

Boudoire Nolwenn
Année 2021- 2022

Sophie Allebone-Webb
François Zaviska

Département Sciences et technologies de l'eau



Circularité des nutriments : hygiénisation et stabilisation des urines





Table des matières

Résumé	3
Abstract.....	3
Remerciements	4
Listes des tableaux et figures	5
Introduction	7
I - Mise en contexte du projet et résultats des précédentes expériences	8
I.1 - Formes de l'azote et assimilation par les plantes	9
I.2 - Paramètres influençant le pH lors du stockage des urines	11
I.3 - Hygiénisation des urines lors de la période hivernale	12
II – Protocole d'hygiénisation avec modification du pH	12
II.1 - Mise en place des expériences	13
II.2 - Résultats	14
III - Tests sur les filtres à charbon	16
III.1 - Bibliographie	16
III.2 - Expériences	18
III.3 - Nitrification	22
IV - Résultats et poursuite d'expérience sur le potager expérimental	23
IV.1 - Résultats quantitatifs	24
IV.2 - Résultats qualitatifs.....	28
IV.3 - Choix des variétés et analyse des résultats	29
Conclusion.....	30
Bibliographie	32
Annexes.....	34
Annexe 1 : Détail des associés de la SCOP Ecossec	34
Annexe 2 : Tableaux récapitulatifs des normes européennes et françaises	35
Annexe 3 : Graphiques résumant les résultats des expériences de l'été 2022	36
Annexe 4 : Résultats bactériologiques du projet de fin d'étude.....	37
Annexe 5 : Calcul pour l'ajout de potasse et de soude.....	38
Annexe 6 : Détail des poids des plantes du potager expérimental par variété et par casier	39
Annexe 7 : Résultats des tests statistiques et graphiques pour les laitues et les fèves.	40
Annexe 8 : Résultats des dégustations de salades.....	43
Annexe 9 : étude sociale Valurine	45



Résumé

Ecosec est une entreprise qui travaille sur la fabrication de toilettes sèches et de murs végétaux, ces domaines étant encore peu développés une grande place est laissée à l'innovation et à la recherche. Cette étude s'inscrit donc dans la continuité des nombreuses études précédentes concernant la valorisation des urines. La différence avec les études précédentes est la volonté de trouver une solution d'hygiénisation qui soit rapide et reproductible quelle que soient les conditions, c'est pour cela que la modification du pH par ajout de produits chimiques a été choisie. De plus, cette étude a pour but de montrer la pertinence de l'utilisation des urines en comparaison à d'autres engrais. Bien que les expériences aient été interrompues suite à des problèmes d'analyse de résultats, il semblerait que cette voie d'hygiénisation puisse fonctionner à condition de déterminer le bon dosage en toutes conditions. Les recherches se sont aussi poursuivies dans des domaines encore peu étudiés par l'entreprise, c'est le cas de la nitrification sur des filtres à charbon ou de la quantification des différences de rendements entre différents urino-fertilisants, urines et engrais classique. Les résultats des premiers tests sur le filtre à charbon montre qu'il y a une possibilité de nitrification avec cette méthode et qu'il est intéressant de poursuivre les efforts dans cette voie-là. De même, les tests de culture ont pu montrer une valeur agronomique similaire entre les urines et les engrais conventionnels pour un impact sur l'environnement totalement différent suivant le produit utilisé.

Mots clés : filtre à charbon – hygiénisation des urines humaines – valorisation agronomique

Abstract

Ecosec is a company working in dry toilet and green wall construction, fields which are still being developed, with much emphasis on innovation and research. Following previous studies on the same subject, this study looks at nutrient recovery from urine. The difference between this and precedent studies is the aim to find a quick and safe solution for urine sanitation which is replicable under a wide variety of conditions. In order to do this, we choose to modify the pH of the urine by adding chemicals. We also choose to demonstrate that using urine as a fertilizer is a relevant solution. Although the experiments were interrupted because of problems in the laboratory analysis, it seems likely that this method of urine sanitation is safe given the right chemical dosage. This study also explores fields not fully exploited by the company, including nitrification on biochar filter and quantification of different comestible plant production to compare to the efficacy of urine with typical fertilizers. The results of the initial test on the biochar filter show a possibility of nitrification, which mean it is an interesting way to stabilise urine that could be pursued. Finally, tests showed that urine had the same agronomical value as classical fertilizer, but with a much-reduced environmental impact.

Key words: biochar filter – human urine sanitation – nutriment recovery



Remerciements

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à ma tutrice Sophie Allebone-Webb qui a toujours été présente pour répondre à mes interrogations, qui pris de son temps pour me former mais aussi pour m'aider à m'intégrer au sein de l'entreprise et ainsi pouvoir en être un membre à part entière.

Je souhaite aussi remercier l'équipe enseignante de Polytech et plus particulièrement François Zaviska et Marc Heran pour le temps qu'ils ont consacré à m'aider sur la réalisation des protocoles expérimentaux mais aussi pour leurs conseils précieux pour la concrétisation de mon projet professionnel.

Un grand merci aux membres du RAE (Réseau d'assainissement écologique) et plus particulièrement à la coopérative équilibre pour la richesse de nos échanges et le partage de connaissances afin de faire avancer ensemble la valorisation des urines en France et à l'étranger.

J'aimerais aussi remercier l'équipe du laboratoire Biofaq pour le temps passé sur nos échantillons et le travail qu'ils ont pu réaliser à changer les modes d'analyses afin de s'adapter à nos demandes spécifiques.

Merci à tous les utilisateurs des toilettes d'Ecosec que ce soit en ville, au travail ou en festival. Ils ont chacun à leur façon contribué à ces expériences qui ont nécessité un effort collectif pour récupérer toutes ces urines.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement toute l'équipe d'Ecosec et de Macondo, pour leur aide, leur soutien et tous les bons moments partagés. Il n'est pas de plus bel endroit où travailler, qu'auprès de personnes qui s'acharne chaque jour à rendre ce monde meilleur.





Listes des tableaux et figures

Tableau 1 : Hygiénisation des urines après 6 semaines selon les conditions de stockage => absence/présence de E. coli	12
Tableau 2 : Résultats des tests d'hygiénisation : nombre d'E. coli en NPP/100mL.....	15
Tableau 3 : Résultats tests de désorption après lavages successifs de charbon de granulométries différentes. 20mL d'eau déminéralisée pour chaque lavage.....	19
Tableau 4 : Résultats tests d'adsorption - eau du robinet	20
Tableau 5 : Conductivité et pourcentage d'adsorption des urines après contact avec du charbon de différentes granulométries	21
Tableau 6 : Composition des urines avant et après leur passage sur colonne de charbon avec les pourcentages d'adsorption des nutriments	21
Tableau 7 : Composition des urines avant et après passage sur le filtre à charbon	23
Tableau 8 : Apport en nutriments suivant les différents casiers pour chaque semaine	24
Tableau 9 : Comparaison des conductivités dans le sol des différents casiers après 7 mois de culture en fonction des apports en nutriments.....	25
Tableau 10 : Récapitulatif des tâches effectuées	31
Tableau 11 : synthèse des résultats d'analyses des différents flacons en NPP E. coli/100 mL	37
Tableau 12 : Poids par pieds de roquette en fonction des casiers	39
Tableau 13 : Poids par pieds de laitue pommée en fonction des casiers	39
Tableau 14 : Poids par pieds d'épinards en fonction des casiers	39
Tableau 15 : Poids par pieds de laitue romaine en fonction des casiers	39
Tableau 16 : Poids par récolte des fèves en fonction des casiers	39
Tableau 17 : Résultat de la dégustation à l'aveugle des roquettes.....	43
Tableau 18 : Résultats de la dégustation des laitues romaines avec connaissances des différents fertilisants	44
Figure 1 : Mécanisme d'ammonification puis de nitrification, disponibilité pour les plantes et stabilité dans le sol des différentes de l'azote	9
Figure 2 : Paramètres majeurs influençant la croissance et la survie d'E. coli.....	10
Figure 3 : Graphique du pH en fonction de la température le 29/07 à 14h30 (rapport de stage de 4ème année)	11
Figure 4 : Échelle du pH présentant les concentrations relatives d'ion hydrogène (H ⁺) et d'hydroxyde (OH ⁻) (Munroe, 2018).....	13
Figure 5 : Microplaques avec résultats classiques sur des urines (points bleus = puits répondant à la fluorescence).....	16
Figure 6 : Schéma explicatif des mécanismes d'alcalinisation du charbon et des échanges d'ions	17
Figure 7 : Photo des différentes granulométries de la plus importante à la plus fine (gauche à droite)	18
Figure 8 : Différence de turbidité entre les différentes eaux de lavage (granulométrie plus importante à gauche).....	19
Figure 9 : Frise chronologique des plantations et des récoltes du potager expérimental	24
Figure 10 : Diagramme à barre + IC - roquette	26
Figure 11 : Boîte à moustache – roquette	26
Figure 12 : Diagramme à barre et IC - épinards.....	27
Figure 13 : Boîte à moustache - épinards	27





Figure 14 : Dégustation à l'aveugle des roquettes et notes sur le goût.....	28
Figure 15 : évolution du pH en fonction du temps et de la dilution	36
Figure 16 : Graphique de l'évolution du pH en fonction du temps et de la quantité d'air dans le flacon	36
Figure 17 : Graphique de synthèse des concentrations en E. coli en fonction des flacons.....	37
Figure 18 : Diagramme à barre + IC - laitue pommée.....	40
Figure 19 : Boîte à moustache - laitue pommée.....	40
Figure 20 : Diagramme à barre +IC - laitue romaine.....	41
Figure 21 : Boîte à moustache - laitue romaine.....	41
Figure 22 : Diagramme à barre + IC - fèves.....	42
Figure 23 : Boîte à moustache - fèves	42
Figure 24 : Graphique présentant l'opinion des gens participants à l'étude sur l'utilisation d'urine comme engrais.....	45



Introduction

Les urines et les matières fécales sont la source majeure de pollution dans les eaux usées domestiques. Les matières fécales représentent la majorité de la pollution solide mais aussi des pathogènes alors que les urines à elles seules représentent 90% de la pollution azotée et 60% de la pollution phosphorée qui sont toutes les deux des pollutions solubles (Martin T. , 2017). Il est, à ce jour, très coûteux de traiter les eaux usées qui sont très chargées et qui contiennent différents types de pollution. Par exemple, le traitement de l'azote nécessite des infrastructures très importantes et une oxygénation des bassins qui coûte cher en énergie. De plus, dans les stations d'épuration, ces polluants ne sont pas entièrement traités puisque 30% de l'azote et 20% du phosphore sont rejetés dans les milieux aquatiques dont ils constituent une pollution majeure et conduisent à leur eutrophisation (Hampel, Hetzel, et Maniatis 2015). Dans le département de l'hérault par exemple, 10% des stations d'épuration ont un taux de saturation supérieur à 100%, ce qui conduit à des pollutions des cours d'eau dans un département où ils sont tous classés zones sensibles (ocsolutionssassainissement, 2020).

Il est donc intéressant de se tourner vers des solutions qui permettent de valoriser les urines et les matières fécales à la source afin de n'avoir plus que les eaux grises à traiter qui seront alors beaucoup moins chargées. Cette séparation à la source permet ainsi de traiter les différents flux de polluants en fonction de ce qu'ils contiennent, mais aussi de les valoriser lorsque c'est possible. C'est le cas des urines qui contiennent une grande quantité de nutriments dont les plantes ont besoin et qui ont une composition similaire aux engrais (Kirchmann and Pettersson, 1994).

De plus, l'agriculture d'aujourd'hui est basée sur l'ajout de fertilisant afin d'obtenir de meilleurs rendements, ces fertilisants contiennent de l'azote, du phosphore et du potassium. L'azote est présent en grande quantité dans l'air sous forme gazeuse et peut être fixé pour en faire de l'engrais grâce au procédé d'Haber-Bosch qui est très coûteux en énergie. Le phosphore quant à lui est extrait dans des mines au Maroc et en Chine mais ce n'est pas une ressource renouvelable, le pic de production commercial et abordable pourrait être atteint en 2030 selon certains chercheurs (Dana Cordell, Jan-Olof Drangert, Stuart White, 2009)

Bien que les urines semblent être une solution aux problèmes de raréfaction des ressources et de disponibilité en énergie, il ne faut pas oublier que bien que celles-ci soient stériles au moment où elles sont excrétées, elles ont tendance à subir des contaminations croisées (contaminations au contact de matières fécales) qui font qu'elles doivent être traitées pour être exemptes de pathogènes ou que l'application de celles-ci en temps qu'engrais doit tenir compte des risques sanitaires encourus et mettre en place les mesures barrières nécessaires afin de supprimer ces risques.

De plus, la problématique de la réutilisation des urines en agriculture est complexe, effectivement bien que les urines possèdent tous les nutriments nécessaires à la croissance des plantes, elles sont cependant 5 à 10 fois moins concentrées qu'un engrais classique, ce qui ajoute des contraintes de stockage et de transport. Mais ce n'est pas le seul problème, il est aussi important de maîtriser les phénomènes naturels de dégradation et de précipitation qui ont tendance à entraîner une perte de certains nutriments. En effet, lors du stockage des urines, le phosphore a une forte tendance à précipiter alors qu'au contraire l'azote va se volatiliser sous forme de NH_3 une fois que l'urée a dégradé l'urée en ammonium/ammoniac (OCAPI, 2022).

Les urines posent alors un problème qui peut être rencontré avec d'autres engrais, ce problème est la volatilisation de l'azote. Cette volatilisation a généralement lieu lors du stockage de l'engrais ou de son application. Les différentes formes de l'azote ne sont pas toutes soumises à ces risques de volatilisation. Les formes ammoniacales de l'azote sont par exemple beaucoup plus sensibles à la

volatilisation que les formes nitrates. Effectivement les formes ammoniacales comprennent différentes qui peuvent être volatiles ou solubles en fonction du pH.

C'est donc pour cette raison que de nombreux traitements des urines, en plus de les rendre stériles, cherchent à nitrifier l'azote pour limiter la volatilisation ou à fixer ces nutriments sur d'autres matériaux. C'est le cas du charbon, par exemple, qui est déjà utilisé comme amendement en agriculture et qui peut être enrichi avec des urines.

De plus, l'utilisation des urines est encore très peu réglementée, elle est souvent associée à la réutilisation des eaux de stations d'épuration qui elles-mêmes contiennent des résidus d'urines et de matières fécales. Cette réglementation est en train d'évoluer puisqu'une nouvelle norme européenne sera applicable à partir de l'été 2023. Cette norme n'analyse pas les mêmes paramètres que l'arrêté français jusqu'à maintenant utilisé. Elle a aussi l'avantage de ne pas analyser un taux d'abattement (qu'il est parfois difficile d'atteindre avec des eaux peu chargées) mais une quantité de pathogènes mesurée. Les tableaux récapitulatifs des normes françaises et européennes sont disponibles en annexe 2. L'évolution des lois concernant la réutilisation des eaux usées comme montrer qu'il est de plus en plus important de prendre ces ressources en compte et de travailler à les rendre facile d'utilisation et sans risque permettra sans doute de démocratiser leur utilisation.

Depuis que nous cherchons à valoriser les urines, différents traitements ont été testés afin de voir lequel correspond le mieux à chaque situation et lequel serait le plus adapté pour monter une filière de valorisation des urines. Les premiers tests réalisés par EcoSec se sont d'abord tournés vers la struvite qui a l'avantage d'être solide et donc d'être très facile à transporter même s'il faut beaucoup d'énergie pour la produire. La possibilité d'une hygiénisation par le stockage a alors été étudiée. Effectivement, l'OMS recommande un stockage de 6 mois avant d'utiliser les urines en agriculture. Cependant, dans les conditions testées (extérieur en France métropolitaine) il n'a pas été possible de monter que les urines étaient hygiénisées.

C'est donc pour cela que les recherches se poursuivent et se sont tournées vers d'autres méthodes. Dans cette étude seront présentés les résultats liés aux tests d'hygiénisation par modification du pH, qui s'inscrivent dans une série d'expérimentation sur le stockage des urines sous diverses conditions et les différents paramètres pouvant conduire ce stockage à assurer une certaine sécurité sanitaire. Ensuite, les résultats des premières expériences concernant la mise en place de filtres à charbon pour la stabilisation des urines fraîches seront présentés. Et enfin, nous terminerons avec les résultats des différentes récoltes obtenues sur le potager expérimental ayant permis de déterminer l'efficacité des urines en comparaison à d'autres engrais.

