FONDATION CGENIAL

Sciences à l'École

Les gourmets du sol : les plantes rayonnantes

Projet mené par les élèves du ClBS (Club de Broglie Sciences) du lycée Louis de Broglie de Marly-le-Roi :

AMROUCHE Pauline

CRANSAC Marie

GAILLARD MAQUIABA Louana

GISBERT Soren

GUILLOU Anne-Laure

JAGORA Octave

LIM Lydie

MOSNIER Florent

NOBRE Thomas

RENAUDAT Héloïse

SINGH Vicky

SOUDANT Victor

VERDIER Florian

Et leurs professeurs : Béatrice CASANOVA, Hélène CASTEL et Corinne FONTA

académie Versailles

Avec le soutien et le partenariat de l'IRSN

IRSN INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

LYCÉE LOUIS DE BROGLIE - 78
Le Proviseur

Résumé

Comment dépolluer un sol contaminé au césium 137 comme après l'accident de Fukushima ? Et si nous utilisions des plantes se nourrissant de ce césium pour grandir ? C'est l'idée de la phytoextraction qui permet ainsi de déplacer, en partie, le césium du sol vers les plantes plus simples à traiter. Mais quelles plantes seraient les plus gourmandes en césium et les plus utiles à la phytoextraction ?

En quête d'une réponse nous avons mené, avec le soutien précieux de l'IRSN et de nos professeures, l'étude de deux espèces de plantes : la Moutarde Indienne et le Ray Grass. Nous les avons cultivées avec amour au lycée, sur un sol pollué avec l'isotope stable du césium. Nos échantillons récoltés, contaminés et témoins, ont été ensuite analysés par l'IRSN. Quelques semaines plus tard, les résultats tant attendus nous ont été communiqués ! Quelle surprise de découvrir à quel point nos petites plantes avaient absorbé le césium !

Nous irons présenter notre projet, dans quelques jours, à Dijon, aux journées internationales lycéennes de la radioprotection lors desquelles nous pourrons rencontrer nos interlocutrices Mme Beaugelin et Mme Henner.

Lien vers la vidéo illustrant la première partie de notre aventure, avant les résultats :

https://dai.ly/k2z0rjr2WqyP0xqp2hP

Sommaire

Introduction _____ 4

I- La problématique _____ 5

II- L'expérience au lycée Louis de Broglie : du protocole à la récolte des parties aériennes des « plantes rayonnantes » _____ 7

III- En route pour les résultats _____ 13

IV- Analyse des résultats _____ 15

Conclusion _____ 17

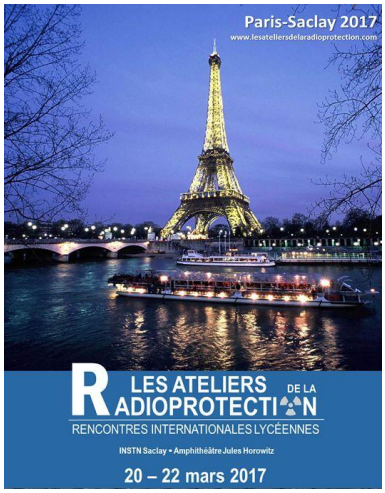
Remerciements _____ 18

Introduction

L'idée de notre projet prend racine lors des rencontres internationales lycéennes de la radioprotection de 2017 à Saclay. Nous avons eu l'opportunité de rencontrer des jeunes venant d'un site très contaminé par la radioactivité, à savoir celui de Fukushima Daiichi.

Nous avons appris que l'explosion de la centrale a engendré une évacuation de la population, une augmentation des cancers de la thyroïde et une contamination massive des sols et des eaux empêchant ainsi la reprise de l'agriculture dans les zones contaminées.
Diverses initiatives ont été prises sur le court terme pour dépolluer et repeupler l'espace contaminé.

Stockage de la terre contaminé
Source : La terre abandonnée de Gilles Laurent



http://www.lesateliersdelaradioprotection.com/images/rencontres/2017/Affiche_Saclay.pdf

Pour décontaminer les sols, les japonais ont mis en place un projet de prélèvement de la terre. Ils ont retiré 5 cm de terre qu'ils ont stockée dans d'énormes sacs (ce qui correspond à environ 20.000.000 sacs). Seulement, le problème est qu'ils ne savent pas quoi en faire…

Par ailleurs, la terre extraite contenait d'innombrables formes de vie (vers de terres, insectes...) propices à l'écosystème et à la pédogenèse, entraînant ainsi un ralentissement dans la régénération du sol et donc une impossibilité de cultiver le riz ou autres céréales !

De très nombreuses études sont menées pour décontaminer efficacement les sols sur le long terme comme l'utilisation de la phytoextraction.

Mais qu'appelle-t-on phytoextraction ?

