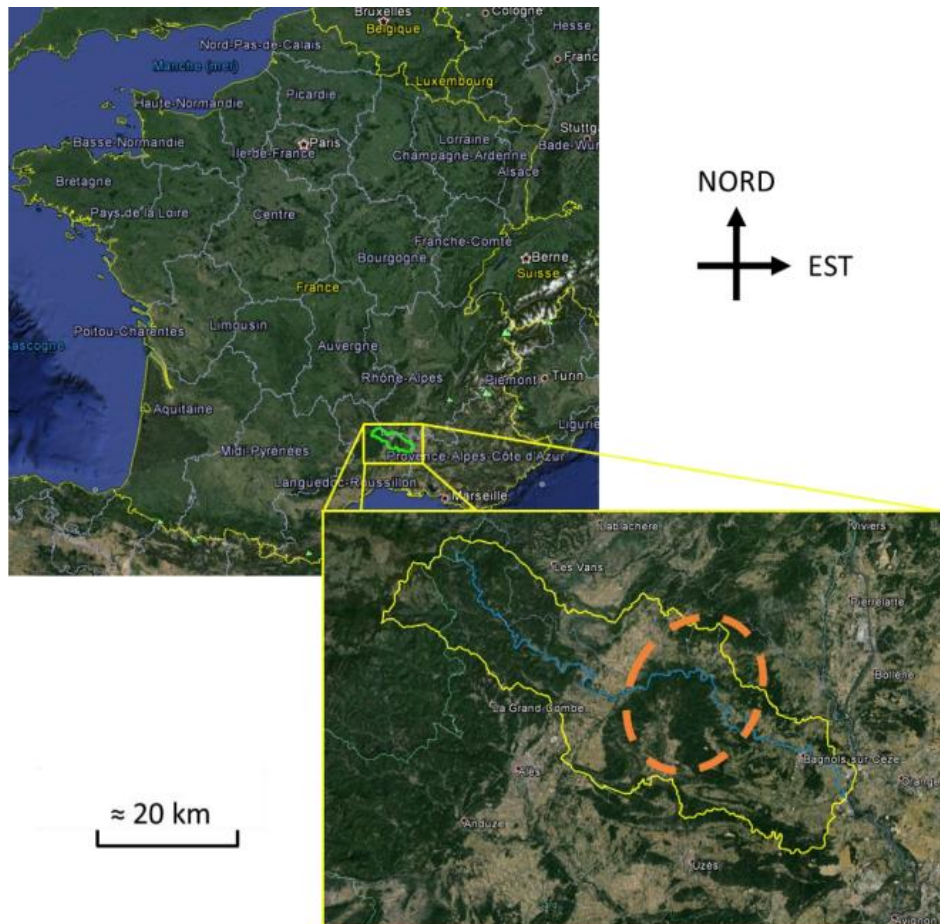


Figure 2 : Zone d'étude des apports souterrains dans la Cèze par le ^{222}Rn

La rivière collecte les eaux des sources (une quinzaine identifiée) qui drainent en rive droite le plateau de Méjannes-Le-Clap et en rive gauche une bande relativement étroite de garrigues. Ce cours d'eau présente aussi le long de son linéaire des zones de pertes importantes.

Les hydrosystèmes karstiques

L'intérêt de cette étude est de caractériser les interactions hydrauliques qu'il peut y avoir au sein d'un hydrosystème complexe. Le karst est un paysage particulier créé par l'eau et dans lequel l'eau circule de façon spécifique et complexe. L'originalité du karst réside dans le fait que l'eau dans son parcours souterrain a développé un paysage souterrain complémentaire du paysage de surface. Les formes karstiques sont totalement créées par les écoulements d'eaux, souterraines surtout dissolvant certaines roches et en particulier les calcaires. Les roches

calcaires peu solubles dans l'eau pures sont en fait abondamment dissoutes grâce aux propriétés acides des eaux souterraines dues à la dissolution dans les sols du gaz carbonique CO₂ produit par la végétation dans les sols. Donc la karstification est un ensemble de processus lié aux écoulements d'eaux souterraines et également à l'activité végétale et pédologique de la surface. Les régions karstiques sont donc généralement des régions où l'eau est souvent absente de la surface du sol du fait de sa grande perméabilité, elle s'accumule en profondeur puis s'écoule en rivières souterraines et émerge en sources puissantes, comme aucun autre paysage n'en possède. Les eaux karstiques sont souvent utilisées sans que les caractères particuliers du karst soient réellement pris en comptes, en effet il y'a bien une relation entre les pollutions à prendre en compte. On retrouve dans les paysages karstiques des grottes qui sont des points d'observations privilégiés du milieu karstique qui contribuent à comprendre comment les écoulements souterrains organisent progressivement les vides dans lesquels les eaux circulent et s'accumulent. Elles sont en effet des conduits le plus souvent abandonnés par les écoulements souterrains