I - Mise en contexte du projet et résultats des précédentes expériences

Actuellement en contrat de professionnalisation et non en stage, le sujet de ces six derniers mois d'école s'inscrit dans la poursuite de mon sujet de projet de fin d'étude qui se trouvait lui-même dans la continuité d'une partie des expériences de mon stage de 4^{ème} année. Lors de ce stage, j'avais effectivement travaillé sur la réutilisation des eaux grises et des urines pour l'arrosage et la fertilisation d'un mur végétal. Le sujet des expériences menées cet été-là portait sur la qualité sanitaire des eaux grises en fonction de différents systèmes de traitement et d'un suivi des pathogènes dans les urines pour un stockage de 6 mois comme le recommande l'OMS (OMS, 2012). Des tests supplémentaires avaient été menés pour analyser les différents paramètres qui ont une influence sur l'augmentation du pH dans les urines. Dans la continuité de ces expériences sur le pH des urines et au vu des mauvais

résultats obtenus sur la bactériologie après le stockage de 6 mois, mon sujet de PFE s’est naturellement porté sur l’étude de différents paramètres de stockage et de modification du pH des urines afin de les hygiéniser. L’étude sur l’hygiénisation a été complétée par une expérience de valorisation agronomique sur un potager compartimenté permettant de tester différents types d’engrais et de traitement des urines. Le projet de ce contrat de professionnalisation porte donc maintenant sur la suite des expériences d’hygiénisation des urines grâce aux modifications de pH avec de nouveaux tests et l’exploration de la piste des filtres à charbon comme stabilisateur des urines. Enfin, les expériences sur le potager expérimental se sont poursuivies et ont évolué en fonction des cultures testées et des différents traitements des urines.

Cette partie va permettre tout d’abord de rappeler les principes fondamentaux de la transformation de l’azote et les propriétés des différentes formes, puis de présenter succinctement les résultats obtenus durant mon stage de 4^{ème} année et enfin d’évoquer mon projet de fin d’études, les résultats étant en lien avec l’hygiénisation des urines et leur pH.

I.1 - Formes de l’azote et assimilation par les plantes

L’azote dans les urines peut être présent sous différentes formes en fonction des conditions de stockage ou des traitements que les urines ont pu subir. Lors de son excrétion, l’urine contient de l’azote présent en grande majorité sous forme d’urée. Puis, sous l’action de différentes bactéries possédant l’uréase, cet azote va être ammonifié (transformé en azote ammoniacal). Et enfin sous certaines conditions (présence de bactéries nitrifiantes), l’azote ammoniacal va devenir de l’azote oxydé et finir sous forme de nitrates. L’ensemble de ce processus est présenté dans la figure ci-dessous.

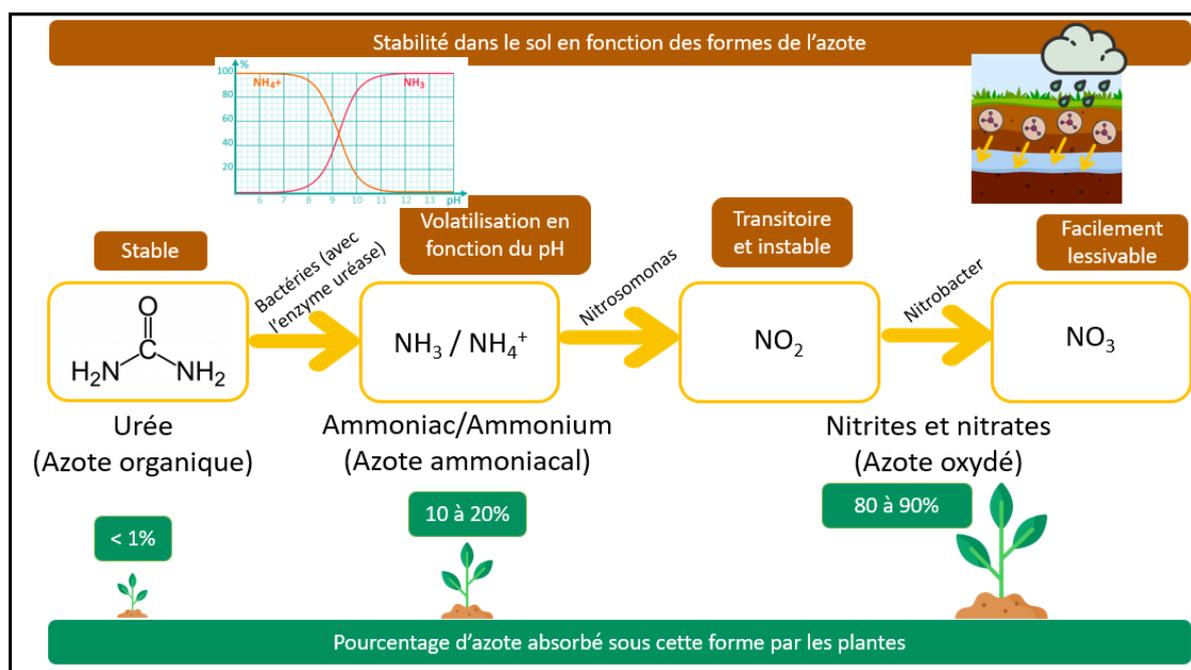


Figure 1 : Mécanisme d'ammonification puis de nitrification, disponibilité pour les plantes et stabilité dans le sol des différentes de l'azote

Ces différentes formes de l'azote ont des propriétés différentes et dans le cadre de l'utilisation des urines en agriculture, il existe pour chaque forme des avantages et des inconvénients. L'urée est la forme qui se trouve à l'origine dans les urines, mais très vite avec le stockage, cette forme sera minoritaire et laissera place à l'ammoniac. Pourtant, l'urée a l'avantage d'être très peu volatile, il n'y a donc pas de risque de volatilisation de l'azote lors de l'application de l'engrais. C'est par contre une forme de l'azote qui n'est pas directement assimilable par les plantes. Cela signifie que lorsque l'on applique l'engrais, il faut ensuite que les bactéries du sol dégradent l'urée et le transforme en nitrate pour que les plantes puissent l'assimiler. Si le sol est vivant, cette dégradation est efficace et on obtient un engrais avec une libération plus lente que les engrais nitrates, mais qui est également moins sensible au lessivage des sols. Cependant, sur un sol en mauvais état et pauvre, il est possible que cette dégradation prenne beaucoup de temps, voire ne soit pas complète, et il n'est donc pas optimum d'utiliser cette forme de l'azote pour tenter de nourrir les plantes.

L'azote ammoniacal est une forme qui sera dégradée plus rapidement dans le sol pour passer sous la forme de nitrate, mais c'est aussi la forme la plus volatile de l'azote lorsque le pH est basique. Effectivement, l'azote ammoniacal comprend deux formes (NH_4^+ et NH_3) qui sont en équilibre et dont le pKa est de 9,25. Lors de l'application de l'engrais, il y a donc de fortes chances de perdre une partie de l'azote par volatilisation et les engrais contenant de l'ammoniac ne peuvent pas être pulvérisés (Martin, 2020). Enfin, les formes nitrifiées sont beaucoup moins volatiles et plus disponibles pour les plantes. Elles ont donc une action directe à court terme mais elles peuvent être plus facilement lixiviées que l'urée. Il est tout de même important de préciser que la volatilisation dépend de phénomènes extérieurs aux formes de l'azote comme l'exposition au vent mais aussi le pH du fertilisant et le sol sur lequel celui-ci va être appliqué.

Suite à la contamination croisée provenant des matières fécales, l'urine contient différentes bactéries qui pour certaines d'entre elles possèdent l'enzyme de l'uréase. Ce sont ces bactéries qui permettent de passer de la forme organique à la forme ammoniacal de l'azote, mais pas de nitrifier cet azote ammoniacal. Cependant plusieurs mécanismes peuvent influencer la croissance et la survie de ces bactéries. Les mécanismes les plus importants sont présentés dans la figure 6.

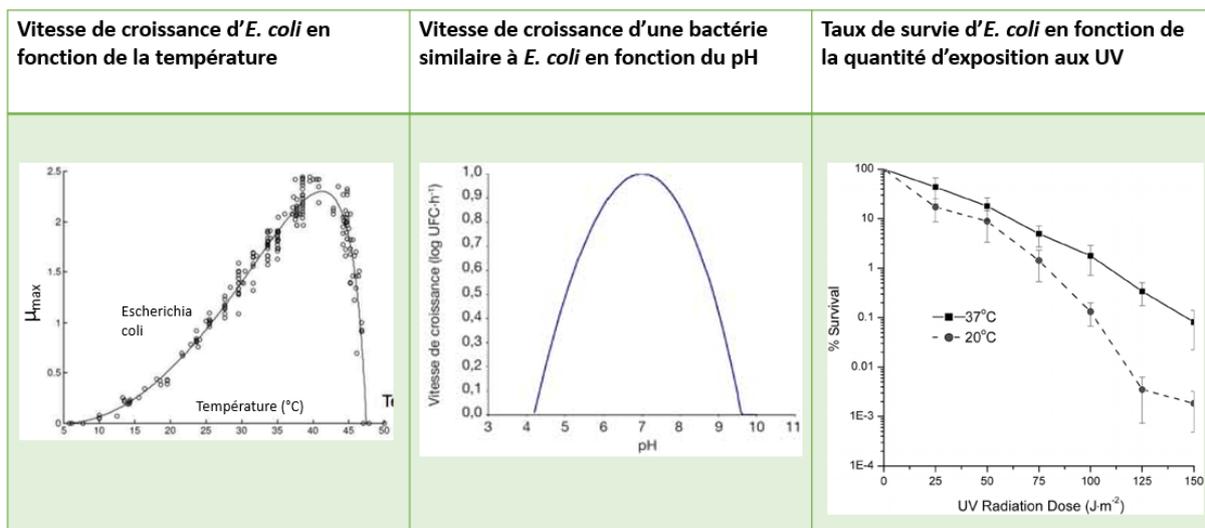


Figure 2 : Paramètres majeurs influençant la croissance et la survie d'*E. coli*



I.2 - Paramètres influençant le pH lors du stockage des urines

Lors de mon stage de 4^{ème} année, j'avais étudié l'influence de différents paramètres sur le pH des urines. Sachant que nous étions en train de réaliser la campagne de suivi des urines stockées 6 mois et que les résultats ne semblaient pas concluants, l'interrogation s'est portée sur les mécanismes pouvant agir sur l'augmentation de pH dans les urines qui est le facteur permettant de tuer les pathogènes et ainsi d'hygiéniser les urines.

Les différents paramètres étudiés étaient la température, le volume d'air dans le contenant de stockage, le taux de dilution, l'agitation des urines et l'ajout progressif d'urine.

Ces tests avaient alors montré que l'ajout progressif d'urine et l'agitation n'avaient pas d'influence sur le pH. Il n'y avait pas de différence car l'agitation et l'ajout d'urine ne modifie ni les formes de l'azote ni leur concentration dans les flacons. Le taux de dilution a une légère influence sur le pH puisque plus les urines sont diluées moins le pH augmente. De la même façon, plus le volume d'air représente une part importante du contenant de stockage, plus le pH va être élevé (plus de disponibilité de l'oxygène pour les bactéries). Mais ces différences sont minimes comparées à celles observées aux différentes températures. Les graphiques résumant ces résultats sont disponibles dans l'annexe 3.

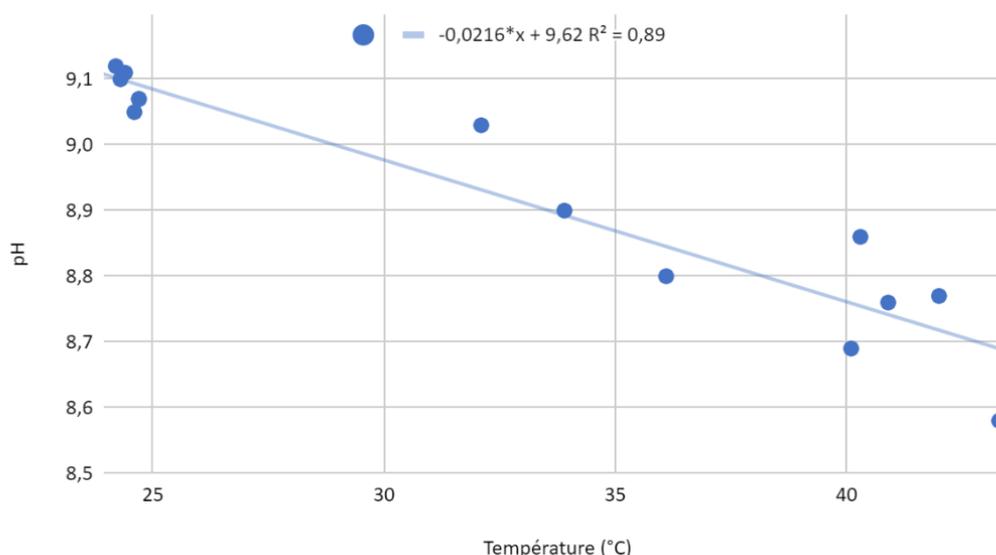


Figure 3 : Graphique du pH en fonction de la température le 29/07 à 14h30 (rapport de stage de 4^{ème} année)

Ces tests ont donc permis de montrer que le paramètre qui a le plus d'influence sur le pH est la température. Plus la température était élevée, plus le pH était bas comme montré sur le graphique ci-dessus. Les températures élevées se trouvaient aux alentours de 40°C alors que les températures basses se trouvaient autour de 25°C puisque les tests ont été réalisés en plein été (voir graphique ci-dessus). Les températures optimales d'activité des bactéries retrouvées dans les urines se trouvent autour de 37°C puisque ce sont des bactéries qui sont à la base présentes dans le corps humain. Et plus l'activité bactérienne est importante, plus le pH va être élevé, effectivement c'est la dégradation de l'urée en ammoniac par les bactéries qui va conduire à l'augmentation du pH. Il est donc possible que lorsque les températures sont supérieures à 37°C, il y ait une inhibition de l'activité bactérienne. La justification de cet écart de pH ne se justifie pas seulement par la différence de température mais aussi par une différence d'exposition aux UV. Les expériences qui ont suivi, ont à chaque fois montré que les UV avaient tendance à tuer une partie des bactéries présentes dans les urines.



I.3 - Hygiénisation des urines lors de la période hivernale

Les expériences menées pendant le projet de fin d'étude ont eu lieu sur deux mois en novembre et en décembre. Sachant que la température était le paramètre qui avait le plus influencé le pH, des tests sur celle-ci ont de nouveau été effectués avec cette fois des températures très froides dû à la période de l'année. À ces tests, se sont ajoutés des tests sur la modification du pH des urines grâce à l'ajout de potasse caustique. Le postulat qui a poussé à faire ces expériences est que pour tuer les bactéries présentes dans les urines, il faut un pH suffisamment élevé pour qu'il soit létal. La potasse contient des ions OH^- et K^+ une fois solubilisés. Les ions OH^- de la potasse permettent cette augmentation de pH et les ions K^+ apportent un intérêt agronomique supplémentaire aux urines.

Différents flacons contenant des urines avec ou sans potasse ont été exposés à des températures différentes. Après six semaines de stockage, les résultats ont montré qu'une partie de ces flacons avaient été hygiénisés puisque les bactéries *E. coli* n'étaient plus détectables, comme montré dans le tableau 1. Les résultats détaillés avec les valeurs d'*E. coli* pour chaque flacon se trouvent dans l'annexe 4. Les seuls flacons avec les deux dosages de potasse les plus importants ont été hygiénisés quel que soit le type d'urine. Les urines des toilettes sont plus contaminées que les urines des urinoirs et ont un pH bien plus élevé puisqu'elles subissent une forte contamination croisée du fait de la technique de séparation de celles-ci avec les matières fécales. Cela a aussi permis de montrer que dans le cas des urines d'urinoir, moins contaminées, les températures négatives, l'exposition aux UV et un dosage de potasse moins importants avaient aussi permis leur sécurité sanitaire.

Tableau 1 : Hygiénisation des urines après 6 semaines selon les conditions de stockage => absence/présence de *E. coli*

	Urine des toilettes	Urines des urinoirs
Témoin	Contaminé	Contaminé
N = K	Hygiénisé	Hygiénisé
N = 2K	Hygiénisé	Hygiénisé
N = 3K	Contaminé	Hygiénisé
Températures négatives variables	Contaminé	Hygiénisé
Exposition aux UV	Contaminé	Hygiénisé

C'est à la suite de tous ces résultats qu'il a été décidé de poursuivre sur la voie de la modification du pH des urines pour assurer une hygiénisation quelles que soient les températures et l'exposition du contenant de stockage.

II – Protocole d'hygiénisation avec modification du pH

Le choix d'hygiénisation s'est donc porté sur une modification du pH grâce à un ajout d'ions hydroxyde soit provenant de la potasse caustique (KOH), soit de la soude caustique (NaOH).

Le pH est un nombre allant de 0 à 14 qui traduit le rapport entre la quantité d'ions H^+ et d'ion OH^- , une solution est neutre lorsqu'ils sont présents en quantité égale, quand les ions OH^- sont majoritaires la

solution est basique alors qu'à l'inverse si ce sont les ions H^+ qui sont majoritaires, la solution est acide (voir figure ci-dessous).