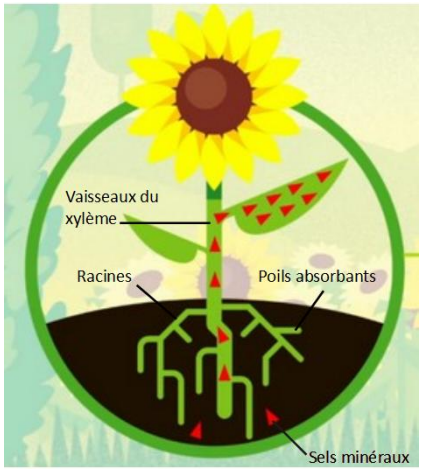
Cette méthode a été inventée pour extraire des sols les métaux lourds et cela grâce aux plantes. Ces dernières capturent les métaux par leurs racines pour ensuite les déplacer vers leurs parties aériennes (tige et feuilles). La partie supérieure de la plante est ensuite récoltée et traitée. Dans le cas de Fukushima, ces parties aériennes sont à traiter comme des déchets radioactifs.

La problématique

Notre problématique s'est exprimée ainsi : « Quelles familles de plantes choisir pour la phytoextraction du césium 137, radionucléide présent lors de l'accident de Fukushima ? »

Comment les plantes absorbent-elles le césium ?

Pour se développer les plantes ont besoin de puiser dans leur environnement les ressources (eau, lumière, ions minéraux…) nécessaires à leur croissance. Pour les ions minéraux l'absorption se fait dans le sol par l'intermédiaire des **poils absorbants** présents sur les racines. Les poils absorbants sont des cellules allongées (d'où l'aspect poilu) directement en contact avec le sol et dont la membrane est pourvue de protéines de transport spécifiques de certains ions et permettant leur passage dans la plante. Ces ions sont ensuite envoyés aux différents organes de la plante à travers le réseau des vaisseaux composant le **xylème**. Les ions minéraux sont ensuite stockés dans les cellules des feuilles où ils servent au fonctionnement cellulaire. Certains (comme le césium) s'accumulent dans ces cellules et y sont stockés jusqu'à la mort de la plante



Source du fond de schéma : CEA

Les plantes absorbent notamment les **ions potassium K^+** intervenant par exemple dans l'homéostasie (régulation de certaines constantes internes de la plante) et le transport interne d'eau ou de sève. Or les ions césium Cs^+ sont proches des ions K^+ (les éléments Cs et K sont dans la même **famille des alcalins** selon la classification de Mendeleïev). Les ions césium peuvent donc être absorbés par la plante à la place des ions K^+ en suivant le même chemin (ces ions sont compétiteurs).

Le facteur de transfert racinaire du césium pour une plante est un nombre sans unité caractérisant le rapport entre la concentration en césium par kilogramme de plante et la concentration en césium par kilogramme de sol. Plus il est élevé, plus la plante absorbe le césium présent dans le sol. Ce facteur dépend du **type de plante** (notamment du nombre de poils absorbants sur les racines) et des **caractéristiques du sol** (argileux/humique, répartition du césium, présence d'ions compétiteurs…).

La problématique

Quelles sont les caractéristiques des plantes sélectionnées ?

Moutarde Indienne *Brassica juncea* **Famille** : Brassicaceae **Facteur de transfert du Césium** : $7{,}4 \times 10^{-2}$ Facile à cultiver en milieu artificiel	**Ray Grass** *Lolium perenne* **Famille**: Poacées **Facteur de transfert du Césium** : 4.8×10^{-2} Facile à cultiver en milieu artificiel

Source : Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, IAEA

Nous nous sommes ensuite intéressés au radionucléide Césium 137 ...

La fiche du Césium 137 fournie par l'IRSN nous a permis d'extraire les informations suivantes:

« *Le Césium 137 est un émetteur β- et son activité massique est de* $3{,}22 \times 10^{12}$ *Bq.g*$^{-1}$ »

Dans les zones contaminées de Fukushima, la radioactivité atteignait jusqu'à **15 MBq.m^{-2}** de sol alors que hors de ces zones, dites non contaminées, elle était de **600 000 Bq.m^{-2}** soit 25 fois moins.

Nous avons aussi lu les informations suivantes, toujours sur la fiche éditée par l'IRSN correspondant à l'élément chimique Césium :

« *Le césium appartient, comme le lithium, le sodium, le potassium et le rubidium, à la classe des métaux alcalins. Le césium possède 31 isotopes dont la masse varie de 114 à 145. Parmi eux, seul l'isotope 133 est stable.* »

Par quel élément chimique remplacer le ^{137}*Cs ?*

Ce problème nous a fait réfléchir un certain temps car nous ne pouvions pas travailler avec un tel élément radioactif au lycée ! La réponse a été… par le même élément chimique ! Mais attention, nous avons choisi l'**isotope ^{133}Cs**, celui qualifié de stable, donc non radioactif ! Nous avons pu travailler avec du Césium 133 car Mme Beaugelin et Mme Henner ont eu la gentillesse de nous en fournir sous la forme d'un solide ionique blanc, le **Chlorure de Césium (CsCl)**. Ce solide, dissous dans l'eau, donne l'ion chlorure mais aussi notre élément chimique Césium sous sa forme ionique, un cation appelé ion Césium Cs+.

L'expérimentation pouvait réellement débuter...

L'expérience

Afin de réaliser notre expérience, nous nous sommes tout d'abord demandés quelles plantes étaient les plus efficaces pour la phytoextraction. Nous en sommes arrivés à choisir la famille des Poacées (monocotylédones) comme le Ray Grass et celle des brassicacées (dicotylédones) comme le chou, la Moutarde Indienne, les pissenlits, le colza ou le cresson (que nous avons présentées en page 6).