Lien entre le milieu karstique et le traçage du radon

Les vitesses d'écoulement dans les karsts sont évaluées par différentes méthodes reposant sur l'analyse du traçage de l'eau. Il existe des traçages dits artificiels lorsque le traceur est introduit dans l'eau (exemple : sel ou colorant). En hydrogéologie, le traçage artificiel est une technique utilisée pour étudier et comprendre le comportement des eaux souterraines. Il consiste à introduire une substance appelée "traceur" dans un point d'injection spécifique, tel qu'un puits ou une source, afin de suivre sa dispersion et son déplacement à travers les formations géologiques jusqu'à un point de captage ou de sortie. Dans notre cas, le traçage est naturel : car il s'agit de l'étude du transport de produits résultant de la dissolution de la roche, les traceurs sont alors des isotopes d'éléments dissous (Rn ...). Ces traceurs permettent d'évaluer les conditions d'écoulements et parfois les temps de transferts entre l'entrée et la sortie. Il faut noter que pour le traçage naturel, il a été montré que dans certains aquifères karstiques possédants de grandes réserves noyées, des eaux peuvent séjourner plusieurs années ou même plusieurs dizaines d'années. Cette méthode révèle également qu'une partie de l'eau rechargeant l'aquifère parcourt la zone d'infiltration à des vitesses de l'ordre de quelques mètres par jour.

V. Matériels et méthodes

Pour le matériel nous avons utilisé :

- le RAD 7
- Une balance
- des flacons de 2 litres
- (04) échantillons de sédiments

- Un bécher
- Un flacon pour le vide
- Des robinets
- Des tuyaux de différents diamètres
- De l'eau minérale
- Un pistolet à colle
- Un manomètre
- Une colonne de drierite (CaSO₄: sulfate de calcium)

Principe de fonctionnement du RAD 7

Le ²²²Rn a été mesuré à l'aide d'un appareil appelé « RAD7 », des appareils de comptage développés par la compagnie DurrIDGE Inc. (USA). Le RAD7 est constitué d'une pompe, une cellule interne contenant un détecteur alpha à semi-conducteur implanté d'ions, un préamplificateur, un amplificateur et un microprocesseur qui relève le signal et le stock dans la mémoire. Les isotopes du ²²²Rn pénètrent par un circuit d'air dans la cellule où ils décroissent en produisant des isotopes du polonium (²¹⁸Po, élément fils) qui sont repoussés par un champ électrique vers le détecteur alpha au centre de la cellule. Lorsqu'une particule alpha issue de la désintégration d'un isotope du polonium se retrouve à la surface du détecteur, elle le frappe et produit une impulsion de charge proportionnelle à son énergie. Cette impulsion est transformée en signal électrique que le circuit électrique et le microprocesseur du RAD7 amplifient et conditionnent pour l'enregistrer dans la mémoire interne. L'accumulation des signaux produit un spectre proportionnel à la quantité de particule alpha, qui va ensuite être utilisée pour calculer les activités (exprimées en Bq/m³) du ²²²Rn initial. Le traitement de données peut être fait par un logiciel de traitement ou par calcul numérique avec un tableur permettant de corriger les données pour prendre en compte l'humidité de l'appareil, le volume d'eau utilisé et le délai entre le prélèvement et le comptage.

