

Boudoire Nolwenn
Année 2021- 2022

Sophie Allebone-Webb
François Zaviska

Stérilisation des urines en vue d'une valorisation agronomique grâce à des solutions low-tech



Sommaire

Sommaire.....	2
Liste des figures	3
Liste des tableaux.....	3
Résumé.....	4
I. Introduction.....	5
II. Matériels et méthodes.....	8
II.1. Valorisation agronomique	8
II.2. Stérilisation des urines.....	9
III. Résultats et discussions	11
III.1 Valorisation agronomique	11
III.2 Stérilisation des urines	13
IV. Conclusion.....	20
Références bibliographiques.....	22
Annexes	23
Annexe 1 : Permaculture - Les différentes couches de la lasagne.....	23
Annexe 2 : Résultats des relevés de pH et de température	24
Annexe 3 : Résultats partiels du suivi des urines stockées 6 mois	25

Liste des figures

Figure 1 : composition de l'engrais Aurin	11
Figure 2 : Graphique des pH pour différentes dates en fonction des flacons pour les urines des toilettes	14
Figure 3 : Graphique des pH pour différentes dates en fonction des flacons pour les urines des urinoirs.....	15
Figure 4 : Graphique des températures pour différentes dates en fonction des flacons	16
Figure 5 : Graphique de synthèse des concentration en E.coli en fonction des flacons	19

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résumé des amendements sur le potager en fonction des compartiments tests ...	8
Tableau 2 : Synthèse des différents flacons tests en fonction des paramètres étudiés	10
Tableau 3 : Synthèse des notes attribuées au différents compartiments en fonction du développement des plants	12
Tableau 4 : Photos du 03/01/22.....	12
Tableau 5 : Résultats des mesures d'azote total sur les flacons contenant de la potasse et les témoins.....	17
Tableau 6 : synthèse des résultats d'analyses des différents flacons en NPP E. coli/100 mL	17

Résumé

La valorisation agronomique des urines est un enjeu important des prochaines décennies. Cependant, pour pouvoir faire évoluer les lois régissant l'utilisation des urines humaines en agriculture il est important de démontrer l'utilité de ses composés en tant qu'engrais et d'assurer sa qualité sanitaire. C'est pour ces raisons que ce projet a vu le jour. Le but étant avec des expérimentations peu complexes et réalisées en milieu extérieur d'arriver à montrer qu'avec des solutions simples, peu coûteuses et robustes, il est possible de valoriser les urines pour améliorer la croissance des légumes et ainsi rendre à la terre les nutriments que nous excrétons. Les résultats exposés ci-après montre un véritable intérêt à utiliser les urines comme fertilisant puisque les tests sur le potager ont montré une bien meilleure croissance des plantes avec un engrais fait à base d'urine et une croissance améliorée pour les plantes fertilisées à l'urine. De même, les expériences sur la stérilisation des urines ont montré qu'il existe des solutions simples pour stériliser les urines et ainsi les utiliser sans danger en tant qu'engrais. La solution qui semble la plus sûre est celle de l'ajout de potasse qui, si elle est dosée correctement, permet d'obtenir des urines désinfectées quel que soit leur pH et la température à laquelle elles ont été stockées et ceci en seulement un mois. L'exposition à des températures extrêmes (ici négatives) semble permettre de stériliser les urines mais seulement dans le cas où le pH est assez élevé. Les résultats des expériences présentées ci-dessous sont donc prometteurs pour la valorisation des urines in situ et avec un temps de stockage réduit.

I. Introduction

Chaque personne produit environ 2L d'urine par jour. Celle-ci est majoritairement composée d'eau mais elle contient aussi de nombreux nutriments comme de l'azote, du phosphore, du potassium et de nombreux autres minéraux (Kirchmann and Pettersson, 1994). Ces différents composés organiques ont un intérêt agronomique non négligeable, mais ils peuvent aussi être des polluants en fonction de leur concentration. Afin de limiter l'impact négatif des urines sur l'environnement mais aussi dans un objectif de valorisation, différents systèmes permettant une séparation à la source des matières fécales et des urines ont vu le jour. De plus, l'urine dans son état d'origine ne contient pas de pathogènes, elle est stérile, cela étant elle subit la plupart du temps des contaminations une fois excrétée qui sont appelées contaminations croisées. Celle-ci peuvent être plus ou moins importantes en fonction de l'hygiène et du système de séparation des urines et des matières fécales.

Les recherches sur l'élimination des nutriments dans les urines se concentrent majoritairement sur l'azote et le phosphore qui sont des polluants importants des milieux aquatiques, ce qui n'est pas le cas du potassium et des autres minéraux qui ne sont donc pas spécifiquement traités dans les stations d'épuration. Si la réglementation ne cesse de se durcir quant au traitement de ces polluants, c'est parce qu'ils sont la cause des nombreux phénomènes d'eutrophisations que l'on retrouve dans les eaux douces comme dans les eaux salées. Cette eutrophisation entraîne l'asphyxie des cours d'eau et des lacs, mais aussi la dégradation d'eau saumâtre comme les lagunes ou encore des phénomènes de prolifération des algues vertes sur les côtes (Hampel et al., 2015).

De même, pour ce qui est de la récupération des nutriments, bien que tous les composés de l'urine puissent être récupérés et valorisés, les recherches se concentrent là encore sur l'azote et sur le phosphore. Cela vient du fait que l'extraction et la fabrication des produits qui permettent de produire des engrais azotés et phosphorés sont des industries particulièrement polluantes.

Le phosphore est aujourd'hui extrait dans des mines dont on annonce un déclin de production dès 2030 alors que la demande continue d'augmenter de manière exponentielle. Ces mines se trouvent majoritairement au Maroc, en Chine et au États-Unis (Wali et al., 2019).

De la même façon, l'azote produit pour les engrais utilise un procédé extrêmement énergivore qui se base sur le procédé de Haber-Bosch qui prend l'azote gazeux de l'air (N_2) et le transforme en ammoniac (NH_3) par hydrogénation grâce à du dihydrogène (H_2). La production de ces engrais azotés n'a de cesse d'augmenter depuis 30 ans de même que leur prix. Pourtant, bien que ce produit ne requière pas de produit chimique pour sa fabrication, la synthèse de celui-ci consomme énormément d'énergie, ce qui en fait encore aujourd'hui une des industries les plus polluantes dans le domaine agricole.

Les deux principaux composants des engrais reposent donc sur des ressources qui pourrait être mises en péril d'ici quelques décennies et conduire à une réduction drastique de la production

agricole mondiale. L'utilisation des urines comme fertilisant en agriculture permettrait donc de solutionner ces deux problèmes.

Cependant, pour pouvoir se servir de ces urines tout en respectant les réglementations françaises et européennes il faut que celles-ci soient exemptes de pathogènes. La stérilisation des urines sera donc un enjeu important en vue d'une valorisation de ce qui est encore aujourd'hui considéré comme un déchet. Effectivement, dans le système actuel, les urines sont mélangées aux eaux usées et en constitue l'une des principales pollutions solubles. Le traitement de ces eaux usées demande d'importants coûts en électricité afin de transformer l'azote organique des urines sous forme d'azote gazeux dans l'atmosphère grâce à l'action de différentes bactéries nitrifiantes et dénitrifiantes. Pour ce qui est du phosphore, il peut lui aussi être traité grâce à des bactéries mais la plupart du temps son extraction des eaux usées se fait par addition de produit chimique (chlorure ferrique). Ce qui entraîne d'importants coûts d'approvisionnement et d'élimination des boues supplémentaires produites (Luo et al., 2019).