Une brassicacée à gauche et une poacée à droite

Combien de pots planter ?

Pour faire notre choix, le paramètre pris en compte a été la quantité de matière sèche. Il fallait qu'elle soit assez importante pour pouvoir effectuer les mesures de la teneur en 133Cs. Nous avons ainsi décidé de planter 20 graines par pot avec 10 pots témoins et 10 pots expérimentaux par souci de sécurité. Nous avons utilisé les pots du lycée de volume 384 cm^3, pour une surface de plantation par pot d'environ 49 cm^2.

Quelle concentration en 133Cs mettre dans chaque pot ?

Il a fallu tenir compte des valeurs des facteurs de transfert de l'élément Césium du sol à la plante fournies par le document *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments*, IAEA dans le cas des deux familles de plantes choisies (*Leafy vegetables* et *Grasses*). Nous avons choisi dans nos calculs un facteur de transfert moyen proche de 0,1.

La quantité de Césium transmise du sol aux plantes devait aussi pouvoir être détectée par des méthodes différentes de celles mettant en évidence des éléments radioactifs puisque le Césium 133 ne l'était pas ! La méthode de mesure envisagée a été celle de la **spectrométrie de masse**. Nous avons alors cherché à savoir quel était le seuil de détection du Césium par le spectromètre qui allait être utilisé pour exploiter nos futurs échantillons. Mme Beaugelin et Mme Henner nous ont encore aidés… L'appareil de mesure pouvait **détecter 10^{-8} g de Césium dans chaque gramme de plante**. Nous avons aussi considéré la concentration en Césium 133 présent naturellement dans le sol soit entre 0,3 et 25 $mg.kg^{-1}$ d'après la fiche IRSN.

Nous avons voulu être prévoyants et nous avons multiplié par 1000 la valeur de la masse de Chlorure de Césium à utiliser.
Nous avons utiliser la relation :

$$C_{plante(Cs)} = FT \times C_{sol(Cs)}$$

avec $C_{plante\ (Cs)}$ la concentration en césium dans la plante, FT le facteur de transfert racinaire et $C_{sol(Cs)}$ la concentration en césium dans le sol

Nous avons décidé de mettre environ 200 mg de CsCl par kilogramme de sol. Nous avons en réalité utilisé **143 mg de CsCl par kilogramme de sol.**

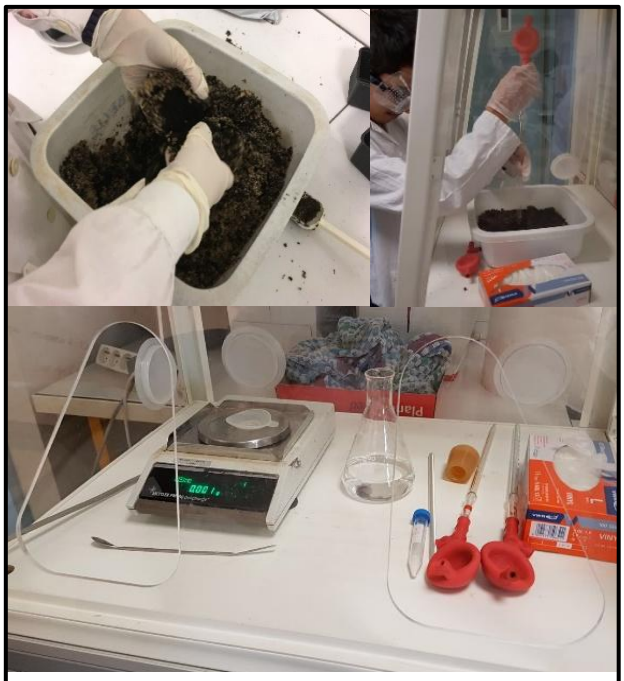
Mais… comment obtenir le substrat de culture ?

Mme Beaugelin et Mme Henner nous ont conseillé d'utiliser du sable et un terreau universel. Nous avons fait une petite étude auprès de l'entreprise vendant ce produit afin de connaître la constitution réelle du terreau qui devait être pauvre en nutriments. Nous avons aussi opté pour un arrosage à l'eau déminéralisée !

L’expérience

L’expérimentation au lycée s’est déroulée en trois phases :

Phase 1: Contamination du substrat et plantation :



Préparation du terreau et pesée de la masse de Césium dissoute dans l’eau (Travail sous hotte)

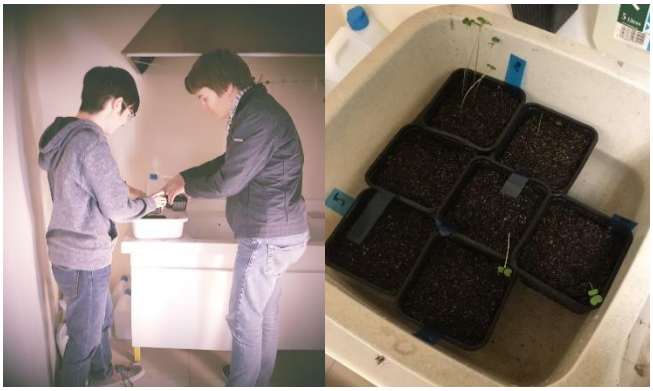
Protocole de plantation :