Méthode d'analyse

- A) Echantillonnage des sédiments : a été effectué en 2016, conservés sec au labo, abris de la lumière
- B) Fabrication des flacons étanches de 2000 ml munis des sorties à leurs bases pour extraire l'eau interstitielle une fois le radon accumulé à leurs intérieurs (voir point suivant). Les sorties consistent dans des embouts collés à l'aide d'une colle thermique, connectés avec des tuyaux flexibles fermés avec des pinces.
- C) **EXP type 1 « dry d'abord »** : cette expérience simule l'effet d'une recharge de l'eau de nappe à partir d'une infiltration à partir de la surface.
- Une masse pesée d'environ 3 kg a été insérée dans des flacons de 2 litres.
 - Ensuite l'eau avec EC connue a été ajoutée (EC environ 443, pour être semblable à celle de la rivière, pour éviter des phénomènes d'adsorption ou désorption du ^{226}Ra (source du radon) qui pourraient avoir lieu aux changements de pouvoir ionique de l'eau. Des bulles d'air d'une taille d'environ 1 cm restent dans ces cas piégés entre les sédiments (figure ci-dessous). La masse de sédiments et de l'eau ajouté ont été mesuré.

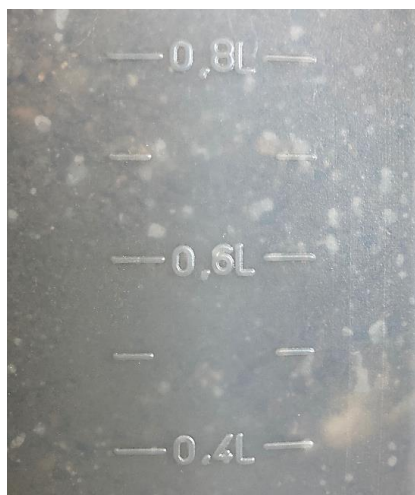


Photo1 : Expérience 1 de l'ajout de l'eau sur le sédiment

- Les flacons été fermé pendant environ 10-14 jours afin de permettre l'accumulation du radon dans l'eau inertielle produit par la désintégration du ^{226}Ra attaché aux sédiments.

D) **EXP type 2 « wet d'abord »** : cette expérience simule le cas d'une augmentation du niveau de nappe causée par un flux d'eau souterraine du bas vers le haut.

- Les flacons prédisposés pour cette expérience ont été remplis à environ $\frac{3}{4}$ du volume avec de l'eau du même type que celle de l'EXP type 1. Ensuite les sédiments ont été ajoutés en le mettent dans l'eau, de façon telle d'éviter que leurs dépositions au fond du flacon piègent des bulles d'air entre les sédiments. Au fur et à mesure que les sédiments étaient ajoutés, l'eau contenu dans le flacon a débordé pour permettre de remplir le flacon de sédiments. Les sédiments été ajoutés jusque à ras bord, et la masse de sédiments insérés et la masse d'eau restante ont été mesurés par différence.



Photo 2 : Expérience 2 de l'ajout de sédiment dans l'eau du flacon

- Comme pour l'expérience 1, les flacons été fermé pendant environ 10-14 jours afin de permettre l'accumulation du radon dans l'eau interstitielle produit par la désintégration du ^{226}Ra attaché aux sédiments.

Après un temps d'intégration d'environ 10-14 jour, le radon contenu dans l'eau interstitielle a été analysé à l'aide d'un détecteur de radon Rad7. Pour cela :

E) Préparation du vide dans l'erlenmeyer de mesure : quelque minute avant de recevoir l'échantillon, l'erlenmeyer a été connecté au tube de Venturi, à travers une fiole de garde, pour créer un vide. Quand la pression dans l'erlenmeyer était à environ 80-100

mbar, des vannes pour isoler l'erenmeyer ont été fermées et le système du vide a été déconnecté.



Photo 3 : Système de vide

F) Transfère de l'échantillon dans l'erenmeyer de mesure : une seringue de 450 ml (type utilisé par les vétérinaires) a été branché à la porte de sortie du flacon de 2000 ml pour aspirer l'eau interstitielle contenu dans les sédiments. Le bouchon du flacon a été enlevé pour permettre le flux d'eau descendant dans le flacon. Ensuite, la seringue la seringue contenant l'échantillon d'eau a été connecté au système de mesure (erenmeyer), dans lequel on avait préalablement fait le vide, afin de transférer l'échantillon. La pression finale après le transfert de l'échantillon a été mesuré pour s'assurer que le transfère d'eau et éventuel gaz soit fait sans perte (pression toujours inférieure à la pression atmosphérique externe pour être sûr que le radon ne soit pas sorti du système pendant le transfert).