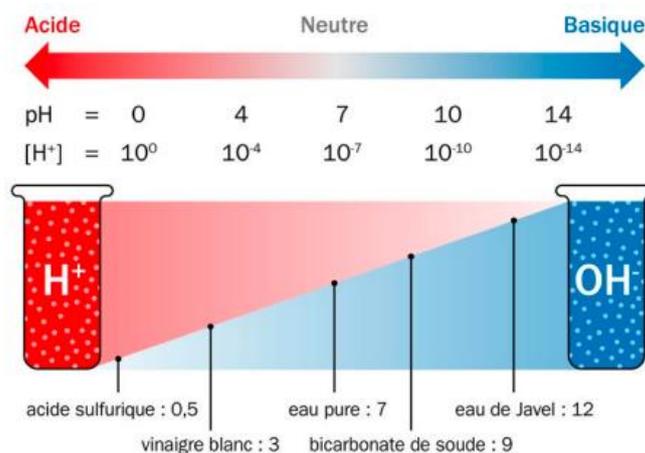


Figure 4 : Échelle du pH présentant les concentrations relatives d'ion hydrogène (H^+) et d'hydroxyde (OH^-) (Munroe, 2018)

Dans les urines la dégradation de l'urée en ammoniac/ammonium va consommer des ions H^+ ce qui va avoir tendance à faire augmenter le pH. Le but lorsque l'on ajoute de la potasse ou de la soude solide est que celle-ci se solubilise dans les urines et libère des ions OH^- qui vont participer à l'augmentation du pH.

Comme exposé précédemment, des tests sur la potasse ont déjà été réalisés dans le cadre du projet de fin d'étude en période hivernale. L'objectif de ces nouveaux tests étaient de voir si l'augmentation de pH était suffisante malgré aucune exposition à des températures beaucoup plus chaudes qui vont être favorables au développement bactérien.

Les tests menés à partir du mois de mai devaient regarder deux nouveaux paramètres qui sont, d'une part, le fait de traiter des cuves de 1000L dans lesquelles l'agitation est moindre. Et de faire des tests en flacons afin de voir si le dosage de potasse déterminé en hiver serait suffisant au vu des températures estivales.

II.1 - Mise en place des expériences

Pour l'ajout de potasse et de soude, les deux protocoles d'hygiénisation sont les plus proches possible l'un de l'autre pour pouvoir comparer les deux produits, sachant que la potasse caustique est plus chère mais permet d'obtenir une plus-value agronomique sur le produit final, alors que la soude est moins chère et va au contraire rajouter du sodium dans les urines qui en contiennent déjà beaucoup pour une utilisation en tant qu'engrais.

Lors des tests précédents, le dosage retenu pour le changement d'échelle est celui correspondant à une concentration en potassium total équivalent à la moitié de l'azote total contenu dans les urines. Les concentrations en nutriments dans les urines ont été considérées similaires à celles obtenues dans l'étude d'Udert souvent reprise pour servir de valeurs théoriques (Udert, Larsen, et Gujer 2006). La quantité d'azote théorique est alors de 8,1 g/L, celle de potassium de 2,2 g/L et celle de phosphore est de 0,54 g/L. Les valeurs de cette étude ont été choisies car elles sont très proches des résultats obtenus lors des différentes analyses sur les urines que l'on utilise pour les expériences.

Les expériences seront réalisées dans des conteneurs IBC de 1000 L qui sont les systèmes de stockage actuellement utilisés pour les urines récupérées sur les toilettes en location.

Le but est donc de voir s'il est possible d'hygiéniser l'ensemble du conteneur et d'assurer l'homogénéité des urines stockées.

Plusieurs systèmes sont possibles, tout d'abord l'ajout par l'ouverture du haut de la potasse une fois que la cuve est remplie d'urine, ou l'ajout de potasse avant le remplissage des urines et sa dissolution au fur et à mesure du remplissage, ou encore un système de filtre où les urines doivent passer par de la potasse solide avant d'arriver dans le conteneur de stockage ou enfin un système de mélange manuel de la cuve régulier.

Les premiers tests porteront sur l'hygiénisation après collecte des urines, l'ajout de potasse ou de soude se fera donc en une fois par le haut de la cuve et l'agitation sera faite immédiatement après l'ajout de manière manuelle (agitation de plusieurs minutes grâce à une perche à l'intérieur de la cuve).

Les urines utilisées sont donc des urines qui ont déjà été stockées depuis plusieurs mois et dont la sécurité sanitaire n'est pas assurée malgré ce stockage. Cependant, ces urines ont toutes été récoltées au même moment et ont été stockées dans les mêmes conditions, il devrait donc y avoir une certaine homogénéité dans les trois cuves IBC utilisées.

Pour ce qui est de la soude qui se présente aussi sous forme solide le système de mélange sera le même. Aucun test n'ayant été fait sur la soude le dosage de sa quantité se fera de manière à atteindre le même nombre de mol de OH^- qu'avec l'ajout de potasse.

Afin d'étudier l'influence des autres paramètres agissant sur le pH, des bouteilles témoins de 1,5L seront placées à différents endroits. Le but étant de voir si au sein de la cuve les mécanismes d'hygiénisation sont influencés par la température et par l'exposition aux UV. Pour les UV une bouteille opaque sera placée au niveau de la cuve à côté de la même bouteille non opacifiée, ces deux bouteilles recevront le traitement à la potasse. Une troisième et une quatrième bouteille sera placée au même endroit et ne recevra pas de potasse et l'une sera aussi opacifiée.

Pour ce qui est de l'étude des températures, une bouteille sera conservée au frigo et une seconde sera conservée dans l'étuve à une température constante de 30 degrés, les bouteilles recevront le traitement à la potasse et deux autres bouteilles seront placées aux mêmes températures mais sans potasse. L'étuve contiendra aussi une bouteille ayant reçu un dosage de potasse plus important ($N=K$), puisque l'étuve est la condition la plus favorable au développement des bactéries.

Les bouteilles conservées au réfrigérateur seront donc maintenues à une température constante de 4°C alors que celles conservées dans l'étuves seront maintenues à une température de 37°C. L'ensemble des calculs d'ajout de potasse et de soude sont disponibles en annexe 5.

II.2 - Résultats

Les premiers résultats des expériences ont été plutôt mitigés puisque contrairement à ce qui était attendu, les bouteilles et les cuves ayant été traitées à la soude ou à la potasse n'ont pas été hygiénisées directement (encore des bactéries sur le prélèvement 48h après traitement). L'ensemble des résultats sont présentés dans le tableau suivant (tous les résultats sont en NPP/ 100 mL). Le T0

correspond aux analyses des urines juste avant l'ajout des produits et l'exposition aux différentes températures et conditions.

Tableau 2 : Résultats des tests d'hygiénisation : nombre d'E. coli en NPP/100mL

	T0 (10/05) (avant traitement)	48h (12/05)	13 jours (23/05)
IBC 1000L - Potasse	230 511	23 027	23 027
IBC 1000L - Soude	23 027	230 511	154 964
Bouteille extérieur UV + pas potasse	230 511	23 027	2 303
Bouteille extérieur UV + potasse	230 511	23 027	2 303
Bouteille extérieur pas UV + pas potasse	230 511	28 590	23 027
Bouteille extérieur pas UV + potasse	230 511	23 027	23 027
Bouteille étuve + pas potasse	230 511	23 027	23 027
Bouteille étuve + fort dosage potasse	230 511	23 027	2 303
Bouteille étuve + potasse	230 511	23 027	23 027
Bouteille frigo + pas potasse	230 511	23 027	23 027
Bouteille frigo + potasse	230 511	23 027	23 027

Pour commencer, les résultats avant le traitement sont presque tous homogènes (sauf celui de la cuve dans laquelle a ensuite été ajouté la soude). Le taux d'E.coli est de 230 511 NPP/100mL ce qui est plus élevé qu'à la normale, les urines stockées depuis peu de temps ont généralement un taux d'E.coli autour des 20 000 NPP/100mL.

De plus, les résultats au bout de 48h sont quasiment tous similaires même pour les bouteilles témoins n'ayant pas subi de traitement. Seuls les résultats au bout de deux semaines semblent avoir plus de sens puisque les bouteilles exposées aux UV et celle qui a reçu un dosage de potasse plus important on atteint les 2 303 NPP/100mL, ce qui est encore insuffisant pour être hygiénisé.

L'interprétation de ces résultats étant compliquée, le laboratoire réalisant les analyses a été contacté afin de savoir si des erreurs avaient pu se glisser dans leur transmission des résultats ou s'ils avaient pu observer des différences avec les analyses habituelles. Il en est ressorti qu'effectivement il semblait y avoir un problème sur la lecture des microplaques servant à faire les analyses. La méthode utilisée est celle des microplaques pour l'analyse des eaux usées. Le problème rencontré est un manque de précision dans les résultats du fait d'une première dilution pas assez importante.

Effectivement, la méthode utilisée a été pensée pour des analyses d'eaux usées et non pas des urines pures qui ont une concentration bactérienne bien plus importante. Le système des microplaques est une analyse par dilution successive. La dilution la moins importante permet de déterminer le seuil de détection minimum alors que la dilution la plus importante détermine le seuil de détection maximum. Dans la technique utilisée communément pour nos analyses, la dilution la moins importante est une dilution au demi qui permet de dire que le nombre de bactéries est inférieur à 56 NPP/100 mL si aucun puits ne s'est allumé à la fluorescence. Alors qu'au contraire, si tous les puits se sont allumés, la dernière dilution permet de dire que le nombre de bactéries est supérieur à 280 000 NPP/100 mL.

Le problème récurrent rencontré lors des analyses précédentes est que tous les puits de la dilution au demi se sont allumés et un seul puits dans la dilution suivante (voir schéma ci-dessous). Les résultats obtenus peuvent donc être très différents en fonction de cet unique puits qui donne une réponse positive. Il est donc possible que des différences majeures entre certains résultats soient seulement

dû à une imprécision, c'est le cas entre les résultats indiquant 230 511 NPP/100 mL et ceux indiquant 23 027 NPP/100 mL.

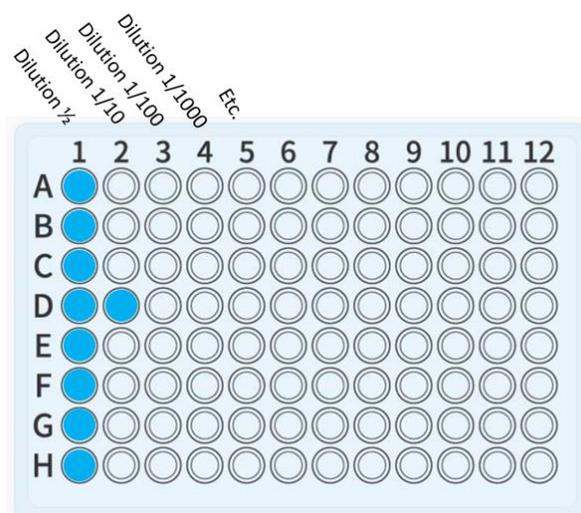


Figure 5 : Microplaques avec résultats classiques sur des urines (points bleus = puits répondant à la fluorescence)

La responsable des analyses au laboratoire a donc proposé de supprimer la première dilution (dilution au demi) afin de réduire les interférences observées et d'obtenir des résultats plus précis. Le seul inconvénient de cette méthode est que le seuil de détection est moins important puisqu'il correspond alors à inférieur à 100 NPP/100mL. Lorsque le laboratoire a testé cette nouvelle méthode sur les urines stockées non traitées qui avaient servi à remplir les bouteilles expérimentales, le résultat s'est avéré être complètement différent de l'analyse précédente qui donnait 230 511 NPP/100mL, cette fois le résultat était inférieur à 100 NPP/100mL.

Au vu des problèmes rencontrés lors de ces analyses, les expérimentations sur l'hygiénisations des urines ont été mises en pause en attendant de comprendre les différences de résultats obtenues par le laboratoire et qui remettent en cause tout le début de l'étude.

III - Tests sur les filtres à charbon

Le filtre à charbon est une technique de stabilisation des urines utilisée notamment dans les différentes coopératives séparant les urines à la source en Suisse. Le principe du filtre à charbon a aussi été beaucoup étudié en laboratoire dans le cadre de la récupération des nutriments des urines. Le but de cette étude sur les filtres à charbon est de réaliser tout d'abord une étude bibliographique de ce qui a déjà été fait sur le traitement des urines grâce à du charbon. Puis de réaliser une série d'expérience afin de comprendre quels sont les mécanismes qui font que les filtres à charbon utilisés par les suisses fonctionnent. Et enfin d'essayer de reproduire aux mieux ces mécanismes pour optimiser ce processus de traitement.

III.1 - Bibliographie

Les filtres à charbon sont utilisés avec différents objectifs, certains ne sont que des supports permettant l'installation de bactéries responsables de la nitrification alors que d'autres fonctionnent sur des mécanismes d'adsorption. Les matrice d'urine utilisée diffère aussi suivant les études.

Lorsque le charbon sert de support aux bactéries responsables de la nitrification, il n'est pas utilisé directement en agriculture, ce sont les urines qui sont appliquées sur les cultures et cela a pour principal avantage de ne pas créer d'odeurs lors du stockage des urines puisque le pH reste autour de 7 et que l'azote est sous forme de nitrates et ne peut donc pas se volatiliser (Benoît Molineaux, Pauline Dayer, Philippe Morier-Genoud, Ralph Thielen, Olivier Krumm et Uli Amos, 2021).

Différentes techniques ont été étudiées dans le cadre de l'adsorption, il est par exemple possible d'appliquer le charbon directement dans les champs afin de réduire la volatilisation (Taghizadeh-Toosi et al. 2012), grâce à l'étude d'un isotope spécifique de l'azote, il a pu être montré que cette technique permet effectivement de diminuer la volatilisation de 45% et que cet azote est ensuite absorbé par les plantes. Cependant, il est plus commun que les urines soient traitées avec le charbon avant leur application dans les champs dans la plupart des cas. Les taux d'adsorption sont souvent bien meilleurs pour le potassium et le phosphore que pour l'azote (Xu et al. 2018). C'est pour cette raison qu'il est recommandé d'utiliser des urines déjà hydrolysées (Liu et al. 2020).

L'utilisation de ce charbon ayant traité des urines en tant que fertilisant a plusieurs avantages : il permet de limiter la volatilisation de l'azote (contrairement à l'application d'urine simple) et il permet aussi de rendre les nutriments plus disponibles pour les plantes et d'avoir une libération de ces nutriments dans la durée (Liu et al. 2020). Si les nutriments sont plus disponibles pour les plantes cela est dû à la présence d'un biofilm dans les pores du charbon à la suite de l'imprégnation avec des urines. Ce biofilm permet à la fois d'augmenter les capacités de fixation des nutriments sur le charbon mais aussi sa capacité d'échange des nutriments avec les plantes (Schmidt et al. 2015).

Dans d'autres études, le charbon sert d'échangeur d'anion, ce charbon est alcalinisé avec de la potasse caustique, les ions Cl^- sont ainsi remplacés par des ions OH^- qui vont permettre une augmentation du pH (voir schéma explicatif ci-dessous). Cette augmentation de pH permet de réduire, voire de stopper, l'activité de l'uréase, ce qui va permettre de garder l'azote sous forme uréique et ainsi empêcher la volatilisation (Simha et al. 2018). Dans cette étude en particulier, le charbon n'a pas seulement pour intérêt de stabiliser les urines et de récupérer les nutriments, il permet également de déshydrater les urines. En effet, lorsqu'elles ne sont pas appliquées sur du charbon, il est difficile de déshydrater les urines surtout à basse température du fait de la fine couche d'huile qui se forme à leur surface. Ainsi le fait de faire chauffer les urines avec le charbon permet de résoudre ce problème.

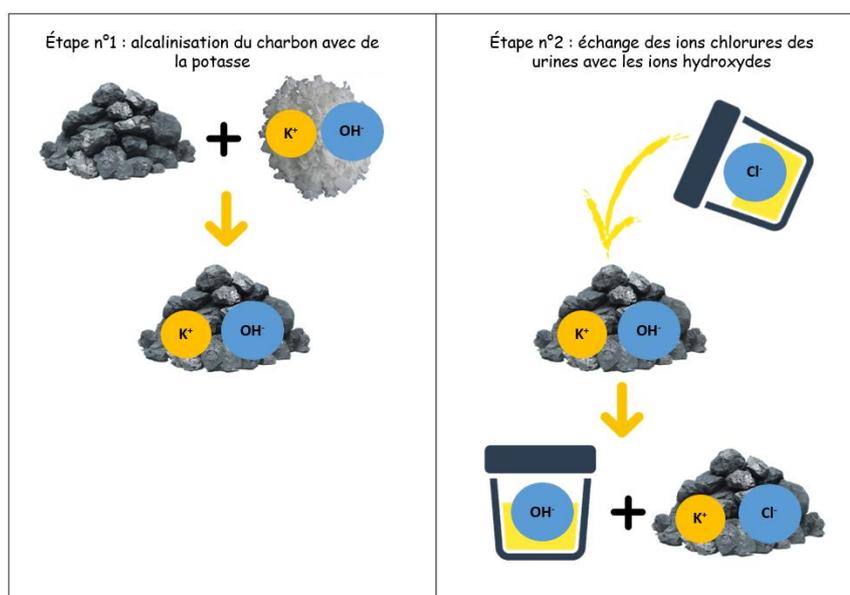


Figure 6 : Schéma explicatif des mécanismes d'alcalinisation du charbon et des échanges d'ions

Enfin, le traitement des urines grâce à du charbon semble permettre d'adsorber un certain nombre de produits pharmaceutiques, la fixation de ces produits se fait grâce à des liaisons de Van der Waals (Solanki et Boyer 2019). Dans ces études la plupart des produits pharmaceutiques sont adsorbés ainsi que la quasi-totalité de l'azote et du phosphore lorsque que le charbon sert à traiter des eaux usées. Lorsque le charbon sert à traiter des urines il permet d'adsorber les produits pharmaceutiques mais seulement une infime partie de l'azote et du phosphore du fait de leur forte concentration dans les urines et il arrive ainsi rapidement à sa capacité d'adsorption maximum en azote et en phosphore (Solanki et Boyer 2017).