- Calculer les masses de Chlorure de Césium et de terreau nécessaires
- Peser le Chlorure de Césium
- Préparer le terreau
- Mélanger le terreau et le sable
- Dissoudre le Chlorure de Césium dans l'eau
- Réaliser des couches de terreau recouvertes de solution de Chlorure de Césium (action répétée plusieurs fois)
- Répartir les deux terreaux (contaminés et témoins) dans dix pots chacun
- Planter 20 graines par pots (pour les pots témoins et contaminés : 5 pots de Ray Grass et 5 pots de Moutarde Indienne)

Nous avons rencontré quelques petits problèmes car nous n’avions pas suffisamment tassé le substrat dans les pots lors de la préparation mais après ces péripéties, les 20 pots étaient enfin prêts et ont été pris quotidiennement en charge par des binômes... le ClBS s’est mobilisé !

Protocole d'arrosage :

- Remplir une bassine d'eau distillée
- Mettre les pots contaminés à arroser pendant 5 min puis égoutter les pots
- Faire de même avec les pots témoins (en changeant l’eau pour éviter la contamination des pots témoins)
- Placer les pots dans l'armoire (les graines qui ont germé à la lumière et celles qui n'ont pas germé à l'ombre)

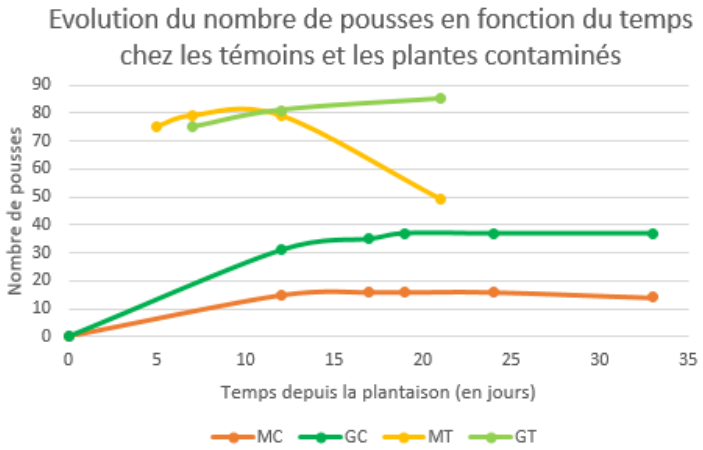


Arrosage quotidien des plantes, ici le 07/12/2017

L'expérience

Qu'avons-nous observé à ce stade de l'expérimentation ?

Comparaison des plantes contaminées avec les témoins : analyse de la croissance des 2 lots



Taille maximale (en cm) à J+19 (C) ou J+21 (T)	
MC (Moutarde Indienne Contaminée)	12
MC (Moutarde Indienne Témoin)	12
GC (Ray Grass Contaminée)	17
GC (Ray Grass Témoin)	16,5

Nous avons laissé pousser nos plantes sur un substrat contaminé avec le césium 133 pendant **quatre semaines et cinq jours**. Cependant, en seulement trois semaines, nos plantes témoins (sans contamination du sol par le césium) ont eu une croissance plus rapide. En effet, la masse sèche totale obtenue après minéralisation est égale à **0,127 g** pour la Moutarde témoin (MT) et à **0,197 g** pour le Ray Grass témoin (GT) ce qui correspond à des masses environ deux fois plus grandes que celles obtenues avec les pots contenant le substrat contaminé (respectivement **0,052 g** et **0,101 g**). La Moutarde du pot n°5 « contaminé » n'a même jamais poussé !
On observe une baisse de la quantité de pousses de moutarde, à la fois dans les pots témoins que dans les pots contaminés. Cette baisse est due aux problèmes de ventilation, de lumière et d'arrosage qui ont fait mourir certains de nos plants.

Phase 2: Préparation des échantillons au lycée :

Pour préparer les échantillons, les parties aériennes des plantes sont découpées puis mises dans des sachets afin d'être conservées.

Protocole de découpe des plantes :
- Peser le sachet à vide
- Couper les parties aériennes des plantes et les mettre en sachet (1 sachet par échantillon)
- Peser le sachet contenant les échantillons après avoir retiré le maximum d'air

Phase 3: Séchage des plantes à l'étuve au lycée :

Protocole du séchage des plantes :
- Couper chacun des échantillons en petits morceaux (environ 1cm de longueur)
- Placer les échantillons dans de petites coupelles
- Mettre l'ensemble à l'étuve à 60°C

L'expérience

Phase 4 : Visite de l'IRSN du Vésinet

Nous tenions tout d'abord à remercier le personnel et chercheurs de l'IRSN, qui nous ont permis de visiter leurs locaux le 17 janvier 2018.

Nous avons donc visité 2 laboratoires :

- Laboratoire de surveillance de l'environnement par échantillonnage
- Laboratoire d'expertise de radiochimie et de chimie analytique

L'IRSN est un institut permettant le **contrôle des zones d'activité nucléaire**. En récoltant des échantillons partout sur le territoire, à proximité des centrales nucléaires, puis en les analysant, il vérifie la présence de toutes traces de matières dangereuses dans l'environnement dues aux activités humaines.