Photo 4 : Système d'aspiration de l'eau interstitielle

- G) Le système erlenmeyer a été ensuite connecté au rad7 pour effectuer les comptages. Une colonne de drierite été également connectée avant l'entrée du rad7 pour maintenir la condition d'humidité requises pour la mesure.



Photo 5 : l'appareil de comptage RAD 7

L'air est soufflé à partir de l'entrée « outlet » du rad7 et produit des bulles dans l'erlenmeyer qui forcent le dégazage du radon. Le radon dans l'eau passe en phase gazeuse dans les bulles, la diffusion du radon est très lente car c'est un atome apolaire

trop gros (l'eau étant polaire). Les bulles s'accumulent au sommet du bouchon et sortent par un autre trou pour aller dans le réservoir, on y retrouve de l'air et du radon, donc Rn + air remontent et vont dans le détecteur de la machine. Le radon ne passe pas à l'infini dans les bulles donc il y a un équilibre entre la pression partielle du radon dans l'air et la pression partielle du radon dans l'eau. Le Rn + air + eau passent dans un autre tube au-dessus qui contient : la drierite (CaSO₄) dans laquelle l'eau précipite et il ressort de l'air + Rn, puis ce gaz passe dans rad 7. Une fois dans la machine, le radon se désintègre en Po+ qui vont s'accumuler au même endroit chargé négativement, là où il y a un détecteur de silicium. Ainsi : $^{218}\text{Po} \rightarrow ^{214}\text{Pb} + \alpha$, cette particule alpha a beaucoup d'énergie (6,1 millions d'électrons volts) donc le détecteur de silicium peut mesurer particule alpha par particule alpha. Grâce à l'appareil Rad 7 nous obtenons un spectre que nous interpréterons plus tard. Il faut savoir que chaque désintégration de ^{218}Po doit forcément venir de ^{222}Rn dans l'air et celui dans l'air doit forcément venir de celui dans l'eau. D'où le principe de la machine. Il faut qu'on arrive à une activité constante du nombre de ^{218}Po désintégré par rapport au nombre de ^{222}Rn . Ces différentes mesures enregistrées seront interprétées plus tard. Le temps d'analyse était d'environ 4h, subdivisés dans 16 cycles de mesure.

H) Analyse des résultats : une fois le comptage terminé, les données obtenus ont été transférées à un ordinateur pour calculer à l'aide d'une feuille Excel l'activité moyenne de l'air en équilibre avec l'eau dans l'erenmeyer et l'activité du radon dans l'eau de l'échantillon. Pour ces calculs, les volumes de l'eau interstitielle extraite et analysée e doit être mesurée à la fin du comptage, ainsi que le volume du « head space » dans l'erenmeyer (mesure faite par différence à partir du volume totale de l'erenmeyer). La concentration de radon dans l'eau a été déterminé par la formule suivante : **$C_w(\text{ini}) = C_{\text{air}}(\text{eq}) \times (V_{\text{air}} + V_w \times \alpha) / V_w$**



Photo 5 : Les flacons d'échantillon de sédiments avec l'ajout d'eau

VI. Résultats et discussion

Pour les échantillons 1,2 et 3 les sédiments ont été remplis deux fois. Le premier remplissage a été fait le 09/05/23 à 18h et le second le 10/05/23 à 16h30. L'échantillon 4 a été rempli le 10/05/23 à 16h30.

Notons que nous avons effectué deux types d'expériences à savoir sur les sédiments secs et les sédiments humides.



Photo 6 : Echantillon 1



Photo 7 : Echantillon 2



Photo 8 : Echantillon 3



Photo 9 : Echantillon 4

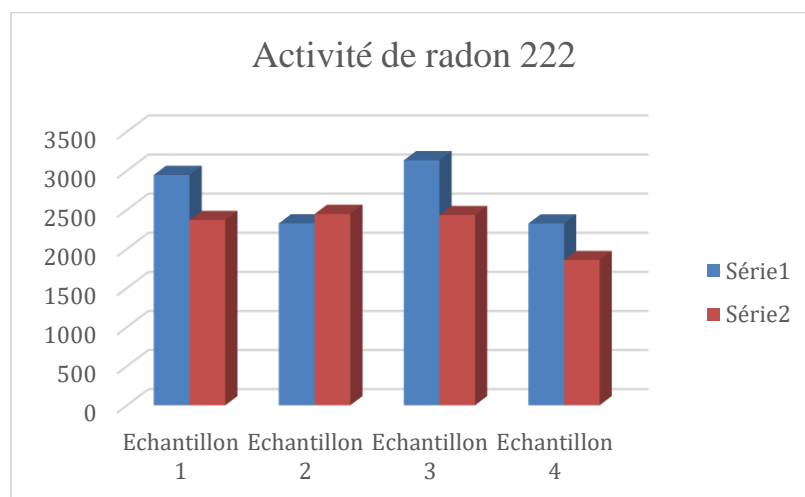
Nous avons également procédé à la mesure de radons dans l'air dans un sédiment sec (ech 1) et mesurer la diffusion d'un autre sédiment (ech 4).