Certains procédés existent déjà pour transformer l'urine en un produit normé qui peut être utilisé en agriculture. C'est le cas de Aurin, le produit de l'entreprise Suisse Vuna, qui est entièrement stérile mais nécessite de très nombreuses étapes de traitement. Effectivement, l'urine va tout d'abord subir une stabilisation par nitrification, puis va être purifiée grâce à du charbon actif avant d'être enfin concentrée par distillation. D'autre part, la start-up française Toopi Organics a développé un produit en cours de validation réglementaire, qui est un traitement bactériologique des urines pour une utilisation comme activateur de sol (biostimulant) avant une culture. Ces deux procédés nécessitent un espace relativement important pour les mettre en place et dans le cas d'Aurin des machines sophistiquées et une consommation énergétique non négligeable.

Les recherches en cours au sein de la société EcoSec sur la stérilisation s'inscrivent dans un projet plus vaste de végétalisation d'un habitat participatif : Casalez. Le but des habitants est, d'une part de construire un habitat avec des parties communes et, d'autre part, que cet habitat soit le plus sobre possible en consommation de ressources et d'énergie autant pour sa construction que pour son fonctionnement. Cette sobriété passera notamment par le développement de l'arrosage et la fertilisation des murs végétalisés et des différents espaces verts avec des eaux grises et des urines. Dans ce projet particulier, les urines seront collectées in situ grâce à des toilettes sèches à séparation et seront stockées dans une zone technique au sous-sol. Le bâtiment sera constitué de 11 logements, soit environ 25 habitants. Les urines collectées permettront ensuite d'irriguer 100 m² de mur végétal avec des eaux grises traitées mélangées à 1% d'urines stérilisées. Les eaux grises sont elles aussi récupérées in situ, 1000L par jour seront stockés et il y aura une vidange complète de la cuve toutes les 24h après l'arrosage.

Pour cette raison, les urines devront être traitées si possible in situ, sur un espace restreint et sans utiliser d'électricité. Aucun des procédés existants ne répond à ces attentes. L'objectif des différentes expériences mises en place est donc de tester différentes conditions de stockage des urines pour déterminer leur capacité d'abattement des pathogènes en fonction de la température, du pH, de l'exposition au rayonnement solaire, de l'ajout de réactifs, etc.

Effectivement, l'OMS recommande le stockage des urines pendant 6 mois pour éliminer la totalité des pathogènes. Une expérience précédente a déjà été mise en place avec un suivi de l'évolution des pathogènes et de différents paramètres physiques sur 6 mois, les résultats ne sont pas encore arrivés à leur terme mais à seulement un mois de l'échéance la concentration en E. coli est en baisse même si elle n'en reste pas moins élevée (voir annexe 3). Il semble donc important en cas d'échec de la stérilisation des urines par un simple stockage de 6 mois de trouver d'autres solutions pour atteindre les objectifs de qualité attendus pour les urines.

Les solutions envisagées tentent de s'inscrire dans un système de conception low-tech afin d'avoir une certaine résilience dans le temps quelle que soit l'évolution de la situation en matière de ressources. Cela permet également de respecter les objectifs et les engagements du projet d'habitat qui utilise des procédés et des matériaux avec un impact environnemental le plus faible possible.

C'est pour toutes ces raisons que ce projet de fin d'étude au sein de l'entreprise EcoSec s'est porté sur la stérilisation et la valorisation des urines. Ce projet s'est donc partagé entre deux expériences majeures : une concernant la valorisation agronomique des urines, l'autre concernant la stérilisation de celles-ci. Ce rapport aborde donc tout d'abord les différents protocoles expérimentaux pensés pour ces expériences ainsi que le détail de leur réalisation. Puis sont présentés les différents résultats obtenus ou en cours d'obtention sur ces deux expériences avec en conclusion les solutions proposées suite à cette étude ainsi que les perspectives quant à de nouvelles expérimentations concernant les sujets de la stérilisation et de la valorisation des urines.

II. Matériels et méthodes

Deux expériences différentes ont été mises en place : une concernant des tests sur l'apport des urines dans la culture d'un potager en permaculture et l'autre concernant la stérilisation des urines par son stockage selon différents paramètres. Ces deux expériences sont complémentaires, la première permet d'évaluer l'intérêt d'utiliser l'urine comme fertilisant comparé à d'autres engrais et la seconde permet de trouver des solutions pour une utilisation sans aucun risque des urines pour la culture de plantes comestibles.

II.1. Valorisation agronomique

Le jardin a été construit en forme de casiers de bois afin de surélever la culture par rapport au sol, 7 compartiments de taille égale (1,2m*1,15m) ont donc été réalisés. Chaque compartiment a été rempli de la même manière et au même moment en utilisant la technique de la culture en lasagne. La première couche est une couche de carton au sol, suivi d'une couche de bois mort, puis une de broyat de bois. Ensuite une couche terre-paille, puis une couche de compost réalisée à partir de déchets de cuisine mélangés à des déchets verts. Ensuite il y a une couche de Bois Raméal Fragmenté (BRF), puis une couche de fumier de cheval, une nouvelle couche de compost et enfin du terreau (voir annexe 1).

Les mêmes plantations ont ensuite été effectuées dans chaque compartiment. Le but étant d'obtenir des résultats rapides et de s'adapter à la saison (plantation en novembre), seuls des fèves, des salades (laitue pommée, laitue romaine et roquette) et des épinards (variété de première récolte) ont été plantés. Chaque compartiment a reçu un apport d'engrais différent. Le premier compartiment est le compartiment témoin et reçoit chaque semaine un arrosoir (10L) rempli d'eau. Le second compartiment reçoit un arrosoir chaque semaine avec 0,7% d'engrais universel classique. Le troisième compartiment est arrosé avec un arrosoir contenant 1% de l'engrais Aurin chaque semaine. Le quatrième compartiment est arrosé avec de l'eau contenant 5% d'urine et les trois derniers compartiments reçoivent des eaux contenant 5% d'urine mélangés à différents dosages de potasse.

Tableau 1 : Résumé des amendements sur le potager en fonction des compartiments tests

Compartiment	1	2	3	4	5	6	7
Eau (L)	10	10	10	10	10	10	10
Engrais universel (mL)		7					
Aurin (mL)			10				
Urine (mL)				50	50	50	50
Potasse caustique (g)					3,5	1	0,3

Les compartiments du jardin ont donc été amendés un fois par semaine avec 10L du mélange approprié pendant 6 semaines. Chaque semaine des photos de chaque compartiment ont été prises afin d'obtenir un suivi visuel de l'évolution de la croissance des végétaux et de pouvoir les comparer entre eux.

Lorsque la croissance des légumes sera suffisante, ils seront récoltés et pesés afin d'obtenir une estimation quantitative des différences de croissance entre les différents compartiments. Des tests statistiques pourront être effectués afin de savoir si la différence de rendement entre les différents compartiments est significative.