L'IRSN analyse quotidiennement des échantillons animaux, végétaux, minéraux ainsi que des filtres à air.

(acides)

(machine à plasma)

Traitement des échantillons :

Avant que les échantillons ne soient traités et préparés, on enregistre d'abord les informations liés à ceux-ci (provenance, quantité, masse, etc…), qui seront ensuite rangés dans des bases de données avec un code IRSN, qui sera utilisé tout au long des expériences. Pour garder une trace, les chercheurs remplissent un formulaire papier et un formulaire virtuel.

Après cette partie administrative, les échantillons sont étuvés entre 60 et 80°C pendants une à deux semaine(s).

Ces échantillons sont ensuite transformés en poudre puis calcinés dans des fours entre 600 et 800°C, après avoir suivi des paliers d'adaptation de température, pour éviter toute dégradation.

Ces étapes permettent de **réduire au maximum les échantillons**, le but étant de concentrer l'élément à mesurer dans un volume minimal.

Après la calcination, les plantes sont mises en solution à l'aide d'acides et de bases, ce qui permet la mesure au spectromètre.

Il existe différentes manières de mettre en solution, notamment :

- **L'utilisation d'acides et de bases** qui vont liquéfier et traiter, puis nettoyer notre échantillon. On utilise principalement de l'acide chlorhydrique, concentré jusqu'à 9 sur une échelle de 12 (on ne parle pas ici du pH, mais bien de la concentration).
- **L'utilisation d'une machine qui chauffe les échantillons** dans des creusets à des températures supérieures à 1000°C et les transforme en plasma. On les verse ensuite dans des acides et on obtient notre solution.
- **L'utilisation d'un micro-ondes** qui permet d'augmenter grandement la vitesse des réactions chimiques.

L’expérience

Minéralisation :

Les prises d’essai sont minéralisées par 10 ml HNO_3 + 5 ml HCl à ébullition, à reflux pendant 2h.

Le mélange d’acides est ajouté avec précaution sur le végétal séché. Les matières calcinées ne produisent pas de réactions mousseuses.
Il faut attendre que la réaction de production de mousse s’arrête avant de débuter la chauffe sur plaque chauffante.
Ceci afin d’éviter les débordements. Une capsule en porcelaine est placée sous le bécher pour récupérer la solution de cet éventuel débordement

Un verre de montre est placé sur le bécher pour une ébullition à reflux (condensation des vapeurs sur le verre de montre).
Les béchers sont posés sur la plaque chauffante pour une ébullition de 2h. Montée progressive (pour éviter la formation de mousse) en température jusqu’à 180°C).

Fin de l’ébullition à reflux. Il n y a plus de dégagement de vapeurs nitriques (couleur rousses).
Il reste un résidu qu’il faut essayer de détruire pour une minéralisation totale.
Une réduction du volume (verre de montre enlevé) par chauffage est réalisée.

Attaques Perchloriques
L’acide Perchlorique détruit les particules organiques en présence d’acide nitrique à chaud, à sec.
Ajout d’un mélange : 10ml HNO_3 + 2ml $HClO_4$ (Acide Perchlorique)
Chauffage à 180°C jusqu’à évaporation à sec.
Cette opération est réalisée 3 fois jusqu’à obtention du résidu blanc.

Mise en solution du résidu
Le résidu obtenu est mis en solution à l’aide de HNO_3 (très concentré) à chaud.
Après refroidissement, la solution obtenue est transvasée dans une fiole jaugée de 20 ml puis dans un flacon polythène pour le transport.

L’expérience

Mesure au spectromètre :
L’IRSN est pourvu de nombreux spectromètres de différents types, permettant l’analyse de différents éléments.
Pour analyser nos échantillons, nous avons utilisé **le spectromètre de masse ICP-MS**. Il existe d’autres types de spectromètres détectant la radioactivité alpha ou bêta, cependant le césium 133 n’est pas radioactif.
On injecte tout d’abord l’échantillon à tester. Les ions que nous voulons détecter sont alors *triés* par leur masse car ils suivront ainsi la trajectoire satisfaisante (voir schéma ci-dessous) qui les amènera au détecteur. Les données sont ensuite enregistrées, et on détermine ainsi quels sont les éléments détectés, et en quelle quantité.

Spectromètre de masse
(appareil analogue à Fontenay ayant permis de réaliser les mesures sur nos échantillons)

Nos impressions sur la visite de l’IRSN :

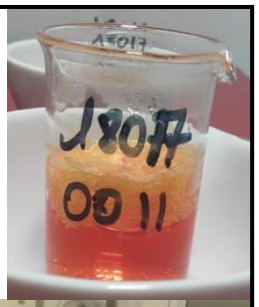
Nous avons trouvé la visite enrichissante car elle nous a permis de nous rendre compte du niveau de sécurité nucléaire de la France et du rôle de l’IRSN dans ce domaine. En effet, chaque année, plus de 40 000 échantillons sont prélevés partout en France et traités. Il était aussi intéressant de pouvoir suivre l’intégralité du parcours d’un échantillon, de son prélèvement jusqu’à son analyse, en passant par la mise en solution (une chose très impressionnante, car des acides et des bases très concentrés sont employés). De plus, nous avons été séduits par l'esprit d'équipe présent entre les différents laboratoires.
Nous avons aussi pu découvrir le fonctionnement des spectromètres, grâce aux explications d’une spécialiste en la matière. Nous en profitons pour remercier Mme Le Corre pour le temps qu’elle nous a accordé.