Les différentes valeurs obtenues pour chaque expérience seront récapitulées dans les tableaux suivants.

	Ech 1	Ech 2	Ech 3	Ech 4
Masse sédiments (g)	3539.9	3609.7	3666	3450.4
Volume eau (l)	754,3	715	737,2	961,1
Fraction eau extraite (%)	47	33	44	38
Temp (°C)	22,3	24,2	23,4	23,6
CE(uS/cm)	915	900	1064	926
Fraction équilibre séculaire (%)	89,6	91,5	92,9	93,1
Activité Rn 222 à l'équilibre séculaire (Bq/m3)	2946	2326	3133	2325

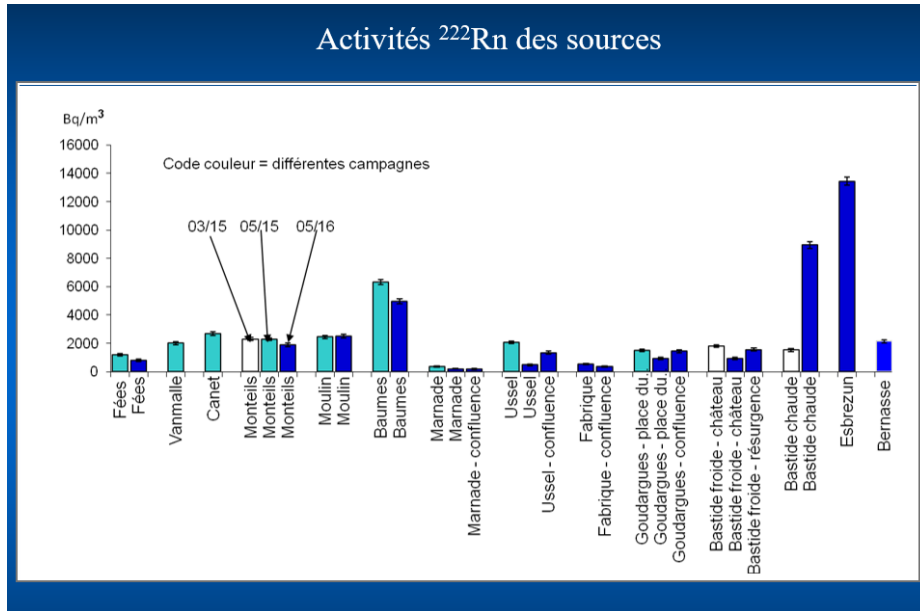
Tableau 1 : Récapitulatif des données obtenues sur les activités en ^{222}Rn , conductivités et températures des eaux interstitielles des sédiments.

Les activités de ^{222}Rn dans un aquifère sont contraintes par plusieurs paramètres tels que : les teneurs en radium qui représente l'isotope initial ; la capacité d'émanation du ^{222}Rn liée à la porosité du milieu et le temps de résidence des eaux qui doit être assez long d'environ 15 jours ou plus pour que le ^{222}Rn dissous dans l'eau soit proche ou en équilibre avec la quantité de radon qui émane des roches. En effet, l'activité du radon dans l'eau en contact avec les roches augmente dans le temps selon une courbe exponentielle donnée par la relation $Rn_t = Rn_{eq} (1 - \exp(-\lambda t))$. A partir d'une activité initiale de zéro, la teneur d'équilibre Rn_{eq} est atteinte après un temps de contact de 24 jours, mais elle est déjà presque atteinte au-delà de 15 jours. Dans certains cas, il se pourrait donc que les eaux qui pénètrent l'aquifère et en ressortent n'aient pas eu le temps de s'équilibrer totalement avec le ^{222}Rn produit.