II.2. Stérilisation des urines

La seconde expérience concerne la stérilisation des urines avec un stockage selon différentes conditions, trois paramètres différents ont été étudiés : la température, l'ajout de potasse caustique et l'exposition au rayonnement solaire (UV). De plus, deux types d'urine ont été soumises aux tests, des urines provenant de toilettes sèches à séparation et certaines provenant d'urinoir. Les urines qui proviennent de toilettes sèches ont une contamination croisée beaucoup plus importante que celles des urinoirs car elle ruisselle sur le tapis roulant qui permet l'évacuation des matières fécales avant d'atteindre leur lieu de stockage. L'urine qui provient des urinoirs n'a pas été en contact avec des matières fécales puisqu'elle a été récupérée dans un bidon de 25L propre à l'aide d'un entonnoir. Les deux types d'urines ont été récupérées pendant une semaine avant d'être transférées dans les différents flacons tests.

Pour l'étude de l'impact de l'ajout de potasse caustique dans l'urine, trois dosages de potasse différents ont été choisis. Le premier dosage permet d'obtenir une quantité de potasse équivalente à celle d'azote. Il a été considéré que la quantité d'azote est de 8100 mg/L et que celle de potassium à l'origine dans l'urine est de 2200 mg/L (Udert et al., 2006). Sachant que la potasse caustique a une pureté de 90%, il faut donc ajouter 5310mg de potasse caustique à un litre d'urine pour atteindre une concentration finale de 8100 mg/L. De la même manière, les calculs ont été faits pour avoir un ajout de potasse caustique qui correspond à une concentration finale de potassium valant respectivement un demi et un tiers de celle en azote.




Pour ce qui est du paramètre sur l'exposition au rayonnement solaire, un flacon transparent va être placé en plein soleil avec une exposition maximale au cours de la journée (plein sud) et un second flacon opaque va être placé au même endroit.

Pour ce qui est de la température, différents endroits du site ont été sélectionnés pour leur écart de température. Les températures ont été suivies au cours du temps grâce à des capteurs qui mesurent la température toutes les dix minutes. Deux flacons ont été placés dans les bureaux qui sont chauffés une partie du temps et dont la température est plus stable puisqu'elle descend peu la nuit. Les variations de température vont de 7,4°C à 24°C avec en moyenne des températures comprises entre 10 et 20°C. Un autre flacon a été placé dehors dans un endroit à l'ombre et peu abrité afin d'obtenir les températures les plus froides possibles. Le capteur a

montré des variations de température entre $-1,5^{\circ}\text{C}$ et 12°C avec en moyenne des températures comprises entre 0°C et 8°C . Enfin, deux autres flacons sont placés dans la serre ou la température est très variable puisqu'elle augmente beaucoup en journée mais redescend aussi beaucoup la nuit. Les flacons témoins et ceux contenant de la potasse ont été stockés dans le container de douche où la température est la plus constante du fait de l'isolation des murs végétaux. Les variations de température enregistrées vont de $2,5^{\circ}\text{C}$ à $8,1^{\circ}\text{C}$ avec en moyenne des températures comprises entre 4 et 6°C .

L'ensemble des flacons et des conditions expérimentales correspondantes sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Synthèse des différents flacons tests en fonction des paramètres étudiés

		Lieu de stockage	Exposition direct	Urine toilette	Urine urinoir
	Témoin	Douche	Non	T1	T2
Ajout de potasse 	Potasse K=N	Douche	Non	P1.1	P2.1
	Potasse K=1/2 N	Douche	Non	P1.2	P2.2
	Potasse K=1/3N	Douche	Non	P1.3	P2.3
Température 	Extérieur	Extérieur à l'ombre	Non	T1.1	T2.1
	Intérieur	Bureau	Non	T1.2	T2.2
	Serre	Serre	Oui	T1.3	T2.3
UV 	Exposition direct	Extérieur au soleil	Oui	UV1.1	UV2.1
	Noir	Extérieur au soleil	Oui	UV1.2	UV2.2

III. Résultats et discussions

III.1 Valorisation agronomique

L'expérimentation sur la valorisation agronomique des urines n'étant pas arrivée à son terme à ce jour, il n'a pas encore été possible de récolter tous les légumes pour réaliser une comparaison de la biomasse produite. Dès que le premier compartiment sera arrivé à maturité, les légumes seront récoltés par compartiment, et par variété et seront pesés séparément. Une moyenne pour chaque compartiment sera réalisée et une étude statistique permettra de montrer quels sont les compartiments dans lesquels la quantité de biomasse est significativement différente des autres.

Pour le moment, les seules observations qui peuvent être faites sont donc visuelles. Il semblerait que le compartiment où les plantes ont la meilleure croissance est celui fertilisé avec l'engrais Aurin. Cette croissance plus importante s'explique sûrement par le fait que contrairement à l'engrais classique, Aurin ne contient pas seulement de l'azote mais aussi de nombreux autres minéraux (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Et que contrairement aux urines l'azote contenu dans celles-ci a été entièrement conservé et se trouve sous des formes qui sont plus facilement disponibles. De plus, c'est aussi dans ce compartiment que les fèves sont sorties en premier. L'engrais semble donc amener aussi plus de précocité aux cultures.

%		Zusammensetzung	Composition
4.2	N	Gesamtstickstoff	Azote total
2.1	NA	Ammoniak-Stickstoff	Azote ammoniacal
2.1	NS	Nitrat-Stickstoff	Azote nitrique
0.4	P ₂ O ₅	Phosphat	Phosphate
1.8	K ₂ O	Kaliumoxid	Oxyde de potassium
1.7	Na	Natrium	Sodium
0.8	SO ₃	Schwefeltrioxid	Anhydride sulfurique
3.1	Cl	Chlorid	Chlorure
0.0015	B	Bor	Bore
0.0001	Fe	Eisen	Fer
0.0012	Zn	Zink	Zinc
0.1	TOC	Gesamt org. Kohlenstoff	Carbone org. total




Figure 1 : composition de l'engrais Aurin

Le compartiment témoin qui ne reçoit pas de fertilisant est celui dans lequel les plantes se sont le moins bien développées et elles semblent aussi avoir été plus sensible aux gelées. Les quatre compartiments recevant les urines se sont bien développés, la croissance semble être inférieure aux plantes fertilisées avec Aurin mais supérieure à celle fertilisé avec l'engrais universel. Le dernier compartiment (n°7), étant celui qui reçoit des urines mélangées à la plus petite quantité de potasse semble s'être mieux développé que les autres. Cela peut s'expliquer par le dosage de potasse qui serait un peu trop important dans les autres compartiments mais

cette hypothèse est assez peu probable. L'autre possibilité viendrait de l'exposition, effectivement les potagers sont situés au sud de la seconde ombrière, le dernier compartiment étant donc celui qui est le plus à l'ouest, il reçoit plus de lumière que les autres puisque c'est le dernier à être exposé au soleil le soir. Cette différence d'exposition est inférieure à une heure puisqu'il y a seulement 8 mètres d'écart entre les compartiments et il reste difficile de juger l'influence de cette exposition supplémentaire.

Pour tenter de quantifier ces différences une note a été attribuées à chaque plante allant de 1 à 3 en fonction de la taille de plants le 3 janvier 2022. Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant et confirme l'évaluation visuelle présentée avant.

Tableau 3 : Synthèse des notes attribuées au différents compartiments en fonction du développement des plants

Compartiment	Témoin	Universel	Aurin	Urine	Urine N=K	Urine N=2K	Urine N=3K
Note attribuée	20	33	49	33	35	40	39

Les différences de croissance ne semblent pas seulement venir des différentes fertilisations mais aussi des variétés. Trois variétés de salades différentes ont été plantées et bien que certaines soient les plus impressionnantes avec une fertilisation grâce à Aurin (roquette), d'autres semblent s'être mieux développées avec des urines (laitue romaine).