Les résultats

Nous sommes le **Mercredi 17 Janvier 2018** et l'aventure de nos échantillons continue… Nous sommes six élèves du ClBS à apporter la *récolte* (bien maigre) du club afin de la préparer pour qu'elle soit ensuite analysée. Notre visite des **laboratoires de surveillance de l'environnement par échantillonnage** (PSE-ENV/SIRSE/LSE) et **d'Expertise, de radiochimie et de chimie analytique** (PSE-ENV/SAME/LERCA), du Pôle santé environnement du site IRSN du Vésinet nous permet de comprendre comment va se dérouler toute cette préparation … Nos échantillons seront alors méconnaissables !

A chaque type d'échantillon, MT, MC, GC et GT, a été associée une fiche descriptive avec un numéro de suivi pour sa traçabilité au sein des différents laboratoires.

Préparation des échantillons à l'IRSN du Vésinet et analyse sur le site de Fontenay après leur minéralisation



Pendant les vacances de Février, les résultats des mesures nous parviennent… Mme Henner et Mme Beaugelin nous font parvenir le fichier EXCEL suivant

Echantillons			Conc ($\mu g.L^{-1}$)	Incertitude à 1s ($\mu g.L^{-1}$)	LQ ($\mu g.L^{-1}$)	Masse (g)
	Code Marly	Code IRSN				
Témoins	MT	180 120017	40	0,11	0,51	0,1271
	GT	180 170011	139	0,95	2,49	0,19675
Contaminés	MC	180 120016	13 814	84,7	209	0,05213
	GC	180 170012	10 496	71,8	209	0,10141
		volume	20	mL		

Pour l'exploiter nous calculons pour chaque échantillon la **masse de Césium capté par la plante** et à partir de cette donnée nous calculons la concentration massique en césium dans les plantes puis les facteurs de transfert. La concentration en Césium dans le sol est obtenue par le calcul suivant :

$$C_{Cs}(sol) = C_{CsCl}(sol) * \frac{M(Cs)}{M(CsCl)}$$

$$C_{Cs}(sol) = 0{,}143 * \frac{133}{168{,}5} = 0{,}113 \text{ g de Cs/kg de sol}$$

Les résultats

Lot	Masse m_{Cs} de Cs133 capté (en µg) $m_{Cs} = C * V$	Concentration massique en Cs133 C_{Cs} (en g de Cs par kg de plante) $C_{Cs} = \frac{m_{Cs}}{m_{échantillon}}$	Facteur de transfert F_{Cs} $F_{Cs} = \frac{C_{Cs}(plante)}{C_{Cs}(sol)}$
MT	$m_{Cs_{MT}} = 40{,}368 * 20 * 10^{-3}$ $m_{Cs_{MT}} = 0{,}80736\ \mu g$	$C_{Cs_{MT}} = \frac{0{,}80736 * 10^{-6}}{0{,}1271 * 10^{-3}}$ $C_{Cs_{MT}} = 6{,}35 * 10^{-3}$ g de Cs/kg de plante	
MC	$m_{Cs_{MC}} = 13814 * 20 * 10^{-3}$ $m_{Cs_{MC}} = 276{,}28\ \mu g$	$C_{Cs_{MC}} = \frac{276{,}28 * 10^{-6}}{0{,}05213 * 10^{-3}}$ $C_{Cs_{MC}} = 5{,}30$ g de Cs/kg de plante	$F_{Cs_{MC}} = \frac{5{,}30}{0{,}113}$ $F_{Cs_{MC}} = 47$
GT	$m_{Cs_{GT}} = 139{,}23 * 20 * 10^{-3}$ $m_{Cs_{GT}} = 2{,}7846\ \mu g$	$C_{Cs_{GT}} = \frac{2{,}7846 * 10^{-6}}{0{,}19675 * 10^{-3}}$ $C_{Cs_{GT}} = 1{,}42 * 10^{-3}$ g de Cs/kg de plante	
GC	$m_{Cs_{GC}} = 10497 * 20 * 10^{-3}$ $m_{Cs_{GC}} = 209{,}94\ \mu g$	$C_{Cs_{GC}} = \frac{209{,}94 * 10^{-6}}{0{,}10141 * 10^{-3}}$ $C_{Cs_{MC}} = 2{,}07$ g de Cs/kg de plante	$F_{Cs_{GC}} = \frac{2{,}07}{0{,}113}$ $F_{Cs_{GC}} = 18$

Nous avons été très heureux et impressionnés lorsque nous avons remarqué que nos facteurs de transfert étaient très élevés par rapport à la valeur moyenne que nous avions trouvé (environ 0,1) et à laquelle nous nous attendions. Cette expérience a donc été une réussite pour nous.