Graphique 1 : Résultats de l'activité mesurée dans les deux expériences

Les résultats obtenus de nos différentes analyses montrent que les teneurs de radon dans les différentes eaux interstitielles recueillies sont relativement homogènes, sans de grosses variations. Nous pouvons toutefois noter que l'échantillon 3 prélevé au niveau du plan de Quittard à une activité un peu plus importante. Les différentes valeurs d'activités mesurées tournent autour de 2000 Bq/m³ ce qui correspond aux valeurs des activités de radon mesurées au niveau des sources dans les études antérieures. Cependant les activités de radon mesurées au niveau de la rivière sont de l'ordre de 600 -1000 Bq/m³ en 2016.



Graphique 2 : Activités en ^{222}Rn (Bq/m³) des sources alimentant ou avoisinant la Cèze dans la zone d'étude. Source : Etude pilote appliquée à la Cèze 2016

Les différentes données nous permettent d'expliquer l'échange qui se produit au niveau de la zone hyporhéique de la rivière. Les échanges dans la zone hyporhéique de la rivière Cèze se produisent principalement par des processus d'infiltration et d'exfiltration de l'eau entre la rivière et les sédiments. Donc en comparant nos différentes données nous pouvons dire que l'échange entre la nappe et la rivière se passe en grande partie dans ces zones d'échantillonnages. Car l'activité de radon mesuré est supérieure par rapport à l'activité de radon dans la rivière. Même si la rivière est alimentée par une source, cette eau subit un dégazage tout au long du trajet ce qui explique les valeurs faibles qui sont mesurées dans la rivière.

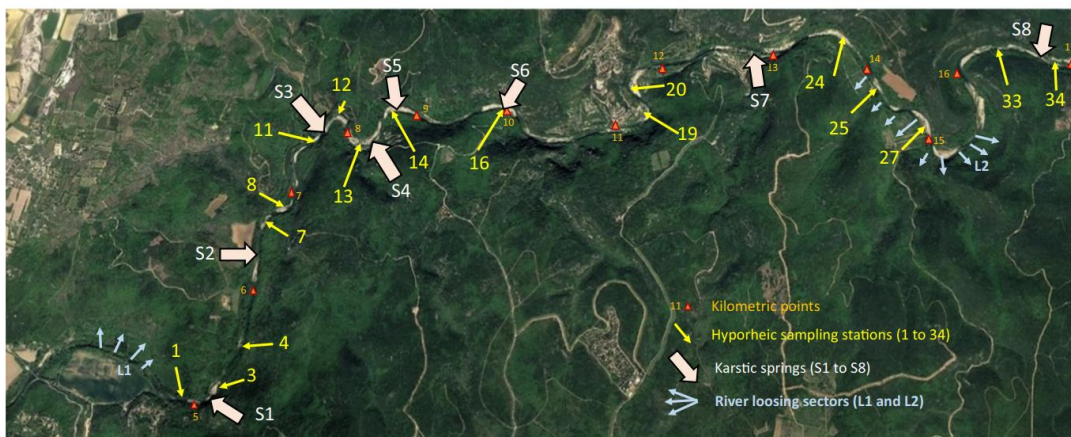
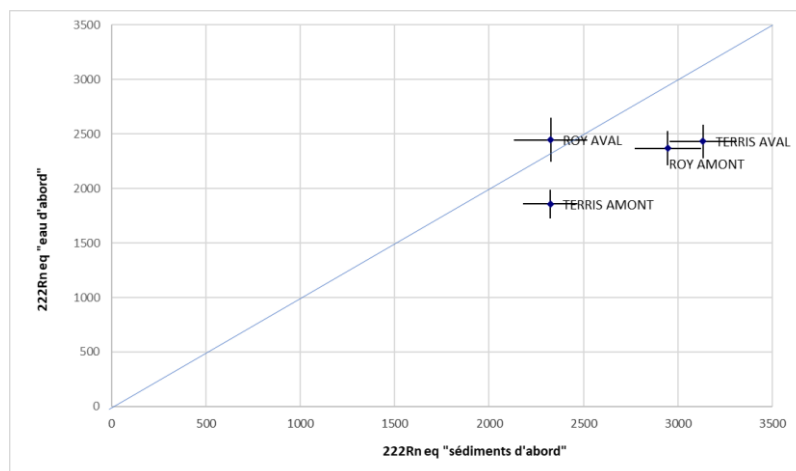