Au-delà du poids, il est important de noter que d'autres facteurs pourront être pris en compte lors de la récolte, c'est le cas par exemple de la résistance au gel, de la précocité des plants, de la qualité gustative des légumes, de leur aspect visuel ou encore de leur résistance à d'autres facteurs de stress.

Tableau 4 : Photos du 03/01/22



Le tableau ci-dessus présente des photos du 3 janvier 2022 montrant les casiers ayant le plus de différence entre eux.

III.2 Stérilisation des urines

Pour l'expérience concernant la stérilisation des urines, les analyses bactériologiques ont été réalisées dans un laboratoire accrédité COFRAC. Seul le paramètre *Escherichia Coli* a été étudié et ces bactéries ont été quantifiées grâce à la technique des microplaques. Les flacons ont été préparés le 23 novembre 2021 et le jour même une partie des mêmes urines qui ont servi à préparer les flacons tests ont été emmenées au laboratoire. Les analyses ont montré que les urines provenant des toilettes utilisant la technologie d'Ecodomeo contenaient 23 027 NPP/100 mL d'E. coli alors que les urines provenant d'un urinoir contenaient 50 317 NPP/100 mL d'E. coli. Les analyses de pH le même jour ont aussi montré une grande différence entre les deux types d'urine. Effectivement, les urines provenant des urinoirs avaient un pH de 6,4 alors que les urines provenant des toilettes avaient un pH de 9,4. Ces résultats s'expliquent par le fait que dans les deux cas les urines ont été récoltées pendant une semaine avant de servir aux expériences. Il semble donc que les urines des toilettes qui ont été en contact avec des matières fécales sur le tapis contiennent un nombre de bactéries beaucoup plus important que celle qui ont été récupérées dans l'urinoir. Certaines des bactéries contenues dans les matières fécales permettent de dégrader l'urée ce qui a fait augmenter le pH des urines des toilettes et a sûrement tué une grande partie des bactéries contenues dans ces urines, ce qui explique le taux d'E. coli inférieur à celle des urinoirs. Le pH des urines de l'urinoir n'ayant pas été modifié par la dégradation de l'urée, presque toutes les bactéries qui s'étaient retrouvées dans ces urines s'y trouvaient encore lors de l'analyse au laboratoire, ce qui expliquerait le taux de bactérie supérieur dans ces urines comparées à celle des toilettes.

Le suivi régulier du pH et de la température des différents flacons a permis de montrer des différences entre ceux-ci. Les températures des flacons placés dans le bureau et dans la serre étaient bien plus élevées que les autres quand les relevés étaient pratiqués dans l'après-midi, alors que le matin dans la serre les températures étaient similaires à l'extérieur. Les flacons témoins et ceux contenant de la potasse étaient placés dans la douche, la température était presque similaire à l'extérieur. Pour ce qui est du pH, seuls les flacons qui ont reçu un ajout de potasse avaient un pH différent des autres. Pour tous les autres, le pH est resté le même que celui mesuré le jour de la mise en flacon. Pour les urines des urinoirs, le pH des flacons avec de la potasse était respectivement du plus concentré au moins concentré d'environ 13,3 ; 10 et 7,2. Alors que pour les urines des toilettes le pH était respectivement de 10,2 ; 9,9 et 9,7. Afin de voir si ces observations correspondent à des différences qui peuvent être étudiées et qualifiées de significatives des tests statistiques ont été réalisés. Les résultats détaillés des mesures de pH et de température sont disponibles dans l'annexe 2.

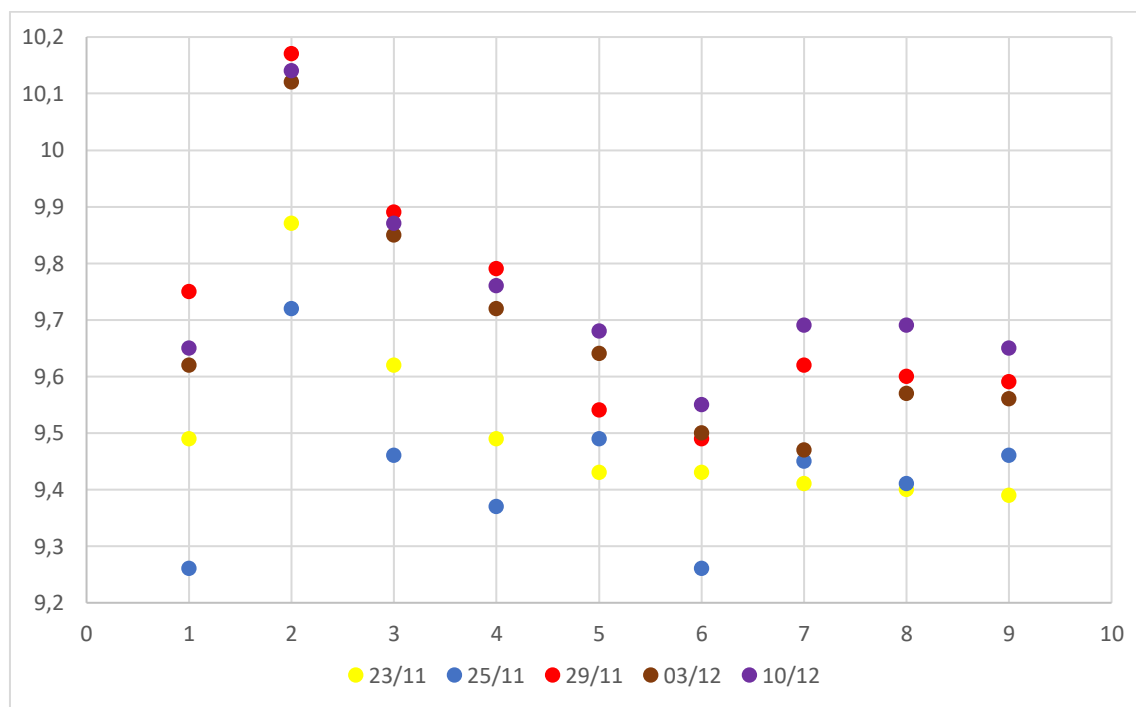
Tests statistiques pour le pH et la température

Pour analyser les différences de température et de pH entre les flacons stockés, une série de tests statistiques a été réalisé. Comme aucune des séries de données ne respecte la normalité des valeurs et l'homoscédasticité des variances, seuls des tests non paramétriques ont pu être

réalisés. Comme les valeurs à comparer étaient toutes numériques et qu'elles sont indépendantes, ce sont des tests de Kruskal-Wallis qui ont permis d'obtenir les résultats suivants. Pour rappel, lorsque la p-value est inférieure à 0,05, la différence entre les valeurs testées est significativement différente, lorsqu'elle est supérieure on ne peut pas établir de conclusion quant à une différence des valeurs.