Analyse des résultats

Principe de la croissance des plantules :

Lors de la germination d'une plantule, ce sont les racines qui sortent en premier. Puis c'est le tour des premières feuilles qui ont une forme différente des vraies feuilles, qui se développent par la suite. Ce sont les racines qui absorbent le césium présent qui est ensuite acheminé jusqu'aux feuilles grâce à la circulation des sèves dans les plantes.

Nous avons laissé nos plantes pousser en présence de césium 133 pendant quatre semaines et cinq jours. Cependant, en seulement trois semaines, nos plantes témoins (sans césium) ont eu une croissance plus rapide. En effet, la masse sèche totale obtenue après récolte vaut 0.127 g pour la Moutarde témoin (MT) et 0.197 g pour le Ray Grass témoin (GT) ce qui équivaut à environ deux fois celle des pots contaminés (respectivement 0,052 g et 0,101 g).

Nos 2 armoires de culture

Cette différence peut s'expliquer par la dose de chlorure de césium (CsCl) que nous avions mise dans le substrat et par sa toxicité car même s'il s'agit d'un isotope stable du ^{137}Cs, il n'en reste pas moins toxique, d'autant plus qu'il est mélangé avec des ions chlorure. En effet, nous avions décidé d'utiliser 0,200 g de chlorure de césium par kilogramme de sol, ce qui correspond à mille fois la quantité de ^{133}Cs naturellement présente dans le sol. Il est donc possible que le chlorure de césium ait empêché le bon développement des plantules, ce qui expliquerait la différence de croissance entre les plantes des pots témoins et celles des pots contaminés.

De plus, les graines ont été semées sur un milieu déjà contaminé et restant contaminé tout au long de leur développement ce qui a pu ralentir leur croissance. Les résultats sont ainsi légèrement différents de ceux qui auraient été observés si le césium avait été rajouté après la plantation, sur des plantules plus âgées. En effet, les plantules jeunes absorbent plus d'eau et de sels minéraux que des plantes plus âgées. Mais le but de nos expériences étant de pouvoir appliquer la méthode de phytoextraction à des sols déjà contaminés, ce choix de contamination nous a semblé pertinent.

Des problèmes…

Notre premier problème a été celui de **l'éclairage dans les armoires de culture**. En effet, avant que les graines ne sortent de terre, il est préférable de les laisser pousser dans le noir afin d'accélérer leur développement. Une fois qu'elles ont sorti le bout de leur premières feuilles (cotylédons), les petites plantules ont besoin d'une grande quantité de lumière. C'est pourquoi nous les avons placées dans deux chambres de culture possédant un éclairage horticole. Malheureusement l'une des deux chambres ne possédait qu'une seule lampe qui était située sur le côté, freinant ainsi la croissance des plantes car ces dernières poussaient vers la lumière et se sont retrouvées couchées.

Nous avons également dû faire face aux problèmes de **ventilation à l'intérieur des armoires** causant une hausse de température assez importante. En effet, la culture des plantes nécessite une température inférieure à 24°C et, comble de malchance, l'armoire la plus appropriée, pour son éclairage réparti de chaque côté des plantes, a dépassé cette température limite.

Analyse des résultats

… mais aussi des solutions

Pour remédier au problème de l'éclairage, nous tournions les pots chaque jour lors de l'arrosage afin que les plantules poussent le plus verticalement possible.

Pour faire baisser la température, nous avons développé un système automatique permettant de réguler la température à l'intérieur des armoires, au moyen d'un ventilateur de récupération et de composants électroniques :

- une **thermistance** qui, avec sa résistance, crée une tension liée à la température
- un **potentiomètre** qui crée une tension de référence que l'**amplificateur opérationnel** compare avec celle de la thermistance. Il active et désactive ensuite le ventilateur au moyen du **transistor** qui alimente le ventilateur.

La récolte des plantes a été effectuée avant la mise au point du système, le circuit pourra fonctionner pour d'autres projets.

De plus, pour se développer, les plantes ont besoin de conditions particulières. Nous avons donc créé un printemps artificiel avec des jours et des nuits, ceci à l'aide d'un programmateur électrique.

Les plantes ont tout de même réussi à se développer et à donner des résultats satisfaisants pour notre plus grand bonheur !

En temps normal le facteur de transfert est d'environ 0,1 pour l'herbe. Nous nous attendions donc à de faibles valeurs étant donné la faible masse de plante ayant poussé. Cependant les valeurs que nous avons obtenues sont bien supérieures, à savoir 47 et 18 pour respectivement la Moutarde Indienne et le Ray Grass.

Nos pots de Moutarde Indienne le 04/12/2017

Ces chiffres élevés peuvent-être dû à différents facteurs :

- **La qualité du sol**, c'est à dire les proportions en sable, argile ou encore matière organique. En effet, l'argile notamment retient plus le césium que d'autres composants du sol. Ainsi celui-ci se dissout moins dans l'eau et peut moins être absorbé par les racines des plantes. Au contraire si le sol contient peu d'argile, le césium sera plus suspecté d'être absorbé par les racines ce qui conduira à une plus forte concentration de césium dans la plante.
- **La présence de Césium dès le début de la pousse des plantes** a certes ralenti leur croissance (voir page 15) mais a aussi favorisé l'absorption du Césium.
- **L'utilisation d'eau distillée** lors de l'hydratation de nos plantes. Ainsi il n'y avait pas de sels minéraux ajoutés afin d'éviter l'ajout d'ions potassium dans le substrat. Ceux-ci étant en compétition avec le césium, pour l'absorption par les plantes, il y aurait eu diminution de l'absorption du césium entraînant celle du facteur de transfert.