Si les résultats de ces études sont assez différents concernant le type de nutriments ou de molécules fixés sur le charbon, les taux de recouvrement, ou encore les dosages de charbon par litre d'urine, c'est parce que les charbons utilisés sont tous très différents. Dans la plupart des cas ce sont des charbons d'essences de bois différentes ou des charbons fait à partir de la pyrolyse de déchets agricoles par exemple comme des épis de maïs (Zhang, Li, et Mahmood 2015) ou des épiluchures d'ananas (Otieno et al. 2021). De plus, dans de nombreuses études, les charbons ont été modifiés (souvent avec du magnésium) après leur pyrolyse pour augmenter leur porosité et ainsi leur capacité d'adsorption (Jena, Das, et Sarkar 2021).

Toutes ces études montrent donc qu'il est possible d'adsorber les nutriments mais aussi les polluants de l'urine sur du charbon en fonction des capacités de celui-ci. Afin de se rapprocher des filtres à charbon utilisés en Suisse mais aussi dans un souci de coût et de disponibilités des matières, il a été choisi d'utiliser du charbon de bois classique pour les expériences menées. Ce charbon est obtenu à partir de différentes essences de bois et a été acheté dans la grande distribution pour un faible prix (30 centimes le litre).

III.2 - Expériences

La granulométrie du charbon va faire varier sa surface de contact avec le liquide et ainsi une granulométrie plus faible devrait permettre une meilleure capacité d'adsorption. Les premières expériences se sont donc focalisées sur les capacités d'adsorption du charbon en fonction de sa granulométrie. Pour le choix des différentes granulométries à tester, le choix s'est fait à partir de ce qui est utilisé dans les études mentionnés précédemment. Dans trois de ces études le charbon est inférieur à 0,5 mm, dans trois autres la granulométrie est comprise entre 1 mm et 3 mm et dans deux autres elle est comprise entre 4 mm et 10 mm. Enfin, dans les filtres à charbon de la coopérative équilibre il y a deux granulométries différentes : une de 0 à 10 mm et une de 10 à 30 mm. Encore une fois, pour des questions de simplicité technique et de reproductibilité par un plus grand nombre, il a été choisi de ne pas prendre de tamis en dessous de 1 mm. Pour tester l'ensemble des granulométries testées dans les études, quatre granulométries différentes ont été choisies (visible sur la photo ci-dessous) : de 30 mm à 10 mm, de 10 mm à 2 mm, de 2 mm à 1 mm, inférieur à 1 mm.

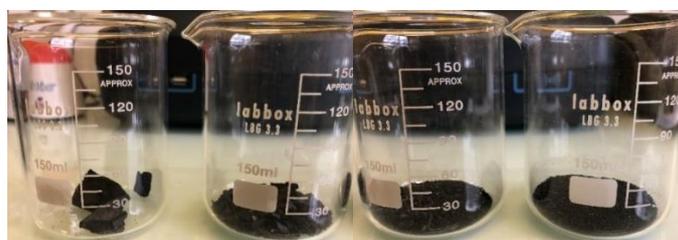


Figure 7 : Photo des différentes granulométries de la plus importante à la plus fine (gauche à droite)

Les deux premières catégories permettent de reproduire les granulométries utilisées dans les filtres Suisse et les deux plus petites sont plus représentatives de ce qui a été utilisé dans les différentes études menées en laboratoire.

- **Désorption**

La première étape des expériences consiste au lavage du charbon avec de l'eau déminéralisée. Dans la plupart des études le charbon est laissé toute une nuit dans de l'eau déminéralisée. Ici les tests ont été effectués en faisant plusieurs rinçages les uns à la suite des autres. La désorption permet de vérifier que le charbon ne va relarguer d'éléments alors que l'on fait seulement passer de l'eau déminéralisée, cela permet aussi d'enlever les particules les plus fines qui passent à travers le filtre (voir photo ci-dessous).



Figure 8 : Différence de turbidité entre les différentes eaux de lavage (granulométrie plus importante à gauche)

Deux grammes de charbon de chaque granulométrie a donc été introduit dans un bécher (photo), puis il a été ajouté 20 mL d'eau déminéralisée, soit assez pour recouvrir l'ensemble du charbon quel que soit sa taille. Cette opération a été répétée trois fois. Les filtres utilisés pour filtrer l'eau une fois le lavage effectué sont des filtres de 25 μm . L'eau déminéralisée a une conductivité de 5,78 $\mu\text{S/cm}$ avec la sonde portative utilisée. Les résultats des conductivité obtenues dans les eaux de lavage sont réunis dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Résultats tests de désorption après lavages successifs de charbon de granulométries différentes. 20mL d'eau déminéralisée pour chaque lavage

	Granulométrie	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)		
		1 ^{er} lavage	2 ^{ème} lavage	3 ^{ème} lavage
Charbon ①	10 à 30 mm	20,23	15,2	14,5
Charbon ②	2 à 10 mm	46,7	45,1	27,4
Charbon ③	1 à 2 mm	60,3	48,1	34,4
Charbon ④	< 1 mm	81,3	53	32,8

Ces conductivités sont à la fois la preuve qu'il existe une très faible désorption du charbon mais aussi que le lavage fonctionne. La désorption suite au premier lavage fait augmenter la conductivité par 4 mais cette conductivité reste très faible comparée à celle d'une eau potable minérale ou du robinet. On voit très clairement que plus la granulométrie est fine plus la désorption est importante mais aussi que bien que le fait de faire plusieurs lavages puisse mieux laver le charbon, il existe néanmoins une limite, car plus on effectue de lavages, moins ceux-ci sont efficaces. Un autre test a été effectué en laissant pendant trois heures le charbon ② dans 20 mL d'eau déminéralisée, la conductivité de l'eau filtrée après ces trois heures est alors de 67 $\mu\text{S/cm}$. Cette conductivité est donc supérieure à celle du premier test, ce qui signifie que le lavage a été meilleur mais pas de manière proportionnelle. Pour ce qui est du lavage, il ne semble donc pas forcément utile de faire tremper le charbon pendant des heures ou encore d'effectuer dix lavages à la suite. Pour les essais réalisés ensuite en colonne, il a été

choisi de considérer que le charbon était propre lorsque que l'eau de lavage qui ressortait de la colonne avait une conductivité inférieure à 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$, soit une conductivité dix fois moins importante que celle de l'eau du robinet.

- **Adsorption**

1) Eau du robinet

Lors de l'étude bibliographique, l'adsorption était le principal phénomène étudié, ce phénomène permet ainsi de fixer certains composés des urines (ions, nutriments, molécules pharmaceutiques, ...) sur le charbon. Le but est, soit de purifier les urines des composés indésirables dans un engrais, soit de fixer les nutriments des urines sur le charbon pour que celui-ci puisse servir d'engrais. Le but des expériences présentées ci-dessous est donc de voir comment le charbon va se comporter, tout d'abord avec de l'eau qui est un liquide très peu chargé puis avec des urines qui ont une composition différente et surtout une richesse en nutriments beaucoup plus importante.

Les premiers tests d'adsorption se sont donc portés sur un liquide très simple : l'eau du robinet. Ces tests vont permettre de déterminer les pourcentages adsorbés. Le laboratoire où les tests ont été effectués se situant à Montpellier, l'eau du robinet est très minéralisée, elle possède donc une conductivité supérieure à 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ARS, 2022) et était même en réalité de 715 $\mu\text{S}/\text{cm}$ le jour des expériences.

Les résultats des conductivités des eaux du robinet qui sont restées en contact avec le charbon dans un bécher (50 mL d'eau pour 2g de charbon lavé au préalable) sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Résultats tests d'adsorption - eau du robinet

	Granulométrie	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Pourcentage adsorbé (%)
Charbon ①	10 à 30 mm	657	8,1
Charbon ②	2 à 10 mm	628	12,2
Charbon ③	1 à 2 mm	586	18
Charbon ④	< 1 mm	577	19,3

Comme le charbon a été lavé et que la conductivité de l'eau de lavage (< 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est bien inférieure à celle de l'eau du robinet, on considère que les phénomènes de désorption sont négligeables. Dans le tableau on peut aussi voir le calcul du pourcentage de la conductivité qui a été adsorbé. On peut donc voir que la tendance est la même que pour la désorption, plus la granulométrie du charbon est fine, plus l'adsorption est importante.

L'eau du robinet contient principalement des ions simples comme le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, le chlorure ou encore des ions un peu plus complexes comme les carbonates et les sulfates (Brosillon, 2020). Une grande partie de ces ions sont aussi présents dans les urines mais ils ne sont pas tous des constituants principaux de la conductivité de celle-ci puisque les concentrations les plus importantes reviennent aux chlorures, au calcium, à l'azote et au potassium. Les tests suivants portent donc sur l'adsorption sur des urines.

2) Urines

Les tests sur les urines ont été effectués de la même façon que ceux pour l'eau du robinet, soit 50 mL d'urine dans un bécher avec 2g de charbon lavé. Les urines utilisées sont des urines qui ont été stockées, une partie de l'azote a donc été hydrolysée, elles sont donc sur un pH entre 8,5 et 9. La conductivité des urines avant leur contact avec du charbon est de 33,6 mS/cm. Le tableau suivant

présente les résultats des différentes conductivités pour les deux passages d'urines (même charbon mais urines différentes).

Tableau 5 : Conductivité et pourcentage d'adsorption des urines après contact avec du charbon de différentes granulométries

	Granulométrie	1 ^{er} passage		2 ^{ème} passage	
		Conductivité (mS/cm)	Pourcentage adsorbé	Conductivité (mS/cm)	Pourcentage adsorbé
Charbon ①	10 à 30 mm	25,51	24,1	27,5	18,2
Charbon ②	2 à 10 mm	20,5	39	26,82	20,2
Charbon ③	1 à 2 mm	20,04	40	24,25	27,8
Charbon ④	< 1 mm	19,64	41,5	24,55	26,9

Ces résultats montrent qu'il y a bien une adsorption d'une partie des nutriments contenus dans les urines et que cette partie est importante lors du premier passage (environ de 25 à 40 %) alors qu'elle l'est beaucoup moins lors du second passage (environ de 18 à 28 %). On peut donc conclure que du fait de la concentration en ions beaucoup plus importante que dans l'eau du robinet, une partie plus importante a été adsorbée. Cependant, on observe aussi que le charbon va très vite arriver à saturation puisqu'au deuxième passage seulement on observe une diminution de l'adsorption allant du tiers à la moitié par rapport à celle ayant eu lieu durant le premier passage. Bien que l'adsorption soit limitée dans le temps au fil des passages, il semblerait intéressant de savoir quels sont les ions qui ont été le plus adsorbés et quels sont les nutriments restants dans les urines.

3) Urines sur colonne

Pour réaliser les tests sur le type de nutriments adsorbés dans les urines, les tests ont été réalisés sur une colonne avec différentes granulométries de charbon. La hauteur de la colonne est de 60 cm et de diamètre 4 cm comme dans les études suivantes : (Taghizadeh-Toosi et al. 2012) et (Zhang, Li, et Mahmood 2015). Les trois granulométries retenues sont celles des charbons ②, ③ et ④ car ce sont celles qui ont permis d'obtenir des taux d'adsorption des ions autour de 40% lors des premiers tests. Les vingt premiers centimètres de la colonne ont été remplis avec le charbon ②, les vingt suivants avec le charbon ③ et les derniers vingt centimètres avec le charbon ④. Un rinçage à l'eau déminéralisée a été effectué jusqu'à ce que la conductivité de l'eau qui sortait de la colonne soit inférieure à 70 µS/cm, soit dix fois moins que celle de l'eau du robinet. Puis 200 mL d'urines ont été filtrées pour pousser l'eau déminéralisée présente dans la colonne. Enfin 100 mL d'urines sont passées à travers la colonne, des analyses ont été faites pour connaître leur composition avant et après leur passage sur la colonne. Les résultats de ces analyses sont compilés dans le tableau suivant :

Tableau 6 : Composition des urines avant et après leur passage sur colonne de charbon avec les pourcentages d'adsorption des nutriments

	Conductivité (mS/cm)	pH	Potassium K+ (mg/L)	Azote total (mg/L)	Phosphore total (mg/L)	DCO (mg/L)
Avant la colonne	31,4	8,75	8040	5570	339	7124
Après la colonne	32,4	8,59	6940	4810	296	6276
Pourcentage adsorbé	-	-	13,7	13,6	12,7	11,9

Les résultats de ce tableau semblent cohérents avec ceux obtenus lors des tests précédents, on voit que pour tous les nutriments testés, il y en a environ 13% qui sont adsorbés sur la colonne. On observe pourtant une très légère augmentation de la conductivité en sortie de la colonne qui peut venir d'une désorption plus importante qu'avec les autres tests du fait d'une technique de lavage différente ou d'un changement dans la forme de certains ions. Ces résultats montrent aussi que même lorsque le charbon est à son maximum d'adsorption (premier passage des urines sur un charbon neuf), cette adsorption ne permet pas de retirer les nutriments des urines et que celles-ci peuvent toujours être considérées comme des engrais.

En parallèle, des tests sur les formes de l'azote (bandelettes) ont permis de montrer qu'il n'y a ni de nitrites, ni de nitrates que ce soit avant ou après le passage sur la colonne. Cela signifie qu'il n'y a pas de changement des formes de l'azote et que lorsque la colonne n'est pas mise en culture ou que le temps de rétention est faible, il n'y a pas de mécanisme de nitrification.

Tous ces tests permettent donc de montrer que l'utilisation d'une colonne à charbon peut servir à fixer une petite partie des nutriments et à la vue des études menées sur certains produits pharmaceutiques. Cependant lorsque que le charbon est de taille relativement importante et qu'il est en faible quantité par rapport au nombre de litre d'urine filtrée, il semblerait que les phénomènes d'adsorption deviennent très vite négligeables et il en de même pour les phénomènes de désorption.

Il est donc intéressant de penser aux mécanismes de colonisation du charbon par des bactéries nitrifiantes afin que le filtre à charbon serve de matrice aux bactéries plutôt que de système de traitement en lui-même.

III.3 - Nitrification

Comme présenté précédemment, la nitrification est un processus réalisé par des bactéries dites nitrifiantes et qui permet de transformer l'azote ammoniacal en azote organique (nitrates) (voir figure n°5).

Dans les urines, l'azote est présent à l'origine sous forme d'urée qui est de l'azote organique. Les bactéries présentes dans les urines vont très vite transformer cet azote organique en azote ammoniacal. Le problème de l'azote ammoniacal est qu'il est très volatil et qu'il n'est pas directement assimilable par les plantes.

Le but du filtre à charbon serait donc de servir de support bactérien pour les bactéries qui sont responsables de la nitrification (*Nitrosomonas* et *Nitrobacter*). Et, ainsi, grâce à ce filtre, de transformer l'azote ammoniacal en nitrates qui est une forme stable (pas de volatilisation) et plus facilement assimilable par les plantes.

Afin de voir s'il était possible qu'une telle population bactérienne s'installe d'elle-même, un filtre à charbon a été mis en place. Ce filtre était constitué de deux granulométries différentes : 10 à 30 mm et 2 à 10 mm pour un volume total de 3L. Ensuite il a été versé sur le filtre 0,5L d'urines fraîches afin d'ensemencer le charbon. Après deux semaines, des tests ont été effectués au laboratoire afin de comparer la composition des urines avant et après le filtre, les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 7 : Composition des urines avant et après passage sur le filtre à charbon

Paramètres	Avant le filtre	Après le filtre
pH	5,40	7,80
DCO (mg/L DCO)	6972	7802
N total (mg/L TNb)	7810	8920
P total (mg/L PO ₄ ³⁻ -P)	460	418
K ⁺ (mg/L K)	2120	2750
NO ₂ (mg/L)	0	3
NO ₃ (mg/L)	5	20

Les résultats présentés dans le tableau montrent qu'il n'y a pas eu d'adsorption des nutriments sur le filtre, même minime, puisqu'au contraire, que ce soit pour la DCO, l'azote ou le potassium les concentrations sont légèrement plus élevées en sortie. Cela peut être dû à un relargage de ces mêmes nutriments adsorbés dans les semaines qui ont précédés ou cela peut simplement être dû à l'imprécision des mesures et à la variabilité des conditions de prélèvement. Pour confirmer, cette tendance il faudrait refaire cette expérience plusieurs fois et voir si la quantité d'urines mise avant l'expérience sur le charbon influence cette tendance. Le phosphore a quant à lui légèrement diminué, cette fois on peut penser qu'une partie a été adsorbée mais encore une fois cela peut être dû à l'imprécision des résultats et il conviendrait de réitérer l'expérience.