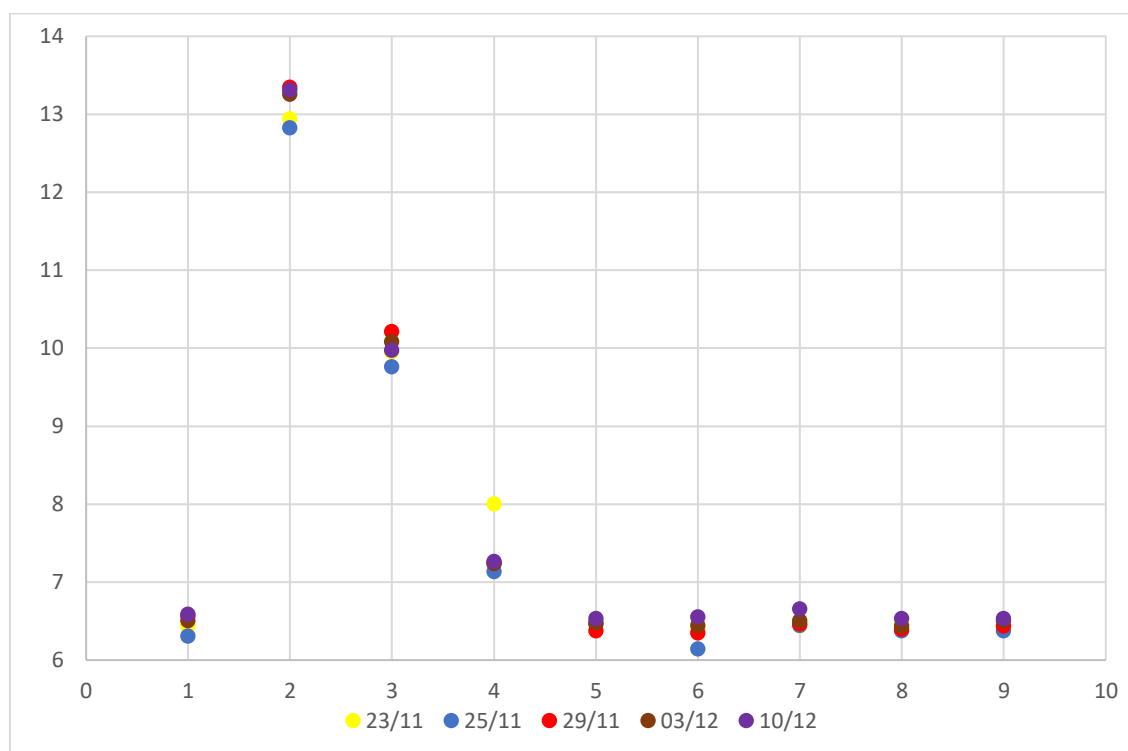
Pour les tests statistiques sur le pH, les deux types d'urine ont été analysés séparément car le pH de départ est très différent (6,4 pour celle des urinoirs et 9,4 pour celle des toilettes). Pour les urines des toilettes le seul pH qui soit différent significativement des autres est celui avec l'ajout de potasse caustique le plus important (p-value = 0,02). Les deux autres flacons avec un ajout de potasse moins important ne sont pas différents significativement (p-value = 0,8 et 0,7). Les autres flacons ne présentent pas non plus de différences significatives sur le pH entre eux (voir premier graphique ci-dessous). Pour les urines des urinoirs, tous les flacons auxquels de la potasse a été ajoutée ont un pH significativement différent des autres (p-value = 0,01 et 0,03) mais les autres flacons ne présentent pas de différence sur le pH entre eux (voir second graphique ci-dessous).

Figure 2 : Graphique des pH pour différentes dates en fonction des flacons pour les urines des toilettes



Comme expliqué ci-dessus, le seul flacon dont le pH est différent significativement des autres est celui du flacon n°2 qui correspond à l'ajout de potasse maximum. Les autres variations ne sont pas significatives. On peut aussi noter que pour les urines des toilettes les variations de pH sont dans tous les cas très faibles puisque tous les pH sont compris entre 9,2 et 10,2.

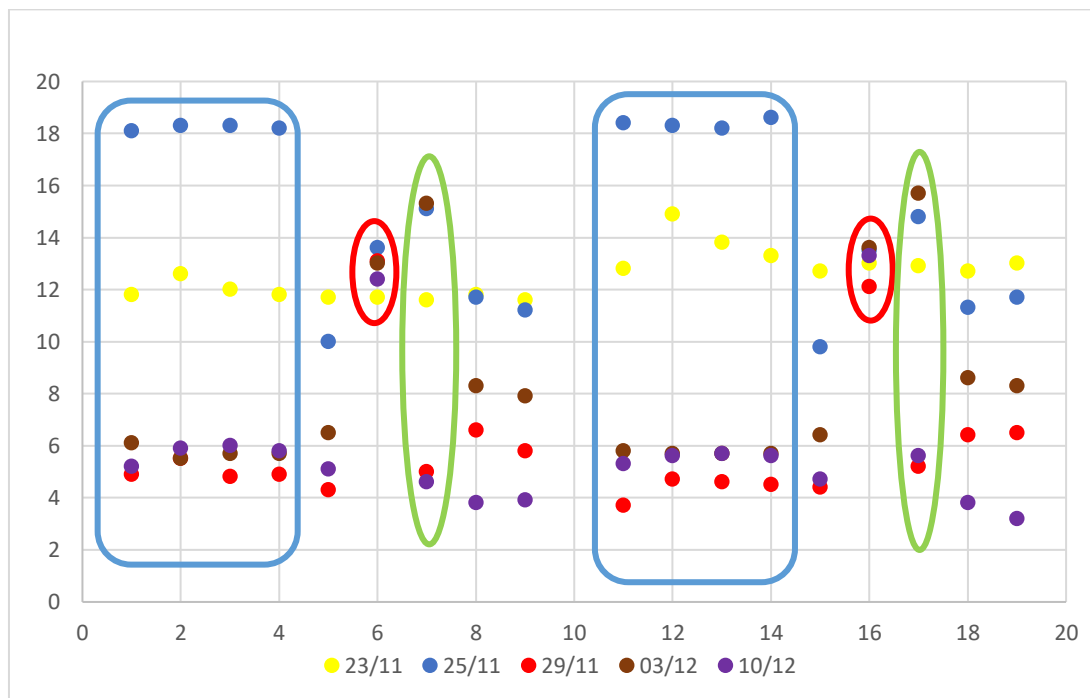
Figure 3 : Graphique des pH pour différentes dates en fonction des flacons pour les urines des urinoirs



On voit sur le graphique ci-dessus que les variations de pH sont bien plus importantes pour les urines des urinoirs puisqu'elles vont de 6 à 13,5. Les différences significatives des flacons avec des ajouts de potasse sont visibles sur le graphique (points 2, 3 et 4). On peut aussi observer que les variations de pH des autres flacons sont moindres et s'étalent sur une demi unité de pH.

Pour les tests statistiques sur la température, les deux types d'urine ont été analysés ensemble puisque la température n'est pas dépendante du type d'urine. Cependant, les résultats des tests ne permettent pas de conclure à une différence entre aucun des flacons quel que soit leur lieu de stockage (p-value = 0,2 ; 0,9 et 1). Effectivement, sur le graphique suivant, il est possible d'observer que les températures sont très variables mais pas forcément en fonction des différents flacons. La variation de température étant une mesure ponctuelle, elle dépend énormément de la date de mesure puisque les mesures n'ont pas toutes été prises à la même heure (voir annexe 2), ni sous les mêmes conditions météorologiques. On peut cependant repérer sur le graphique les différents emplacements des flacons, les points entourés en rouge sont ceux des flacons entreposés à l'intérieur, les variations sont donc moindres. Les points encadrés en bleu sont ceux qui ont été stockés dans le container de la douche, les deux premiers sont élevés puisque la douche était chauffée pendant la première semaine puis les points sont très proches et plus bas pour les autres semaines puisqu'il n'y avait plus de chauffage. Les points entourés en vert sont ceux des flacons entreposés dans la serre, là aussi la variation de température est importante mais elle reste légèrement plus importante que pour les autres points. Enfin, les points qui ne sont pas encadrés sont ceux des flacons qui ont été stockés à l'extérieur.