On observe que la Moutarde Indienne a germé et poussé plus vite que le Ray Grass car elle a une meilleure capacité d'absorption de l'eau. Ainsi, la Moutarde Indienne ayant plus absorbé le Césium dissout dans l'eau, l'a donc récupéré en plus grande quantité dans ses parties aériennes, ce qui explique un taux de transfert plus important pour la Moutarde Indienne que pour le Ray Grass.

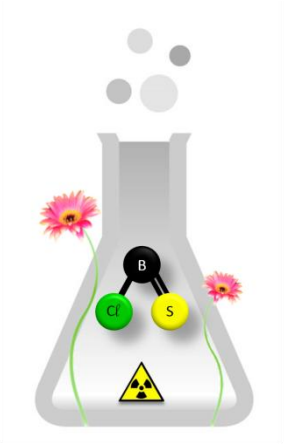
Conclusion

Avec l'analyse des résultats, c'est la partie expérimentale de notre beau projet qui s'achève. Ce sont des résultats à la fois inespérés et surprenants, car nous sommes parvenus à des facteurs de transfert très élevés, ce qui nous a permis de conclure sur l'efficacité de ces deux familles de plantes dans la phytoextraction du césium. Cependant, ces résultats sont à relativiser, car nos conditions d'expérimentation sont éloignées de celles observées sur le terrain suite à un accident nucléaire. Ainsi, notre étude n'est pas quantitativement valable mais elle est qualitativement cohérente avec les travaux scientifiques déjà menés. Bien que de tels résultats ne soient pas observables en terrain réel, la phytoextraction nous semble être une méthode intéressante à étudier pour la dépollution des sols contaminés au césium.

Nous avons eu grand plaisir à travailler sur ce projet, qui nous a donné l'opportunité de développer nos capacités expérimentales, de mener un travail de recherche approfondi sur problématique actuelle, et d'en apprendre plus sur les métiers et les techniques de laboratoire. Lors de notre visite à l'IRSN, nous avons rencontré des professionnels passionnés et passionnants, qui nous ont gentiment consacrés du temps afin de nous présenter leurs métiers et le traitement des échantillons, qui leur sont confiés.

Mais notre projet n'est pas terminé ! En effet, du 19 au 21 mars nous le présenterons aux rencontres internationales lycéennes de la radioprotection. Nous pourrons également continuer nos recherches sur la décontamination des sols pollués par le césium en nous intéressant aux méthodes de traitement des "plantes rayonnantes" afin de les recycler, par exemple dans la production d'énergie.

Remerciements

- **Mme Aleth DELATTRE**, chargée de Communication Pôle Santé et Environnement / Direction Environnement, Le Vésinet
- **Mme Karine BEAUGELIN-SEILLER** Ingénieur-chercheur, expert radioprotection de l'environnement Pôle Santé et Environnement / SRTE / Laboratoire d'Ecotoxicologie des radionucléides, Cadarache
- **Mme Pascale HENNER** Chercheur Pôle Santé et Environnement / SRTE / Laboratoire de Recherche sur les Transferts des radionucléides dans les écosystèmes Terrestres (LR2T), Cadarache
- **Mme Nelly CASEIRO**, assistante de Jean-Christophe GARIEL, Pôle Radioprotection, Environnement, Déchets et Crise, Direction de l'Environnement (PRP-ENV), Le Vésinet
- **M. Maxime MORIN**, Chef du Laboratoire de surveillance de l'environnement par échantillonnage, Le Vésinet
- **M. Fabrice LEPRIEUR** Chef du Laboratoire d'expertise, de radiochimie et de chimie analytique, Pôle Santé et Environnement - PSE-ENV / SAME / LERCA, Le Vésinet
- **Mme Roselyne LE CORRE** du Laboratoire d'expertise, de radiochimie et de chimie analytique, Pôle Santé et Environnement - PSE-ENV / SAME / LERCA
- **Mme Azza HABIBI** du Laboratoire d'expertise, de radiochimie et de chimie analytique, Pôle santé environnement (PSE-ENV/SAME/LERCA) Le Vésinet
- **M. Romain VIDAL** Chef du Laboratoire de Mesures Nucléaires, Pôle santé environnement – (PSE-ENV /SAME / LMN) Le Vésinet
- **Mme Charlotte CAZALA** Chef du Laboratoire de recherche sur le devenir des pollutions des sites radioactifs - Pôle santé environnement (PSE-ENV/SEDRE/LELI) de Fontenay-aux-Roses
- **M. Anthony JULIEN** du Laboratoire de recherche sur le devenir des pollutions des sites radioactifs - Pôle santé environnement (PSE-ENV/SEDRE/LELI) de Fontenay-aux-Roses

Et bien sûr, nous remercions nos trois professeures, Mme Béatrice CASANOVA, Mme Hélène CASTEL et Mme Corinne FONTA sans qui nous n'aurions pas pu réaliser ce projet, ainsi que la Direction du lycée Louis de Broglie pour son soutien.