Enfin, il semblerait que l'ensemencement bactérien, grâce aux urines, ait fonctionné puisqu'avant le filtre il n'y a pas de nitrites et très peu de nitrates (3 mg/L) et qu'après le filtre on retrouve des concentrations bien plus importantes pour les nitrites (5 mg/L) et pour les nitrates (20 mg/L). Ces résultats sont encourageants pour la poursuite des expériences sur le filtre à charbon. Le but sera ensuite d'arriver à quantifier quel pourcentage de l'azote organique est nitrifié lors du passage sur le filtre à charbon et d'essayer de modifier les temps de séjour dans le filtre pour obtenir le plus de nitrification possible.

IV - Résultats et poursuite d'expérience sur le potager expérimental

Le potager expérimental a été mis en place en novembre 2021 lors du projet de fin d'étude afin de comparer les croissances de différents végétaux avec des urines ayant subi différents traitements et des engrais plus conventionnels. Lors de la présentation des résultats du projet de fin d'étude, le potager expérimental était en culture depuis moins de deux mois et bien qu'aucun légume n'ait pu être récolté afin d'avoir un résultat quantitatif en fonction des différents types d'engrais, les résultats visuels annonçaient déjà de grandes différences sur les récoltes à suivre. Pour rappel, le potager expérimental est composé de 7 compartiments différents, le premier sert de casier témoin et n'est arrosé qu'avec de l'eau, le second est arrosé à l'eau avec une fertilisation à l'engrais universel, le troisième est fertilisé avec Aurin (engrais fait à partir d'urines) et les quatre derniers casiers sont fertilisés grâce à des urines stockées avec différents dosages de potasse. À partir du mois de février, les récoltes des différents légumes se sont enchaînées avec des résultats pouvant être très différents en fonction des variétés. En parallèle, des tests quantitatifs et des tests qualitatifs ont été effectués avec des dégustations à l'aveugle.

IV.1 - Résultats quantitatifs

Depuis le mois de février la récolte des premiers légumes plantés en novembre a été effectuée (roquettes, salades rouges, salades claires, épinards, fèves). Des plantations de printemps ont ensuite été effectuées et récoltées au mois de mai (roquettes, petits pois, épinards, ...). Du fait de nombreux problèmes avec les pucerons, la plupart de ces résultats ne sont pas exploitables. Le potager a ensuite été entièrement remplacé avec des plantations d'été (solanacées) à la mi-juin (voir schéma ci-dessous).

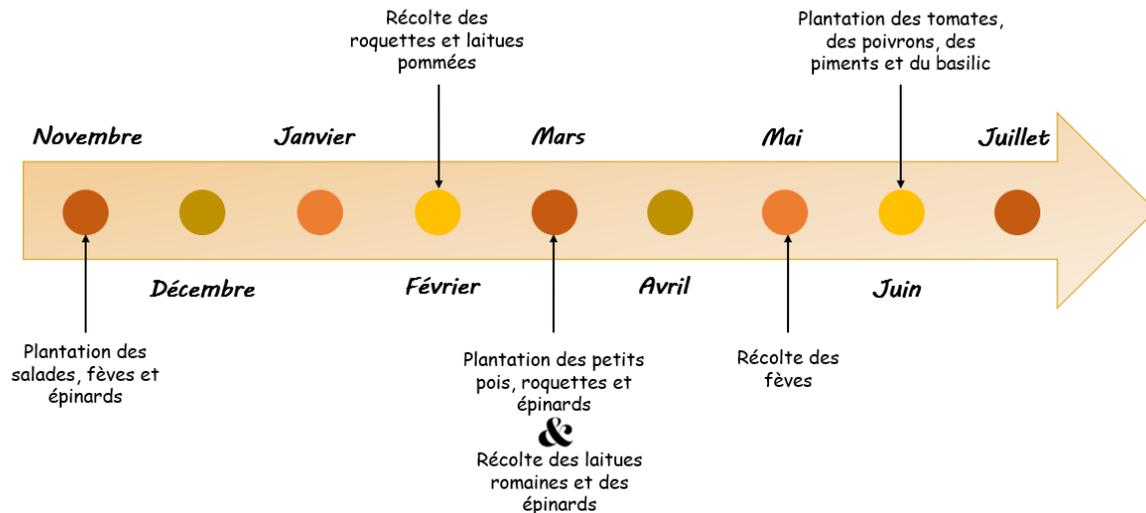


Figure 9 : Frise chronologique des plantations et des récoltes du potager expérimental

Pour les cultures d'hiver et de printemps, les apports en engrais sont restés les mêmes tout au long de la culture avec des apports en azote semblables pour toutes les cultures. Par contre, les apports en phosphore et potassium étaient différents en fonction de la composition de chaque engrais. Le tableau suivant présente ces apports, les quantités sont données pour chaque semaine. Les valeurs présentes dans le tableau sont les valeurs données par les fabricants pour l'engrais universel et pour Aurin, et pour les urines ce sont des valeurs théoriques (Udert, Larsen, et Gujer 2006) avec, lorsque c'est le cas, un calcul pour la potasse qui a été ajoutée, le détail des calculs est présent en annexe 5.

Tableau 8 : Apport en nutriments suivant les différents casiers pour chaque semaine

	Témoin	Engrais universel	Aurin	Urine	Urine + potasse N = K	Urine + potasse N = 2K	Urine + potasse N = 3K
N	0g	4,9g	4,2g	4,05g	4,05g	4,05g	4,05g
P	0g	3,5g	0,4g	0,3g	0,3g	0,3g	0,3g
K	0g	4,2g	1,8g	1,1g	4,05g	2g	1,35g

Lors du renouvellement du potager avec le passage aux cultures d'été, le potager a été laissé au repos pendant trois semaines en terme de fertilisation. Ensuite, la fertilisation en fonction des casiers a légèrement été changée. Les cinq premiers casiers sont restés les mêmes mais les deux derniers ont été changés. Le casier 6 sert maintenant à tester les urines stérilisées avec de la soude. Cela va permettre de voir si l'apport supplémentaire en sodium (Na⁺) va poser un problème pour la croissance des plantes. Enfin sur le dernier casier sera testé un apport en engrais variable en fonction des besoins

des plantes suivant leur stade de croissance, cet apport en fertilisant sera fait à partir d'urines et de potasse. De plus, les quantités d'engrais universel et d'Aurin ont été légèrement revues pour atteindre exactement 4,05g d'azote par semaine pour chaque casier et ainsi avoir des quantités d'azote plus proches entre les différents casiers.

- **Conductivité**

Au moment du changement de culture, des tests ont été effectués sur la conductivité du sol pour voir s'il y avait des accumulations de nutriments dans celui-ci du fait d'une fertilisation continue. Ce test a été effectué le 9 juin, soit sept mois après la mise en place des premières cultures et donc le début de la fertilisation. Pour mesurer cette conductivité, des échantillons de sol ont été prélevés (10 mL de sol par casier) et ils ont été mis dans 25 mL d'eau pendant 2h afin de laisser le temps aux sels de passer dans l'eau. La conductivité de cette eau a ensuite été mesurée après filtration. Les conductivités obtenues sont réunies dans le tableau suivant (toutes les conductivités sont en mS/cm).

Tableau 9 : Comparaison des conductivités dans le sol des différents casiers après 7 mois de culture en fonction des apports en nutriments

	Témoin	Engrais universel	Aurin	Urine	Urine + potasse N=K	Urine + potasse N=2K	Urine + potasse N=3K
Conductivité	0,53	1,15	0,95	0,69	0,70	0,59	0,53
Total nutriments ajoutés par semaine	0 g	12,6 g	6,4 g	6,3 g	9,3 g	7,3 g	6,8 g

Les résultats obtenus sont très différents en fonction du casier et donc du type de fertilisation. Les différences peuvent s'expliquer de plusieurs façons. Tout d'abord du fait que les apports en nutriments totaux ont été différents en fonction des casiers puisque seules les quantités d'azote étaient similaires. Par exemple, l'engrais universel était le seul à apporter une quantité importante de phosphore. Ensuite, les nutriments n'ont pas été apportés sous la même forme dans tous les casiers, par exemple dans l'engrais universel l'azote est sous forme de sulfates d'ammoniaque (azote sous forme ammoniacal) alors que dans les urines l'azote est présent sous deux formes différentes que sont l'azote ammoniacal et l'azote organique (urée). Enfin, dans le produit Aurin, l'azote est ajouté sous forme d'azote ammoniacal et d'azote nitrique. Pour une même quantité d'azote la conductivité peut donc être différente, effectivement l'azote organique n'est pas un sel et ne va donc pas faire augmenter la conductivité tant qu'il n'est pas transformé en ammoniac ou en nitrate par les bactéries du sol.

- **Récoltes**

La première récolte a été celle des roquettes, on pouvait déjà voir sur les photos de suivi qu'il y avait une grande différence entre les différents casiers, celle-ci s'est effectivement confirmé avec les analyses des poids des différents plants de chaque casier. En effet, chaque casier contenait cinq plants qui ont été pesés séparément, le détail est disponible en annexe 6. Des tests statistiques ainsi que le tracé de différents graphiques permettent de mettre en évidence les différences qui sont significatives et celles qui ne le sont pas. Les valeurs à comparer sont des séries de valeurs numériques regroupés sous une bannière non numérique. Pour tester la normalité des valeurs et l'homoscédasticité des variances, des tests d'Anderson-Darling et de Bartlett ont été réalisés. Comme aucune des séries de valeurs n'est normale et que l'homoscédasticité des variances n'a pas pu être vérifiée, il n'a donc pas été possible de réaliser des tests ANOVA (pas de normalité et d'homoscédasticité), le choix s'est donc porté sur des tests non paramétriques qui sont les tests de Kruskal-Wallis.

1) Roquettes

Pour les roquettes, avec le test de Kruskal-Wallis, une différence significative a été observée lorsque l'on compare l'ensemble des valeurs avec une p-value de 0,001. Pour rappel, la différence est significative lorsque la p-value est inférieure à 0,05. Lorsque l'on enlève les valeurs du casier témoin, qui sont celles qui sont les plus éloignées, on obtient une p-value de 0,02. Les secondes valeurs les plus éloignées de la moyenne sont celles du casier fertilisé avec Aurin. Une fois que l'on retire ces valeurs du test, la différence n'est plus significative (p-value de 0,08). Il n'existe donc pas de différence significative entre les casiers fertilisés avec les urines et celui fertilisé avec l'engrais universel.

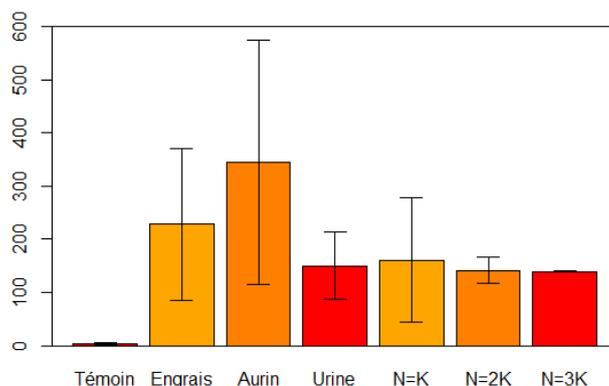


Figure 10 : Diagramme à barre + IC - roquette

Sur le diagramme à barre ci-dessus on peut voir qu'au vu des différents intervalles de confiance, la différence de poids entre les casiers avec les urines et ceux avec Aurin et l'engrais universel n'est pas si importante. On voit effectivement que pour Aurin l'intervalle de confiance est beaucoup plus grand que pour les autres casiers, cette différence s'explique par une plus grande variabilité des poids au sein de ce casier (poids allant de 146g à 623g). Cette variabilité est aussi visible sur le graphique suivant (boîte à moustache) puisque les barres aux extrémités font état des minimums et des maximums dans chaque casier, alors que les boîtes sont délimitées par les quartiles et que le trait plus épais représente la moyenne.

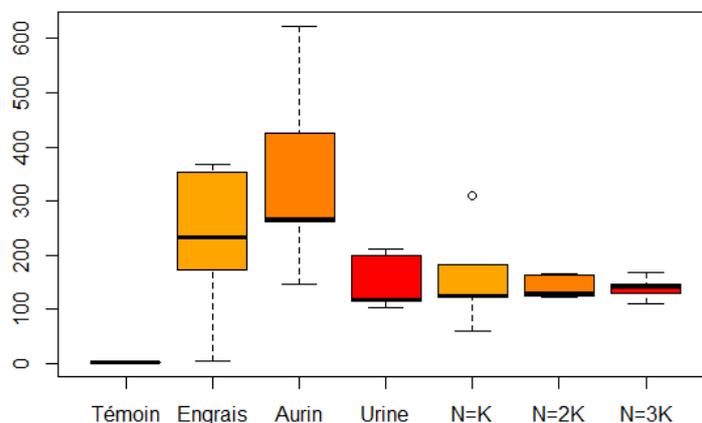


Figure 11 : Boîte à moustache – roquette

2) Epinards

Le même protocole d'analyse statistique a été suivi pour étudier les différences de poids entre les pieds d'épinards. De la même façon, cinq plants par casier avaient été plantés en novembre et ont été



récoltés début mars. Là encore, pour certains casiers une analyse visuelle permet déjà d’observer une différence majeure de croissance et donc de rendement. Et là encore aucune valeur ne respectait la normalité, ce sont donc des tests de Kraskal-Wallis qui ont été effectués. Le test effectué sur l’ensemble des valeurs indique une différence significative entre celles-ci (p-value = 0,0001), il en est de même pour le test sur les valeurs sans le casier témoin (p-value = 0,001) et celui sans le casier témoin et sans Aurin (p-value = 0,007). Bien que la différence ne cesse de diminuer, et dans le même temps la p-value d’augmenter, ce n’est pas suffisant pour qu’il n’y ait plus de différence significative entre les casiers. Afin de voir quels peuvent être les casiers qui sont responsables de cette différence, les mêmes graphiques que précédemment ont été tracés (diagramme à barre avec intervalle de confiance et boîte à moustache). On peut les voir ci-dessous en figure 16 et 17.

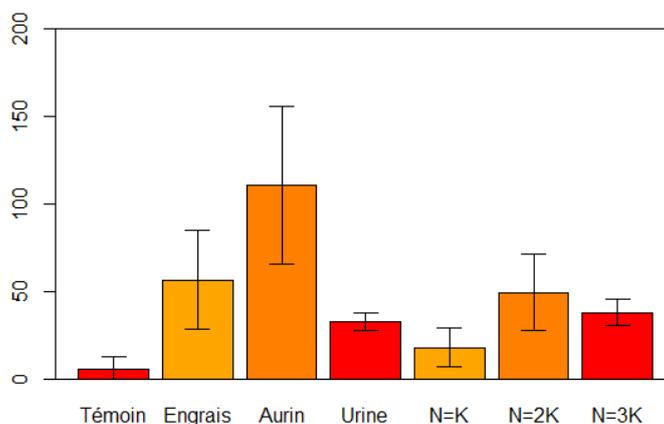


Figure 12 : Diagramme à barre et IC - épinards

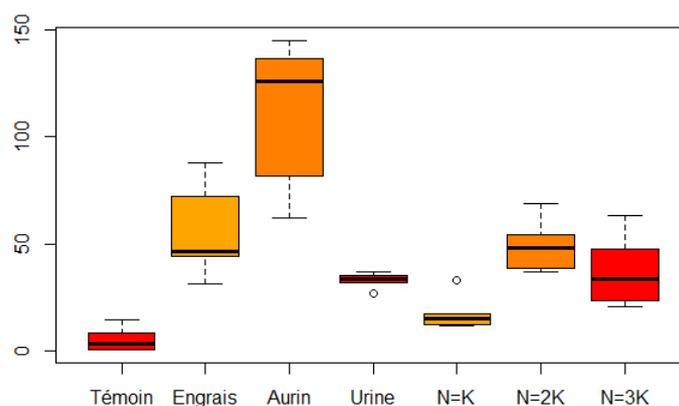


Figure 13 : Boîte à moustache - épinards

Sur ces graphiques on voit que les séries de valeurs qui s’éloignent le plus de la moyenne sont celle de l’engrais universel et celle des urines traitées avec le plus fort dosage de potasse. Les tests ont donc été refaits en enlevant à chaque fois soit l’une des valeurs soit l’autre. Les résultats des tests montrent qu’il y a toujours une différence significative entre tous les casiers contenant de l’urine alors qu’il n’y en a pas entre les urines avec de plus faibles dosages de potasse et l’engrais universel. Cela signifie donc que c’est plutôt les fortes concentrations de potassium qui ont légèrement fait baisser les rendements de la culture.