Figure 4 : Graphique des températures pour différentes dates en fonction des flacons



Au vu des conditions du site, seul l'effet des températures inférieures à 10°C et négatives aura pu être testé sur les urines, aucune condition n'a permis d'atteindre des températures suffisamment importantes pour tuer une partie ou l'ensemble des bactéries sur cette campagne d'étude. Il sera intéressant de comparer ces résultats avec ceux des flacons qui ont été stockés cet été dans lequel la température a atteint les 50°C.

Pour ce qui est des variations de pH, comme voulu, les différences ont été significatives pour les urines des urinoirs mais pas pour celles des toilettes. Cette différence s'explique sûrement par le fait que les urines des toilettes contiennent de l'ammoniac solubilisé qui peut jouer un rôle tampon sur l'urine et diminuer l'élévation du pH attendu avec l'ajout de potasse.

Résultats bactériologiques

Les flacons stockés dans différentes conditions ont ensuite été analysés le 20 décembre 2021, dans le même laboratoire que les précédents et en suivant le même protocole. La période de stockage a donc été de 4 semaines.

En parallèle de ces analyses, un des flacons témoins a été analysé sur place grâce à des kits de test Hach sur les coliformes totaux. Le kit a été maintenu 48h entre 37 et 44 degrés, puis la quantité de bactérie a été estimée grâce à une estimation visuelle en comparaison à des concentrations types. Le flacon qui a été testé est celui des urines de toilette témoin. Les résultats semblent indiquer une densité de colonies de 100 000 coliformes thermotolérants. L'analyse des mêmes urines effectuée au laboratoire a donné un résultat d'environ 26 000 NPP d'E. coli/100 mL. Les ordres de grandeurs des tests faits sur place étant assez peu précisés le résultat semble cohérent. Il semblerait qu'à l'avenir ce type d'analyse soit principalement utilisé pour du suivi afin d'avoir des valeurs non précises mais permettant d'évaluer la proportion de bactéries au cours du temps.

Une des hypothèses sur la manipulation de pH des urines grâce à la potasse est qu'en plus d'ajouter du potassium pour avoir une meilleure qualité, l'augmentation de pH si elle permet d'atteindre un pH supérieur à 10, permettrait de stopper l'hydrolyse de l'urée et donc de garder un maximum d'azote dans l'urine (Randall et al., 2016). Suite aux analyses au laboratoire sur les flacons témoins et ceux contenant de la potasse il n'est pas possible de voir si l'hydrolyse de l'urée est bien stoppée. Les résultats sur l'azote total montrent que la différence entre les flacons n'est pas supérieure à 5% et même si la différence est minime dans la plupart des cas les flacons avec de la potasse contiennent moins d'azote (voir tableau ci-dessous).

Tableau 5 : Résultats des mesures d'azote total sur les flacons contenant de la potasse et les témoins

	T1	P1.1	P1.2	T2	P2.1	P2.2	P2.3
pH	9,65	10,14	9,87	6,58	13,31	9,97	7,26
N total (mg/L)	7870	7980	7560	8380	7920	7820	7240

Bien qu'il ne soit, au vu des résultats précédents, pas possible de conclure à une inhibition de l'uréase, il pourrait être intéressant de refaire ce test après des temps de stockage plus long et dans des cuves de stockage avec plus d'air disponible.

Pour ce qui est des résultats d'E. coli au laboratoire, les résultats en NPP/100 mL sont compilés dans le tableau suivant. Les résultats des analyses sont en NPP/100 mL, cette unité indique le Nombre le Plus Probable de bactéries présentes dans 100 mL d'urine. Le seuil de détection des microplaques utilisées au laboratoire est un NPP de 56 pour 100 mL, il sera donc considéré que lorsque les résultats obtenus au labo sont la valeur seuil (< 56) les urines analysées ont été stérilisées et qu'elles ne contiennent plus de bactéries.

Tableau 6 : 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

Les deux flacons témoins contiennent toujours des bactéries, pour ce qui est des urines des toilettes la quantité est très légèrement supérieure à celle trouvée avant le stockage et pour les urines des urinoirs la quantité d'*E. coli* est supérieure à celle du début, celle-ci n'ayant pas tout à fait doublée. Le taux d'*E. coli* obtenu lors de la campagne de stockage de 6 mois au bout de 4 semaines était de 82 980 NNP/100 mL pour des urines provenant de toilettes, les résultats obtenus ici sont relativement similaires pour les urines des urinoirs où les bactéries ont pu se développer lentement du fait d'un pH optimum mais d'une température très faible. Cependant, dans les urines des toilettes le développement bactérien a été quasi nul du fait du pH élevé et de la très faible température.

Pour ce qui est des flacons dans lesquels de la potasse a été ajoutée, les résultats sont les mêmes pour les deux types d'urine. Les deux dosages les plus importants semblent avoir permis une désinfection des urines alors que le dosage le plus faible a seulement permis de réduire la concentration en bactérie (diminution à peu près par deux).

Pour ce qui est des tests sur les variations de température, il semblerait que tous les flacons d'urine des toilettes aient été désinfectés par ces températures très froides et l'élévation naturelle du pH dans les urines. Dans le cas des urines provenant des urinoirs le pH est resté proche de la neutralité, le seul abattement qui aurait pu avoir lieu proviendrait donc des températures. Au vu des résultats obtenus dans les différents lieux, il semblerait que les températures mêmes négatives ne suffisent pas à tuer toutes les bactéries puisque les concentrations de celles-ci ont augmenté dans tous les flacons. Pourtant l'augmentation n'est pas la même partout, si dans le flacon exposé à l'extérieur aux températures les plus froides on observe une augmentation par trois de la concentration en bactéries, celle-ci est sept mille fois supérieure dans les flacons stockés dans la serre. Le flacon exposé à l'extérieur a subi des températures négatives toutes les nuits et des températures dépassant rarement les 8°C en journée, la croissance des bactéries a donc été fortement ralentie. Le flacon positionné dans le bureau a été exposé à des températures relativement constantes allant de 5 à 15°C, la croissance des bactéries devait donc être constante mais moins rapide que dans le flacon positionné dans la serre. Les températures dans la serre ont été très variables puisqu'elles ont frôlé le zéro presque toutes les nuits et sont montées jusqu'à presque 20°C en journée. La croissance des bactéries a donc été très ralentie la nuit mais boostée par la chaleur la journée, c'est sûrement pour cela que c'est le flacon avec la concentration en bactéries la plus importante.