Photo 10 : Les différents milieux d'échanges

Les activités du radon à l'équilibre avec les sédiments en utilisant les 2 techniques (« wet » et « dry ») ont un résultats comparables, dans l'intervalle 1800-3000 Bq/m³ (Graphique 3), sans différences systématique pour les expériences 1 et 2. Ces valeurs semblent néanmoins plutôt bas pour un aquifère hyporhéique constitué principalement par des roches silicates (quartz, plagioclase, orthoses dominants dans les lithologies grossière, avec une mineure participation de carbonates et marnes). La granulométrie dans la taille de rudites, donc une surface d'échange eau/sédiment pas trop importante, est probablement responsable de ce bas niveau d'émanation du radon. Une expérience effectuée en parallèle en mesurant uniquement l'air en équilibre avec ces sédiments a également montré que le taux d'exhalation du radon par ces sédiments est bas (activité du radon dans l'air interstitielle à environ 1800 Bq/m³) et corrobore cette interprétation.

Cependant, ces résultats sont significativement différents par rapport aux mesures de l'activité de l'eau de nappe hyporhéique, extraite « in situ » (à l'aide de piézomètres portables et une pompe péristaltique) sur les bancs Roy en 2016 qui résulté être significativement plus élevée (13000 Bq/m³). Une telle différence d'activité indique probablement que les bancs de galets de cette rivière ne sont pas lithologiquement homogène au niveau de la production du radon, probablement concentrée dans la fraction plus fine de ces sédiments, préservés plus en profondeur dans les sédiments mais facilement éliminé par les pluies à la surface de bancs.

Le teneur du radon dans la zone hyporhéique résulte être donc très proche de l'activité du radon dans les eaux de sources existantes dans la zone d'étude. Par conséquent il ne sera pas possible de distinguer le signal du radon donné par les apports nets d'eau de nappe à partir de l'aquifère karstique, du signal du radon du au simple recyclage de l'eau hyporhéique à travers le lit de la rivière.



Graphique 3 : Comparaison des résultats des deux expériences

Ces zones hyporhéiques de la rivière Cèze abritent une biodiversité spécifique, avec des espèces d'invertébrés, de poissons et de plantes adaptées à cet environnement particulier. De nombreuses espèces dépendent de cette zone pour leur cycle de vie, y compris la reproduction et l'alimentation.

VII. Conclusion

Le protocole analytique développé dans le cadre de ce stage semble être facile à mettre en place et donne des résultats reproductibles. En plus de pouvoir obtenir la valeur de l'activité du radon à l'équilibre dans l'aquifère, cette méthode permet également de déterminer des importants paramètres qui caractérisent les sédiments alluviaux :

- Porosité du système,
- Fraction d'eau extraite,
- Densité moyenne des solides,
- Volume de bulles d'air piégées pendant la recharge de l'aquifère,
- Proportion du radon contenu dans les bulles d'air,
- Coefficient de diffusivité du radon à travers les sédiments,
- Flux diffusifs du radon à partir de sédiments.

Tous ces paramètres sont importants pour chercher d'évaluer de la façon plus précise les échanges de l'eau souterraine (karstique et hyporhéique) et l'eau de la rivière.