3) Laitue romaine et pommée

Pour ces deux variétés de salades, les mêmes tests et tracés de graphique qu’effectués précédemment ont été réalisés, et les résultats complets sont disponibles dans l’annexe 7. On peut tout de même noter que seul le casier témoin est significativement différent des autres en terme de rendement.



4) Fèves

Pour les fèves, le casier témoin n'est pas celui qui est le plus éloigné de la moyenne, c'est celui de l'engrais universel pour lequel il n'y a quasiment pas eu de récolte. Il y a donc une différence significative entre tous les casiers et ce même si l'on retire le casier de l'engrais. Le second casier à être différent significativement est le dernier (urines avec le plus petit dosage de potasse). C'est de loin celui qui a donné les meilleures récoltes, l'ensemble des graphiques sont disponibles dans l'annexe 7.

Ces résultats peuvent sembler très étonnants et sont difficiles à interpréter, cela s'explique en grande partie par une invasion massive de pucerons qui a complètement empêché la récolte dans certains casiers. Le fait que les fèves soient des fixateurs d'azote, les cultures ont sûrement été moins influencées par les apports en urines.

IV.2 - Résultats qualitatifs

Deux dégustations ont été effectuées, la première en cachant aux participants quelles étaient les salades fertilisées avec des urines et la seconde en annonçant à l'avance le type de fertilisant utilisé pour chaque plantation. Le but de ces deux méthodes différentes était de voir si le fait de connaître le type de fertilisant influençait l'avis des participants (voir photo ci-dessous).



Figure 14 : Dégustation à l'aveugle des roquettes et notes sur le goût

Le problème de ce type d'expérience est le manque de précision, pour ces deux dégustations une dizaine de personnes ont participé, ce qui est trop peu pour tirer des conclusions certaines. De plus, le goût est quelque chose de subjectif par définition et qui dépend beaucoup des personnes et qu'il est difficile de ranger dans des catégories ou des notes afin de pouvoir transformer ces résultats qualitatifs en résultats quantitatifs. Cependant, ces tests pourront tout de même permettre d'éventuellement dire qu'il n'y a pas de différence de goût négative pour les salades ayant été fertilisées avec urines.

Effectivement, la première dégustation s'est faite sur des roquettes (différences en termes de rendement très importante en fonction du type de fertilisant) et les salades qui ont eu le plus de succès sont celles qui ont été fertilisées avec des urines et plus particulièrement celles dans lesquelles de la potasse a été ajoutée. Pour la seconde dégustation, les résultats sont presque similaires, les salades ayant été le plus appréciées sont celles fertilisées avec Aurin et avec des urines sans différence majeure pour celles dans lesquelles de la potasse a été ajoutée. L'ensemble des résultats de ces dégustations sont disponibles en annexe 8.

Ces résultats permettent donc de voir qu'il ne semble pas y avoir de problème avec la fertilisation aux urines pour le goût des végétaux. Au contraire il pourrait être exploré de savoir si l'apport d'éléments comme le calcium, le magnésium ou encore les chlorures permettent même d'améliorer le goût de ceux-ci contrairement à un engrais classique qui se contente d'apporter les éléments majeurs.

Pour ce qui est de l'influence de la connaissance de la fertilisation avec des urines sur l'avis des participants, il n'est pas clair que cela ait pu avoir une quelconque influence dans les études menées ici. Cependant, des études précédentes avaient été menées dans le cadre du projet Valurine (fertilisation de la vigne avec des urines) et elles avaient montré qu'il y avait bien une influence du fait que les participants soient prévenus du type de fertilisant. Lors de cette étude, le vin dégusté était le même puisque les raisins fertilisés avec des urines et ceux fertilisés avec un engrais classique avaient été mélangés. Pourtant, la quasi-totalité des participants a cru voir une différence entre les deux types de vin, avec une tendance à trouver que le vin soi-disant fertilisé avec des urines avait un goût plus prononcé (voir résultats de l'étude Valurine en annexe 9).

IV.3 - Choix des variétés et analyse des résultats

Le choix des variétés s'est fait tout d'abord en fonction de la saison et du climat de la région mais aussi en fonction des différences et des mécanismes que nous voulions vérifier ou démontrer.

Pour ce qui est des épinards et des différentes variétés de salades le but était d'utiliser des cultures simples et rapides qui sont habituellement moyennement demandeuses en azote. Nous avons aussi voulu tester différentes légumineuses, car bien qu'elles soient capables de fixer l'azote et n'ont pas vraiment besoin de celui présent dans les urines ou dans un engrais, elles ont cependant besoin d'un apport en phosphore important. Le choix s'est ensuite porté sur les solanacées qui sont des variétés très exigeantes que ce soit en terme d'azote mais aussi de potassium.

Les résultats ont montré unanimement que les urines avaient un pouvoir fertilisant équivalents aux engrais conventionnels. Il ne semble pas y avoir eu de problème dû à la salinité des urines, ni à leur pH élevé. Cependant, il n'a pas pu être démontré que l'ajout de potasse dans les urines ajoutait une plus-value agronomique. Pourtant, des apports en potassium importants peuvent aider les plantes dans le développement de plusieurs de leurs mécanismes vitaux. C'est le cas de la régulation de la pression de l'eau (turgescence) qui leur permet de lutter contre le stress hydrique mais aussi du développement du transport des nutriments, de l'équilibrage de la charge électrique ou encore d'une meilleure résistance aux parasites.

Les tests statistiques n'ont pas permis de montrer une différence significative entre les casiers ayant reçu des urines simples et celles auxquelles ont été ajoutés de la potasse. Cependant, dans le cas des fèves, les casiers ayant reçu un apport de potassium supplémentaire ont effectivement eu de meilleures récoltes car ils ont été moins infestés par les pucerons. Les casiers sont trop petits et ils sont tous situés les uns à la suite des autres, ce qui ne permet pas vraiment de tirer des conclusions sur cette récolte. Les effets de bords ont pu jouer un rôle très important puisque le dernier casier de la ligne est celui qui a de loin eu la meilleure récolte (différence significative avec les autres casiers).

Il pourra cependant être intéressant de voir si pour les récoltes des solanacées, le casier ayant reçu des apports d'engrais variables avec de fort ajout de potassium au moment de la formation des fleurs et des fruits aura une différence plus importante avec les autres.

Conclusion

Le choix de faire ma dernière année de diplôme d'ingénieur en alternance est un choix qui m'a permis de mieux connaître le monde de l'entreprise et d'y être intégrée au même titre que n'importe quel salarié. Cela m'a permis de me faire un avis plus précis sur mon projet professionnel à travers les différentes tâches que j'ai pu exercer mais aussi de pouvoir participer à la réalisation de projet dans leur ensemble.

J'ai tenté d'apporter à l'entreprise les connaissances que j'avais pu acquérir au cours de mes études et de mes expériences professionnelles précédentes afin de mener à bien une étude sur l'hygiénisation des urines et leur valorisation agronomique de la manière la plus scientifique et objective possible. Les connaissances acquises lors des différents cours techniques reçu à Polytech m'ont surtout servi à réaliser les analyses au laboratoire mais aussi à utiliser des logiciels comme R. Les différents cours suivis ainsi que les nombreux projets réalisés m'ont aussi permis d'acquérir un esprit pragmatique et d'être la plus efficace possible, que ce soit dans la réalisation d'une tâche manuelle comme dans la rédaction de rapports, de devis, ou autre.

Le fait de travailler dans une petite entreprise m'a permis d'acquérir de nombreuses connaissances dans des domaines très variés, car bien que chacun ait son rôle à jouer dans l'entreprise, lors des deadlines de chantiers importants, tout le monde travaille en équipe pour finir les chantiers à temps. Il a donc été très intéressant de pouvoir sur certains chantiers n'être qu'une personne qui écoutait les ordres et sur d'autres être la personne qui doit organiser le travail et répondre aux questions des équipes.

J'ai aussi beaucoup appris sur la façon dont est gérée une entreprise, quelles sont les parties prenantes, la façon dont est géré le personnel mais aussi comment obtenir des subventions pour les projets innovants, comment fonctionnent les marchés publics ou encore ce que doit contenir la réponse à un appel d'offre, un devis, un rapport de fin de projet ou une plaquette explicative.

J'ai aussi pu participer à de nombreuses réunions, que ce soit concernant le bilan financier de l'entreprise ou sur les orientations globales en termes de projet à venir, et aussi de nombreuses réunions concernant la gouvernance et l'organisation de Macondo.

Le fait de travailler au sein d'un tiers lieu en lien avec d'autres entreprises a aussi constitué une richesse, cela m'a permis de dispenser des formations à des jeunes envoyés en formation à l'école de l'être par la mission locale. Mais aussi par exemple d'échanger avec des spécialistes dans des domaines comme le compostage ou l'agronomie qui sont des domaines proches de ceux sur lesquels travaille Ecosec en terme de recherche. Enfin, le fait d'être sur un tiers lieu permet d'avoir une meilleure visibilité et d'être contacté par différents acteurs comme des élus, des chargés de missions pour le territoire, des associations mais aussi des laboratoires de recherche. Cette visibilité permet à la fois de trouver de nouveaux clients mais aussi de nouveaux partenaires. Il existe donc une grande diversité d'acteurs ce qui permet d'enrichir les échanges.

Concernant le projet que j'ai eu à réaliser au sein de l'entreprise, il y a bien sûr un certain nombre de choses que je ferais différemment, notamment en terme d'organisation dans le temps et de gestion de mon de travail en production par rapport à mon temps de travail consacré aux projets pour l'école. Cela étant, il a été très enrichissant d'être en autonomie sur un projet tout en ayant le soutien des tuteurs d'entreprise et de Polytech. Cela m'a permis de gérer ce projet du début à la fin tout en évitant des erreurs majeures grâce aux corrections apportées par ceux-ci.

En conclusion, ce poste d’alternance au sein d’Ecosec m’a permis de m’épanouir pleinement dans mon travail et de pouvoir travailler sur des sujets qui m’intéressent et me tiennent à cœur. Cela m’a permis de mesurer l’importance d’aimer son travail et de le faire avec application.

Tableau 10 : Récapitulatif des tâches effectuées

Tâches confiées	Temps pour les réaliser
Fabrication du mur végétal de la recyclerie de la Mosson	2 semaines
Préparation du système de traitement des eaux et de l’arrosage	1 semaine
Installation du module	1 semaine
Suivi du système d’arrosage et de traitement + présentation du projet	1 semaine
Fabrication du mur végétal de la brasserie Zoobrew	2 semaines
Bibliographie + Expériences sur le filtre à charbon	1 semaine
Participation au rassemblement du RAE	1 semaine
Protocole + Mise en place et analyses sur l’hygiénisation des urines	2 semaines
Réalisation de plaquettes explicatives des différentes activités et du système de traitement des eaux grises	1 semaine
Organisation de l’inauguration du tiers lieu et réalisation d’atelier pédagogique	1 semaine
Visite écocentre Pierre et Terre + installation phytoépuration à Macondo	1 semaine
Entretien du potager expérimental + récoltes + calculs sur R	2 semaines
Rédaction du rapport	1 semaine

Bibliographie

- ARS. (2022, mai 27). *Résultats des analyses du contrôle sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine*. Récupéré sur ministère de la santé: <https://orobnat.sante.gouv.fr/orobnat/rechercherResultatQualite.do>
- Benoît Molineaux, Pauline Dayer, Philippe Morier-Genoud, Ralph Thielen, Olivier Krumm et Uli Amos. (2021). *DES TOILETTES À COMPOST EN MILIEU URBAIN ? C'EST POSSIBLE !* Genève: Coopérative équilibre .
- Brosillon. (2020). Cours de chimie des eaux. Montpellier.
- Brusa, N. (2021, octobre 1). *LE MARKETING MIX ET LES 4P DU MARKETING, POUR UNE STRATÉGIE MARKETING RÉUSSIE*. Récupéré sur webmarketing&co'm: <https://www.webmarketing-com.com/2021/10/01/1693112-le-marketing-mix-et-les-4p-du-marketing-pour-une-strategie-marketing-reussie>
- Dana Cordell, Jan-Olof Drangert, Stuart White. (2009). The story of phosphorus : Global food security and food for thought. *Global Environmental Change, vol.19, n°2*, p 292-305.
- Dana Cordell, Jan-Olof Drangert, Stuart White. (s.d.). The story of phosphorus : .
- Martin. (2020). *L'urine humaine en agriculture : des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable*. Université Paris-Saclay.
- Martin, T. (2017). *Valorisation des urines humaines comme source d'azote pour les plantes : expérimentations en serre*. INRA, leesu.
- Munroe, J. (2018). *Manuel sur la fertilité du sol*. Ontario: ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales.
- OCAPI. (2022). *Utiliser l'urine humaine en agriculture - Fiches pratiques*. Paris: Cloître imprimeurs Saint-Thonan.
- ocsolutionsassainissement. (2020, janvier 23). *Assainissement collectif et non collectif dans le 34*. Récupéré sur OC solutions assainissement: <https://www.oc-solutions-assainissement.com/assainissement-eau/assainissement-collectif-et-assainissement-non-collectif-dans-le-34/2020/01/1654/>
- OMS. (2012). *Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères*. Genève: Organisation mondiale de la santé.
- Hampel, Andrea, Ralf Hetzel, et Georgios Maniatis. 2015. « Comment on “Stress and fault parameters affecting fault slip magnitude and activation time during a glacial cycle” by Steffen et al. » *TECTONICS* 34 (6): 1348-53. <https://doi.org/10.1002/2014TC003772>.
- Jena, Jyotsnarani, Trupti Das, et Ujjaini Sarkar. 2021. « Explicating proficiency of waste biomass-derived biochar for reclaiming phosphate from source-separated urine and its application as a phosphate biofertilizer ». *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (1): 104648. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104648>.
- Liu, Jingyan, Min Zheng, Chengwen Wang, Changhua Liang, Zhengtao Shen, et Kangning Xu. 2020. « A green method for the simultaneous recovery of phosphate and potassium from hydrolyzed urine as value-added fertilizer using wood waste ». *Resources, Conservation and Recycling* 157: 104793. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104793>.
- Otieno, Austine O., Patrick G. Home, James M. Raude, Sylvia I. Murunga, Elijah Ngumba, Dickson O. Ojwang, et Tuula Tuhkanen. 2021. « Pineapple peel biochar and lateritic soil as adsorbents for recovery of ammonium nitrogen from human urine ». *Journal of Environmental Management* 293: 112794. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112794>.
- Schmidt, Hans Peter, Bishnu Hari Pandit, Vegard Martinsen, Gerard Cornelissen, Pellegrino Conte, et Claudia I. Kammann. 2015. « Fourfold Increase in Pumpkin Yield in Response to Low-Dosage Root Zone Application of Urine-Enhanced Biochar to a Fertile Tropical Soil ». *Agriculture* 5 (3): 723-41. <https://doi.org/10.3390/agriculture5030723>.

- Simha, Prithvi, Jenna Senecal, Annika Nordin, Cecilia Lalander, et Björn Vinnerås. 2018. « Alkaline dehydration of anion-exchanged human urine: Volume reduction, nutrient recovery and process optimisation ». *Water Research* 142: 325-36. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.001>.
- Solanki, Avni, et Treavor H. Boyer. 2017. « Pharmaceutical removal in synthetic human urine using biochar ». *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 3 (3): 553-65. <https://doi.org/10.1039/C6EW00224B>.
- . 2019. « Physical-chemical interactions between pharmaceuticals and biochar in synthetic and real urine ». *Chemosphere* 218: 818-26. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.179>.
- Taghizadeh-Toosi, Arezoo, Tim J. Clough, Robert R. Sherlock, et Leo M. Condrón. 2012. « A wood based low-temperature biochar captures NH₃-N generated from ruminant urine-N, retaining its bioavailability ». *Plant and Soil* 353 (1): 73-84. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1010-9>.
- Udert, K. M., T. A. Larsen, et W. Gujer. 2006. « Fate of major compounds in source-separated urine ». *WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY* 54 (11-12): 413-20. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.921>.
- Xu, Kangning, Fangyu Lin, Xiaomin Dou, Min Zheng, Wei Tan, et Chengwen Wang. 2018. « Recovery of ammonium and phosphate from urine as value-added fertilizer using wood waste biochar loaded with magnesium oxides ». *Journal of Cleaner Production* 187: 205-14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.206>.
- Zhang, Yang, Zifu Li, et Ibrahim Babatunde Mahmood. 2015. « Effects of Corn Cob Produced Biochars on Urea Recovery from Human Urine and Their Application as Soil Conditioners ». *CLEAN – Soil, Air, Water* 43 (8): 1167-73. <https://doi.org/10.1002/clen.201400489>.