Enfin, pour ce qui est de l'exposition au rayonnement solaire, il est plus difficile de tirer des conclusions puisque les deux flacons d'urine des toilettes ont été désinfectés mais il est plus probable que cette désinfection provienne de l'augmentation naturelle du pH et des températures très froides puisque pour avoir un maximum d'exposition, les flacons se trouvaient en extérieur. Les flacons des urines de l'urinoir contiennent toutes deux des proportions de bactéries plus importantes qu'au début, il est tout de même important de remarquer que le flacon exposé au rayonnement solaire contient six fois moins de bactéries que son homologue resté dans le noir.

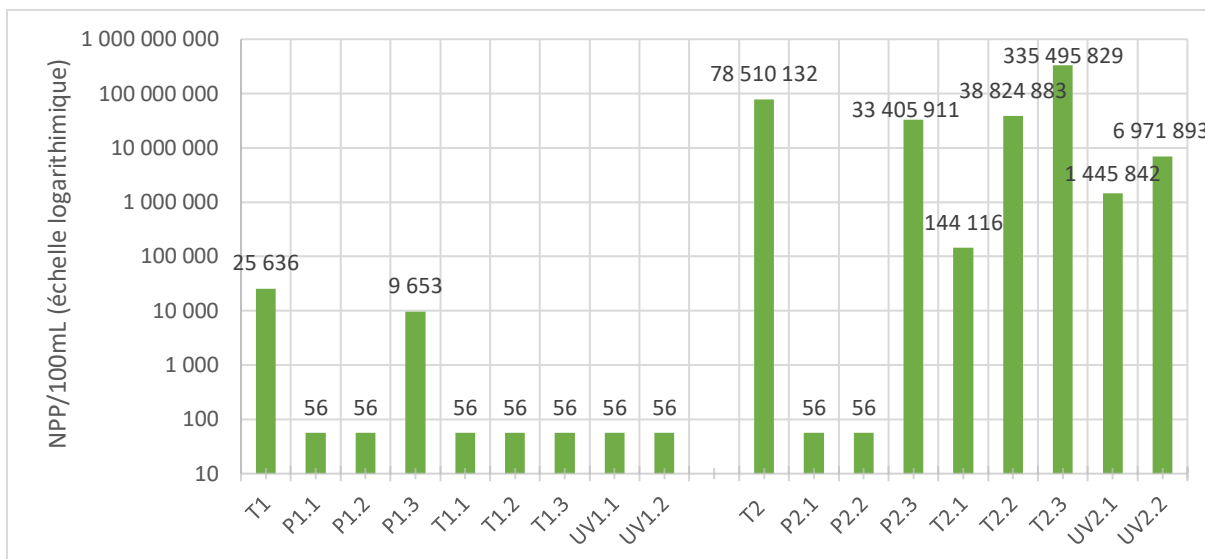


Figure 5 : Graphique de synthèse des concentration en *E.coli* en fonction des flacons

Ces expériences permettent donc de montrer que l’ajout de potasse caustique à un dosage assez important permet la stérilisation des urines des urinoirs de manière sûre et que l’augmentation naturelle du pH, dû à la dégradation de l’urée par les bactéries contenues dans les matières fécales, couplée à des conditions difficiles pour la survie des bactéries comme le froid, permet aussi une stérilisation des urines. Les résultats obtenus sur les flacons contenant des urines provenant d’urinoir avec un pH plus neutre montre que le froid et l’exposition aux UV ne sont pas des conditions suffisantes pour la stérilisation des urines. La figure ci-dessus permet une visualisation des différences de concentrations en *E.coli* en fonction des différentes conditions et des types d’urines.

IV. Conclusion

Au vu des différents résultats obtenus lors des expériences décrites précédemment, il semble opportun de continuer les recherches dans cette voie-là.

Effectivement, bien que l'expérience sur la valorisation agronomique des urines pour la croissance d'un potager en permaculture soit encore en cours il semble important de noter qu'avec les premières estimations visuelles la valorisation des urines pour ce type d'usage soit possible. Bien que l'expérience montre pour le moment une meilleure efficacité du produit Aurin, elle permet aussi de montrer une plus-value des urines par rapport à un arrosage sans engrais ou avec un engrais de synthèse classique. On peut cependant noter que le produit Aurin, bien qu'il soit préparé à base d'urine, nécessite plusieurs traitements et coûte 7 euros et 60 centimes du litre alors que les urines sont disponibles en grandes quantités et gratuitement que ce soit en provenance des urinoirs secs ou des toilettes à séparation.

Il semblerait donc pertinent de pouvoir monter une filière de collecte et de stockage des urines dans les meilleures conditions afin qu'elles puissent être utilisées localement et permettent aux agriculteurs et aux particuliers de se fournir en engrais pour des sommes modiques. Cependant, la réglementation ne permet pas encore d'utiliser les urines humaines en agriculture biologique.

L'expérience n'étant pas terminée il est impossible de rendre des conclusions quantifiées sur la plus-value des urines et sur la différence de production obtenue entre les compartiments fertilisés aux urines et ceux avec Aurin. De plus, il semblerait pertinent de continuer les recherches dans ce domaine en faisant par exemple des tests avec d'autres dosages pour les urines mais aussi en faisant des tests où les urines sont stockées dès le début avec la potasse pour voir s'il y a une meilleure conservation de l'azote et si elle a un effet significatif sur la croissance des plantes. Pour savoir si l'exposition au soleil ou les conditions extérieures ont influencé les plantations d'autres tests pourraient être effectués en serre afin d'être dans un environnement plus contrôlé en termes de température, d'exposition, et d'apport en eau. De plus, l'ajout de potasse ne semblant pas concluant pour ce qui est de la plus-value agronomique, il pourrait être intéressant de refaire les tests sur des plantes particulièrement sensibles aux carences en potassium comme les tomates, les pommes de terre ou les betteraves. De plus, le potassium étant censé aider les plantes dans leur lutte contre le stress hydrique et les parasites, mais également leur régulation du pH, la charge électrique et le transport des nutriments. Les prochaines expériences pourraient essayer d'évaluer la résistance acquise par les plantes qui ont reçu des urines mélangées à de la potasse.

L'expérience sur la stérilisation des urines a permis de montrer que l'ajout de potasse à au moins $N = 2K$ permet la désinfection de tous les types d'urines alors que les températures négatives permettent seulement de stériliser les urines des toilettes. Pour ce qui est des tests sur l'exposition au UV, au vu des conditions climatiques, il semblerait que soit opportun de refaire les tests dans une période avec plus de soleil et dans un contenant plus fin. De même, il serait intéressant de pouvoir savoir combien de semaines sont nécessaires à la désinfection



avec l'ajout de potasse et également de faire des tests supplémentaires sur l'augmentation du pH des urines de toilette à partir de son excrétion. Pour ce qui est des prochains tests sur la valorisation agronomique des urines, il est possible de tester l'effet stabilisant des urines sur le compost. Les prochains résultats de la campagne de stockage des urines de 6 mois permettront d'obtenir des informations supplémentaires sur la composition des urines après leur stockage. De même, les nouveaux kits de tests d'E. coli permettront de par leur faible coût d'analyser les flacons qui ont servi à réaliser les tests de cet été sur l'évolution du pH en fonction de la température, de la dilution et du pourcentage d'air dans les flacons.