Annexe 1 : Tableau récapitulatif de tous les résultats des expériences

		ECHANTILLON 1 "Roy amont"			ECHANTILLON 2 "Roy 12.25"		ECHANTILLON 3 "Quillard"		ECHANTILLON 4 "sans étiquette"		
		Roy amont			Roy aval		Terris aval		Terris amont		
		EXP "dry"	EXP wet	EXP air	EXP "dry"	EXP wet	EXP "dry"	EXP wet	EXP "dry"	EXP wet	EXP flux
		(sédiments d'abor (eau d'abord))			(sédiments d'abor (eau d'abord))		(sédiments d'abor (eau d'abord))		(sédiments d'abor (eau d'abord))		
masse sédiments secs analysée:	g	3540	2924	-	3610	3556	3666	3249	3450	3131	-
volume d'eau interstitielle en contact avec les sédiments:	ml	754	976	-	715	724	737	859	961	885	-
fraction d'eau récupérée pour mesure radon:	%	47	45	-	33	36	44	49	38	47	-
					(eau difficile à extraire / eau difficile à extraire)						
porosité (volume 2000 ml):	[1]	0.36	0.46	-	0.34	0.34	0.35	0.41	0.46	0.42	-
porosité (volume 1000 ml):	[1]	0.32	0.35	-	-	-	-	-	-	-	-
proportion du volume bulles d'air par rapport eau interstitielle (volume 1000 ml):	%	7.51	0	-	-	-	-	-	-	-	-
densité sédiments (volume 2000 ml):	kg/L	2.61	2.58	-	2.59	2.57	2.67	2.60	3.01	2.56	-
densité sédiments (volume 1000 ml):	kg/L	2.65	2.18	-	-	-	-	-	-	-	-
conductibilité électrique initiale de l'eau:	uS/cm	443	443	-	443	443	443	443	443	443	-
conductibilité électrique eau interstitielle en contact avec les sédiments:	uS/cm	915	1065	-	900	1183	1064	1024	926	897	-
température de l'eau pendant le dégazage:	°C	22.3	24.7	-	24.2	24.5	23.4	24.8	23.6	25	-
fraction de l'activité par rapport à l'équilibre séculaire:	%	90	66	-	92	71	93	72	93	76	-
activité radon dans l'eau interstitielle à l'équilibre séculaire:	Bq/m3	2946	2369	-	2326	2446	3133	2431	2325	1857	-
incertitude 2 sigma abs:	Bq/m3	175	158	-	193	201	177	152	144	131	-
activité radon de l'air interstitielle à l'équilibre séculaire:	Bq/m3	-	-	973	-	-	-	-	-	-	-
incertitude 2 sigma abs:	Bq/m3	-	-	178	-	-	-	-	-	-	-
fraction du radon dans les bulles d'air par rapport à l'eau interstitielle (volume 1000 ml):	%	3.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-
activité radon dans l'eau au dessus des sédiments à l'équilibre séculaire (volume 1000 ml):	Bq/m3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	332
incertitude 2 sigma abs:	Bq/m3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40
flux de radon à travers la surface des sédiments:	Bq/m2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.15
coefficient de diffusion corrigé par la tortuosité:	m2	-	-	-	-	-	-	-	3.68E-05	6.30E-05	-
comparaison, coefficient de diffusion corrigé par la tortuosité, selon Corbett 1996:	m2	-	-	-	-	-	-	-	8.74E-05	-	-
comparaison, coefficient d'autodiffusion de l'eau pure à 25°C (ref A):	m2	-	-	-	-	-	-	-	1.89E-04	-	-
(ref A: https://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_diffusion)											
flux de radon à travers la surface des sédiments calculé selon Corbett et al 1997, equation 2:	Bq/m2										6.1

ANNEXE 2 : Zone hyporhéique en amont et en aval de 2 bancs de gravier. (Point d'échantillonnage)



VIII. Références Bibliographiques

- 1- Adriano Mayer, Olivier Radakovitch, Jordan Ré-Bahaud, Hervé Chapuis, Didier Graillet, Joel Jolivet: *Quantification des échanges eaux souterraines - rivière à l'aide du radon. Étude pilote appliquée à la Cèze, Rapport final – Janvier 2018*
- 2- Pierre Marmonier, Marie-José Dole-Olivier, Michel Creuzé des Châtelliers, Hervé Chapuis, Jordan Re-Bahuaud, Anne Johannet et Laurent Cadilhac: *Contribution of the surface water - groundwater interfaces to river biodiversity: example of a Mediterranean river, the Cèze River*
- 3- P. Marmonier, M. Creuzé des Châtelliers, M.J. Dole-Olivier, O. Radakovitch, A. Mayer, H. Chapuis, D. Graillet, J. Re-Bahuaud, A. Johannet, L. Cadilhac : *Are surface water characteristics efficient to locate hyporheic biodiversity hotspots?*
- 4- S. L. Colbert, W. M. Berelson, and D. E. Hammond, Radon-222 budget in Catalina Harbor, California: 2. Flow dynamics and residence time in a tidal beach, Department of Earth Science, University of Southern California, Los Angeles, California 90089-0740
- 5- Corbett et al 1997 - Tracing GW inputs into Par Pond Savannah River by 222Rn
- 6- <https://fr.wikipedia.org/wiki/C%C3%A8ze>