Annexes

Annexe 1 : Détail des associés de la SCOP Ecosec

Le capital social de la SCOP ARL ECOSEC est variable avec un socle de 40 000 €

En 2022, le capital s'élève à 58 700 € pour 7 associés et est réparti de la manière suivante :

	Salarié ou Ex salarié ou Extérieur	Nombre de parts sociales	Capital à l'issu de l'AG du 17/12/2020
CLOUET Benjamin	Salarié	267	13 350,00 €
CLOUET Agnès	Extérieur	266	13 300,00 €
CAILLE Bernard	Salarié	267	13 350,00 €
SABLEYROLLES Pierre	Extérieur	300	15 000,00 €
GIANCOLA Olga	Salarié	40	2 000,00 €
ALLEBONE WEB Sophie	Salarié	30	1 500,00 €
JAMES Julien-Pierre	Salarié	4	200,00€
Total	5 salariés 2 Extérieurs	1 174	58 700,00 €



Annexe 2 : Tableaux récapitulatifs des normes européennes et françaises

	Europe - classe A	Europe - classe B	Europe - classe C	Europe - classe D
MES (mg/L)	<10	<35	<35	<35
Turbidité NFU	<5 (NTU)	-	-	-
DBO (mg O ₂ /L)	<10	<25	<25	<25
DCO (mg O ₂ /L)				
Escherichia coli (NPP/100mL)	<10	<100	<1000	<10000
Escherichia coli (UFC/100mL)				
Entérocoques intestinaux (UFC/100mL)				
SBASR (UFC/100mL)				
Bactériophages ARN F spécifiques (PFP/100 ml)				

	France - classe A	France - classe B	France - classe C	France - classe D
MES (mg/L)	<15	<35	<35	<35
Turbidité NFU				
DBO (mg O ₂ /L)				
DCO (mg O ₂ /L)	<60	<125	<125	<125
Escherichia coli (NPP/100mL)	<250	<10000	<1000000	
Escherichia coli (UFC/100mL)	<250	<10000	<1000000	
Entérocoques intestinaux (UFC/100mL)	> 4 log	> 3 log	> 2 log	> 2 log
SBASR (UFC/100mL)	> 4 log	> 3 log	> 2 log	> 2 log
Bactériophages ARN F spécifiques (PFP/100 ml)	> 4 log (99,99%)	> 3 log (99,9%)	> 2 log (99%)	> 2 log



Annexe 3 : Graphiques résumant les résultats des expériences de l'été 2022

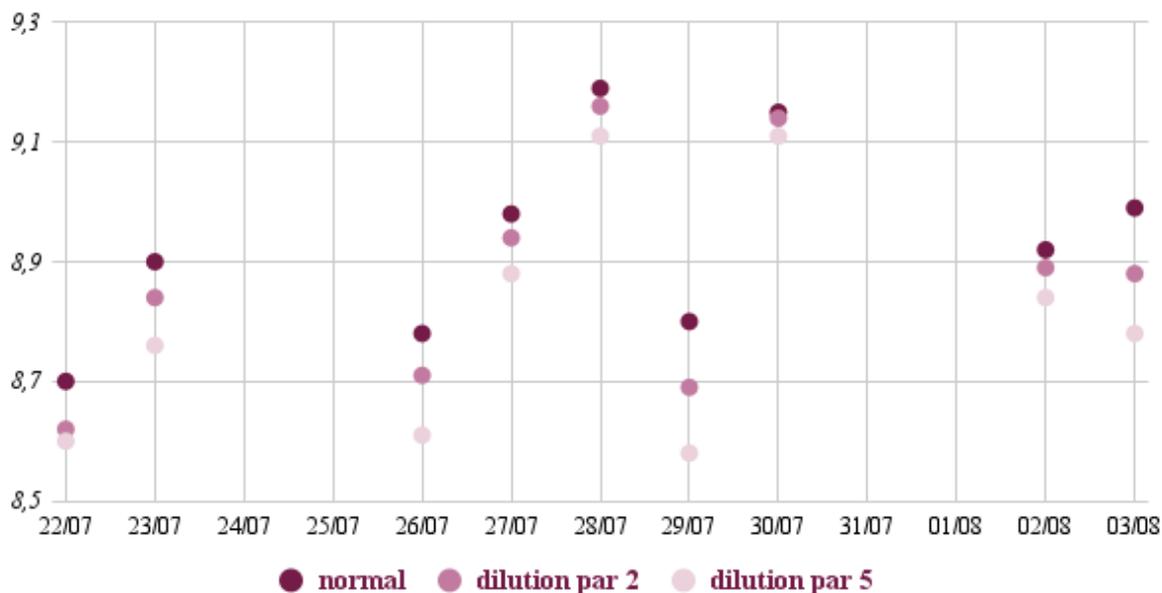


Figure 15 : évolution du pH en fonction du temps et de la dilution

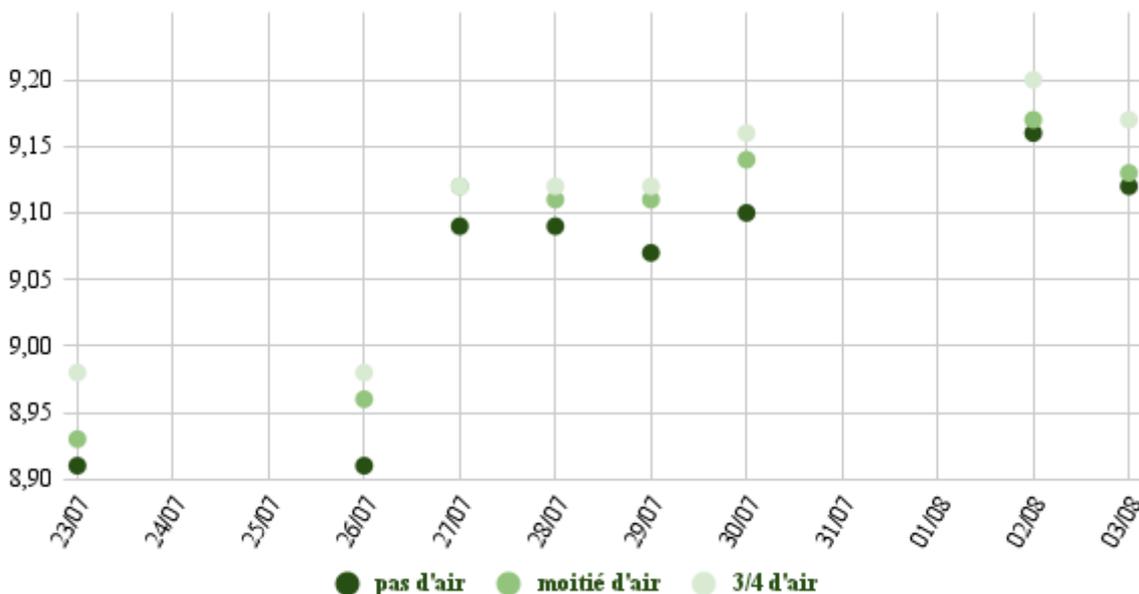


Figure 16 : Graphique de l'évolution du pH en fonction du temps et de la quantité d'air dans le flacon



Annexe 4 : Résultats bactériologiques du projet de fin d'étude

Tableau 11 : synthèse des résultats d'analyses des différents flacons en NPP *E. coli*/100 mL

		Urine toilette	Urine urinoir
	Témoin	25 636	78 510 132
Ajout de potasse 	Potasse K=N	< 56	< 56
	Potasse K=1/2 N	< 56	< 56
	Potasse K=1/3N	9 653	33 405 911
Température 	Extérieur	< 56	144 116
	Intérieur	< 56	38 824 883
	Serre	< 56	335 495 829
UV 	Exposition direct	< 56	1 445 842
	Noir	< 56	6 971 893

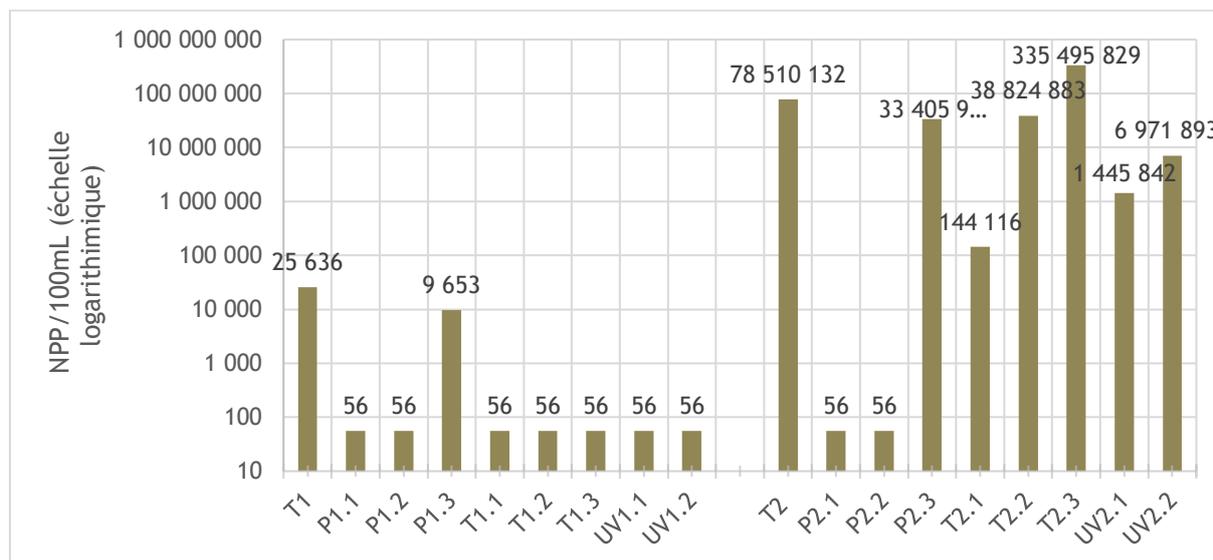


Figure 17 : Graphique de synthèse des concentrations en *E. coli* en fonction des flacons



Annexe 5 : Calcul pour l'ajout de potasse et de soude

Les valeurs théoriques de concentration en nutriments dans les urines sont :

- 8,1 g/L d'azote
- 0,54 g/L de phosphore
- 2,2 g/L de potassium

Pour le dosage dans les cuves IBC de 1000L, on veut une concentration en potassium qui soit deux fois moins importante que celle de l'azote, on veut donc 4,05 g/L de potassium. Sachant que les urines ont déjà une concentration en potassium de 2,2 g/L on doit ajouter 1,85 g/L de potassium.

Calcul de la quantité de potasse à ajouter aux urines pour l'hygiénisation :

Dans 1g de potasse caustique on a 0,9g de KOH (pureté à 90%)

Soit n_k (dans 1g de potasse caustique) = $m/M = 0,9/39 = 0,023$ mol

On veut ajouter 1,85 g de K donc n_k (à ajouter) = $1,85/39 = 0,04743$ mol

- ⇒ n_k (à ajouter) / n_k (dans 1g de potasse caustique) = $0,04743/0,023 = 2,06$ g de potasse caustique dans 1L
- ⇒ Soit 2,06 kg de potasse caustique pour 1000L
- ⇒ Pour une bouteille de 1,5L : 3,09 g de potasse caustique
- ⇒ Pour un dosage où N = K dans une bouteille de 1,5L : 9,86 g de potasse caustique

Calcul du nombre de mol de OH⁻ pour connaître la quantité de soude à ajouter :

Dans 1g de potasse caustique on a $n_{OH} = m/M = 0,9/17 = 0,0529$ mol

Comme on ajoute 2,06 g de potasse caustique, on ajoute $2,06 \cdot 0,0529 = 0,108974$ mol de OH

Dans 1g de soude caustique on a 0,99g de NaOH (pureté à 99%)

Soit n_{OH} (dans 1g de soude caustique) = $0,99/17 = 0,058235$ mol

Donc pour avoir 0,1089 mol on doit ajouter $0,1089/0,058235 = 1,87$ g de soude caustique

- ⇒ Soit 1,87 kg de soude caustique pour 1000L

Calcul des ajouts de potasse pour les casiers 5, 6 et 7 du potager expérimental :

Chaque semaine on met 0,5L d'urine sur chaque casier (1 m²)

- ⇒ Casier 5 : N=K → on ajoute 3,29 g de potasse caustique au 0,5L d'urine
- ⇒ Casier 6 : N=K → on ajoute 1,03 g de potasse caustique au 0,5L d'urine
- ⇒ Casier 7 : N=K → on ajoute 0,56 g de potasse caustique au 0,5L d'urine

Annexe 6 : Détail des poids des plantes du potager expérimental par variété et par casier

Tableau 12 : Poids par pieds de roquette en fonction des casiers

	Casier 1	Casier 2	Casier 3	Casier 4	Casier 5	Casier 6	Casier 7
	5,3	368,5	267,1	104,3	123,5	129,5	145,6
	2	353	261,1	200,6	61,3	164,4	111,4
	2,4	283	424,7	210,8	124,9	166,7	141,3
	3,5	172,9	623,3	118,6	310,6	122,5	130,6
	3,7	185,6	146	116,4	182,9	125,6	167,3

Tableau 13 : Poids par pieds de laitue pommée en fonction des casiers

	Casier 1	Casier 2	Casier 3	Casier 4	Casier 5	Casier 6	Casier 7
	2,9	121,8	3,3	61,3	40,3	153	85
	10,4	77	40,2	101,3	47,6	102,3	52,8
	2,1	99	93,5	66,8	27,5	48	87
	4,9	102	36,1	48,2	57,7	113,8	41,3
	4,8		80,1	17,2		51,3	81

Tableau 14 : Poids par pieds d'épinards en fonction des casiers

	Casier 1	Casier 2	Casier 3	Casier 4	Casier 5	Casier 6	Casier 7
	3,6	46,7	136,4	33,4	33	37,2	63,3
	8,6	44,5	145,2	37,1	12,5	48,2	23,7
	14,4	72,4	126	32	14,9	54,2	47,8
	0,5	87,9	82	26,7	17,3	38,6	33,7
	0,5	31,5	62	35,3	11,9	68,7	20,7

Tableau 15 : Poids par pieds de laitue romaine en fonction des casiers

	Casier 1	Casier 2	Casier 3	Casier 4	Casier 5	Casier 6	Casier 7
	1,6	182	63,4	102	225	115,5	72,6
	1,8	215	122	52,6	205	110	13,4
	1	320	84,9	168	284		
	1,3	300	162	348	151		
	7,4		268	188	149		

Tableau 16 : Poids par récolte des fèves en fonction des casiers

	Casier 1	Casier 2	Casier 3	Casier 4	Casier 5	Casier 6	Casier 7
1^{er} récolte	17	4,1	44,8	42,1	56,7	153,1	157
2^{ème} récolte	55,4		85,7	5	7,1	78,5	145,6
3^{ème} récolte	48		66	38	55	64	163

Annexe 7 : Résultats des tests statistiques et graphiques pour les laitues et les fèves.

1) Laitue pommée

La p-value lorsque l'on compare tous les casiers entre eux est de 0,004, ce qui signifie qu'il y a une différence significative. Alors que si on enlève le casier témoin la p-value est 0,06 ce qui signifie qu'il n'y a pas de différence entre tous les casiers fertilisés.

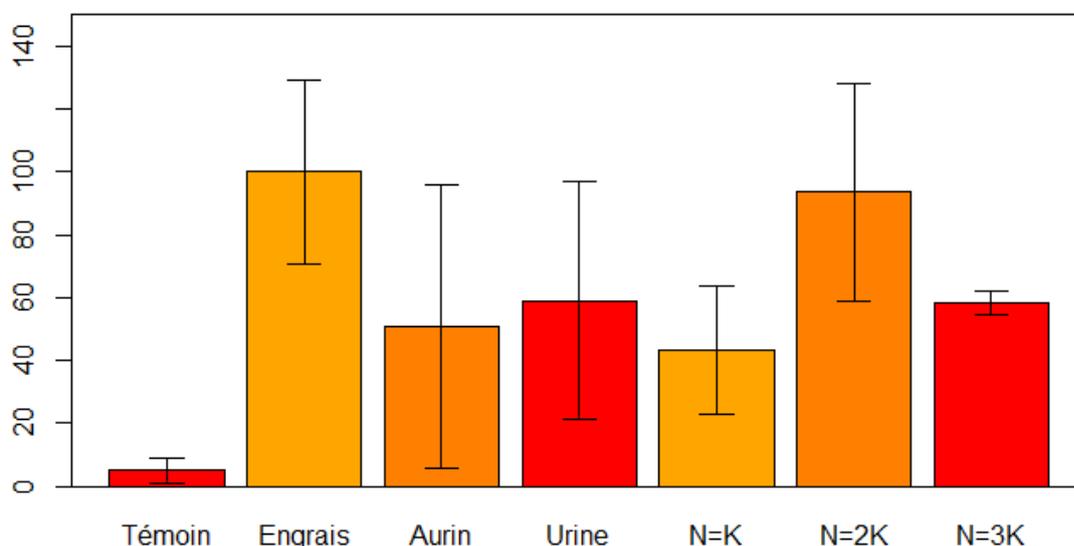


Figure 18 : Diagramme à barre + IC - laitue pommée

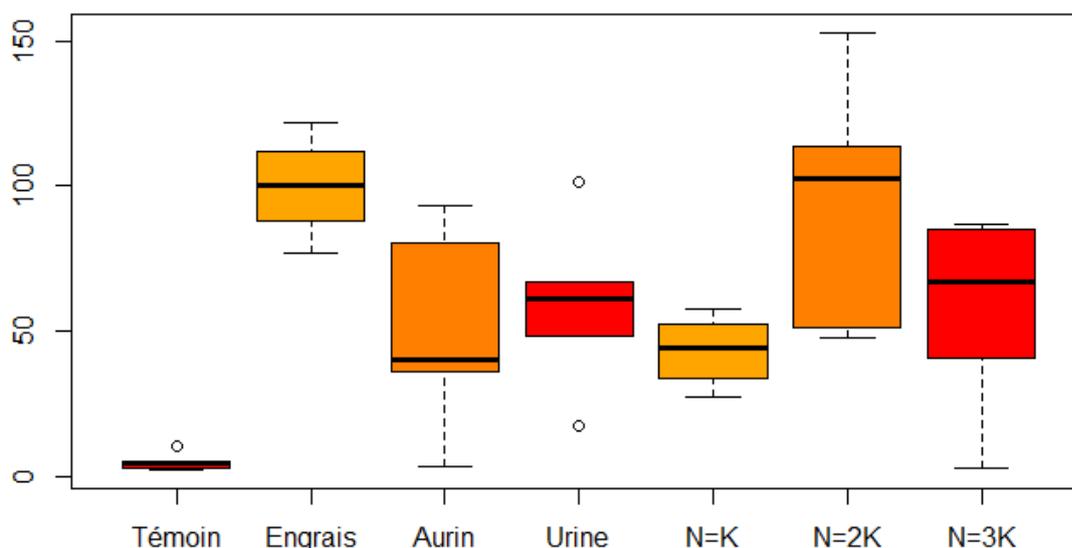


Figure 19 : Boîte à moustache - laitue pommée

2) Laitue romaine

La p-value lorsque l'on compare tous les casiers entre eux est de 0,005, ce qui signifie qu'il y a une différence significative. Alors que si on enlève le casier témoin la p-value est 0,07 ce qui signifie qu'il n'y a pas de différence entre tous les casiers fertilisés.