Références bibliographiques

Hampel, A., Hetzel, R., Maniatis, G., 2015. Comment on “Stress and fault parameters affecting fault slip magnitude and activation time during a glacial cycle” by Steffen et al. *TECTONICS* 34, 1348–1353. <https://doi.org/10.1002/2014TC003772>

Kirchmann, H., Pettersson, S., 1994. Human urine - Chemical composition and fertilizer use efficiency. *Fertil. Res.* 40, 149–154. <https://doi.org/10.1007/BF00750100>

Luo, L., Dzakpasu, M., Yang, B., Zhang, W., Yang, Y., Wang, X.C., 2019. A novel index of total oxygen demand for the comprehensive evaluation of energy consumption for urban wastewater treatment. *Appl. Energy* 236, 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.101>

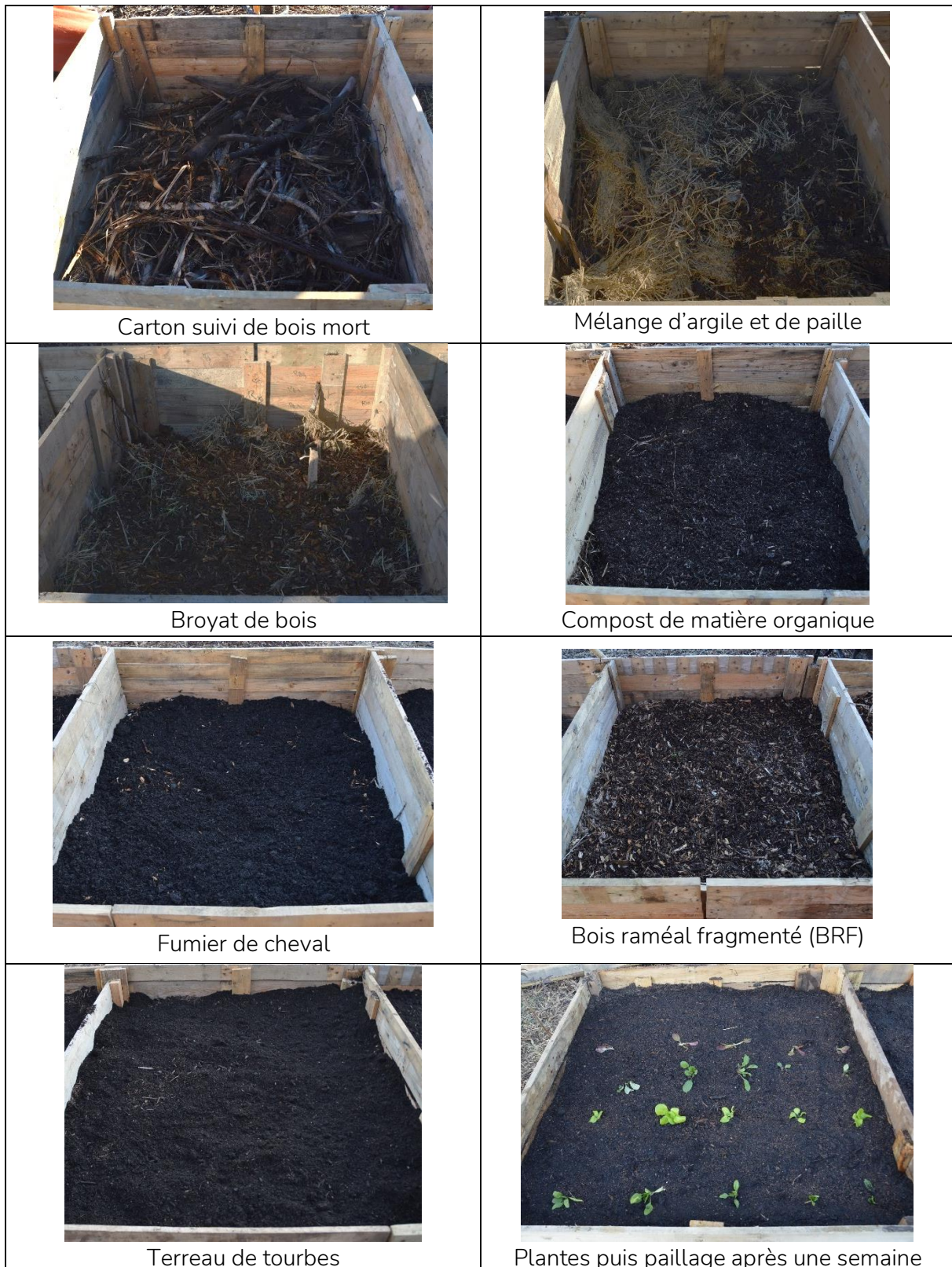
Randall, D.G., Krahenbuhl, M., Kopping, I., Larsen, T.A., Udert, K.M., 2016. A novel approach for stabilizing fresh urine by calcium hydroxide addition. *WATER Res.* 95, 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.007>

Udert, K.M., Larsen, T.A., Gujer, W., 2006. Fate of major compounds in source-separated urine. *WATER Sci. Technol.* 54, 413–420. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.921>

Wali, M.E., Golroudbary, S.R., Kraslawski, A., 2019. Impact of recycling improvement on the life cycle of phosphorus. *Chin. J. Chem. Eng.* 27, 1219–1229. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.09.004>

Annexes

Annexe 1 : Permaculture - Les différentes couches de la lasagne



Annexe 2 : Résultats des relevés de pH et de température

	23/11/21 (16h)		25/11/21 (12h30)		29/11/21 (11h30)		03/12/21 (16h)		10/12/21 (10h30)	
	T°	pH	T°	pH	T°	pH	T°	pH	T°	pH
T1	11,8	9,49	18,1	9,26	4,9	9,75	6,1	9,62	5,2	9,65
P1.1	12,6	9,87	18,3	9,72	5,5	10,17	5,5	10,12	5,9	10,14
P1.2	12	9,62	18,3	9,46	4,8	9,89	5,7	9,85	6	9,87
P1.3	11,8	9,49	18,2	9,37	4,9	9,79	5,7	9,72	5,8	9,76
T1.1	11,7	9,43	10	9,49	4,3	9,54	6,5	9,64	5,1	9,68
T1.2	11,7	9,43	13,6	9,26	13,1	9,49	13	9,5	12,4	9,55
T1.3	11,6	9,41	15,1	9,45	5	9,62	15,3	9,47	4,6	9,69
UV1.1	11,8	9,4	11,7	9,41	6,6	9,6	8,3	9,57	3,8	9,69
UV1.2	11,6	9,39	11,2	9,46	5,8	9,59	7,9	9,56	3,9	9,65
T2	12,8	6,43	18,4	6,3	3,7	6,56	5,8	6,5	5,3	6,58
P2.1	14,9	12,94	18,3	12,82	4,7	13,34	5,7	13,25	5,6	13,31
P2.2	13,8	9,95	18,2	9,76	4,6	10,21	5,7	10,08	5,7	9,97
P2.3	13,3	8	18,6	7,13	4,5	7,24	5,7	7,23	5,6	7,26
T2.1	12,7	6,46	9,8	6,45	4,4	6,37	6,4	6,47	4,7	6,53
T2.2	13	6,4	13,5	6,14	12,1	6,34	13,6	6,44	13,3	6,55
T2.3	12,9	6,43	14,8	6,44	5,2	6,46	15,7	6,5	5,6	6,65
UV2.1	12,7	6,46	11,3	6,37	6,4	6,39	8,6	6,43	3,8	6,53
UV2.2	13	6,42	11,7	6,37	6,5	6,43	8,3	6,5	3,2	6,53

Annexe 3 : Résultats partiels du suivi des urines stockées 6 mois