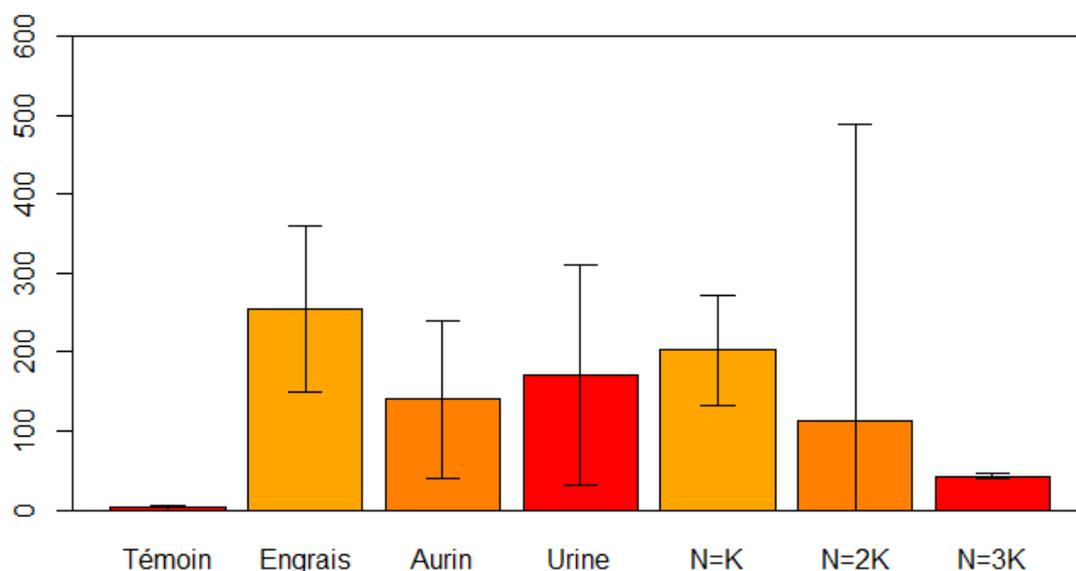


Figure 20 : Diagramme à barre +IC - laitue romaine

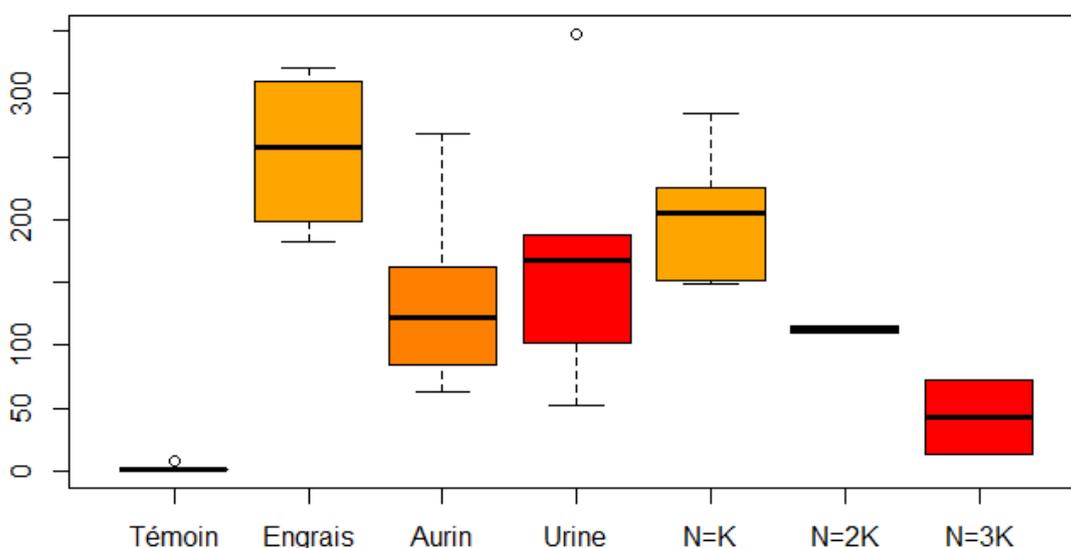


Figure 21 : Boîte à moustache - laitue romaine

3) Fèves

La p-value lorsque l'on compare tous les casiers entre eux est de 0,009, ce qui signifie qu'il y a une différence significative. Alors que si on enlève le casier de l'engrais universel la p-value est 0,02 ce qui signifie qu'il y a toujours une différence entre les casiers restants. Il faut alors retirer le dernier casier (celui contenant des urines avec le plus petit dosage de potasse) pour obtenir une p-value de 0,07 qui fait qu'il n'y a plus de différence significative.



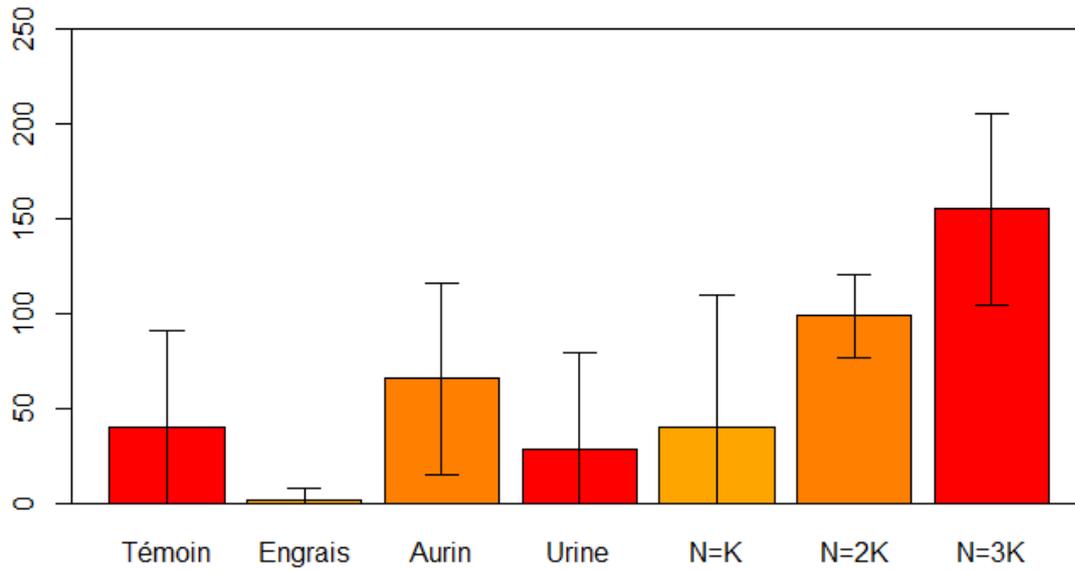


Figure 22 : Diagramme à barre + IC - fèves

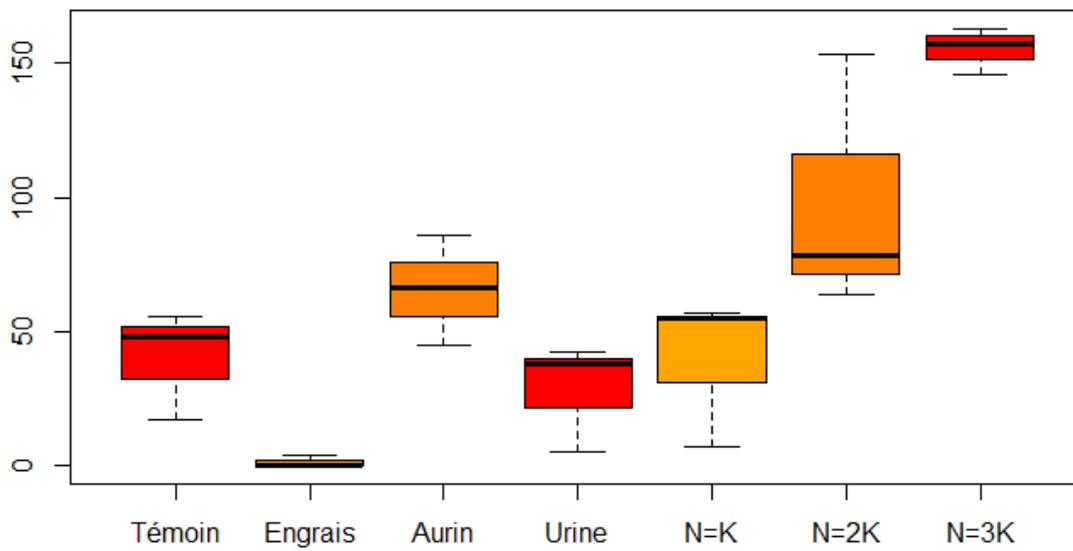


Figure 23 : Boîte à moustache - fèves



Annexe 8 : Résultats des dégustations de salades

Tableau 17 : Résultat de la dégustation à l'aveugle des roquettes

	Casier 1	Casier 2	Casier 3	Casier 4	Casier 5	Casier 6	Casier 7
Anna	forte	sans goût	forte	bizarre sans goût	forte	normal	normal
Maria	très forte, poivrée (3)	Laitue, pas trop de goût (1)	Fortissimo, amère (2)	très amère (1)	Roquette style, forte en goût, trop bonne ! (2)	goût paille (1)	de l'herbe sans intérêt (1)
JP	3	1	1	2	fade	2	cœur
Marine	un peu dure sous la dent, goût au top	bien piquante ++	piquante	goût moins sympa	fade	trop piquante	bien piquante
Ophélie	dure	pique	perfect	pas bon	pas de goût	pas bon	pas de goût
Luz	pas de goût	amère	pique	pas bon	parfait	pas de goût	pas bon
Minéa	pas de goût	amère	bizarre	re ça va	parfait	pas bon	beurk
Ash	épicée	plutôt commune	trop piquante	moyen, trop amère	pas de goût	très bon	très épaisse
Quentin	peu goutue	pas très forte, peu d'arrière goût	peu de goût au début, puis piquante	plus amère, moins goutue, miam	très douce	pas très goutue	très goutue, peu d'arrière goût
Narbé	goût léger	goût fort	goût moyen	salé	pas mal	salé, bizarre	bon goût
Fabien	bon goût	amère	goût moyen	moyen ...	amère et pique	amère et salée	pas bon

Intensité de goût (forte)	5	1	2	3	2	1	2
Amère		3	1	3	1	2	0
Piquante		2	4	0	1	1	1
Bon goût, personne satisfaite	2	0	1	1	3	2	5



Tableau 18 : Résultats de la dégustation des laitues romaines avec connaissances des différents fertilisants

	Casier 1	Casier 2	Casier 3	Casier 4	Casier 5	Casier 6	Casier 7
Lo	1	3	2	3	2	4	2
Nico	3	2	3	4	5	2	4
Nemo	4	2	3	4	5	4	4
Scott	3	2	3	4	4,5	4	3,5
Jules	1	2	4	3	4	3	2
Moyenne	2,4	2,2	3	3,6	4,1	3,4	3,1



Annexe 9 : étude sociale Valurine

Conclusion de l'étude sociologique du projet Valurine

Il y a un vrai effet psychologique sur le gout perçu du vin quand on sait que les urines étaient utilisées comme engrais. Le vin issu des vignes fertilisées par les urines est accepté plus facilement par un public déjà sensibilisé sur la possibilité d'utilisation des urines humaines comme engrais, et par les gens soucieux de l'environnement et des bénéfices d'acheter localement.

Autant de gens ont trouvé que notifier les urines sur l'étiquette était un facteur de dissuasion d'acheter le vin. L'autre moitié trouvait qu'il y a un manque de transparence si ce n'est pas mentionné. S'il était décidé de mentionner les urines, il serait mieux de mettre sur l'étiquette au dos du bouteille, avec les informations suivantes :

- Les avantages d'utiliser les urines humaines comme engrais (arguments de durabilité, grammes/litres de CO₂, énergie et eau économisé, les problèmes des réserves de phosphates et transformer les azotes, etc.)
- Les informations sanitaires : que les urines sont stériles ou hygiénisées, les tests effectués pour voir le risque d'avoir les médicaments/hormones/substances toxiques dans le vin, etc.
- Les informations pratiques : comment les urines étaient collectées, leur provenance, séparation à source, comment les urines étaient appliquées dans les vignes, etc.

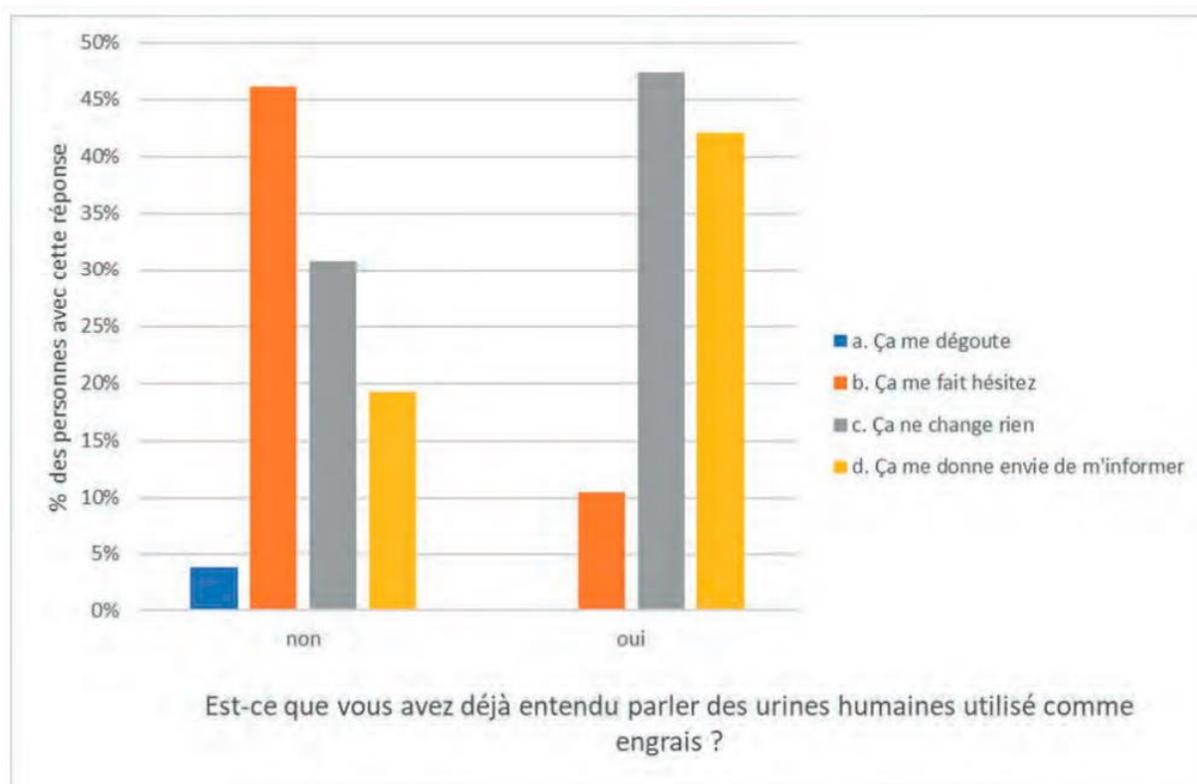


Figure 24 : Graphique présentant l'opinion des gens participants à l'étude sur l'utilisation d'urine comme engrais