

CONCEPTION D'UN OUTIL DE FERTILISATION À L'URINE HUMAINE SUR PLANCHES MARAÎCHÈRES : LE PIPICULTEUR

Projet porté par le programme de recherche-action OCAP
au sein du LEESU à l'École nationale des ponts et chaussées,
avec le soutien de l'ADEME et de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie



Avril 2025

Rédaction : Loïc Déchaseaux, Louise Raguet et Fabien Esculier



Soutenu par



Table des matières

PREMIERE PARTIE : Les enjeux de l'utilisation de l'urine humaine en agriculture et le développement de filières citoyennes.....	5
1. Pourquoi valoriser l'urine humaine en agriculture ?	6
2. Le projet ENVILLE et le développement de filières citoyennes en lien avec des fermes maraîchères.....	7
2.1. Les filières citoyennes de valorisation agricole de l'urine humaine	7
2.2. Les débouchés des filières citoyennes.....	8
Deuxième partie : comment utiliser l'urine humaine en agriculture ?.....	10
3. Cadre réglementaire et recommandations générales	11
4.1. Cadre réglementaire	11
4.2. Logique « multi-barrière » et hygiénisation de l'urine humaine par stockage.....	12
4.3. Equipements de protection.....	13
4.4. Cas particulier de l'agriculture biologique	13
4. Spécificités du lisain	14
4.1. Fabrication du lisain	14
1.1. Teneur du lisain en nutriments.....	14
1.2. Dosages recommandés	14
1.3. Précautions.....	15
1.4. Méthodes d'application.....	16
5. Outils existants pour fertiliser au lisain.....	16
TROISIEME PARTIE Conception d'un outil d'injection de lisain sur des planches maraîchères.....	21
6. Pourquoi développer un outil agricole spécifique ?	22
7. Présentation générale de l'outil développé	23
8. Description et choix techniques	24
8.1. Réemploi d'un pulvérisateur ?	24
8.2. Cuve(s).....	25
8.3. Pompe.....	25
8.4. Dents.....	26
8.5. Châssis	27
8.6. Tuyauterie.....	28
8.7. Axes d'amélioration	29
9. Réglementation sur les outils portés en agriculture.....	30
9.1. Homologation.....	30
9.2. Certification CE.....	30
10. Variantes de l'outil sans la cuve embarquée	30
11. Utilisation	32

11.1	Préparation du sol.....	32
11.2.	Réglages du débit d'injection du lisain.....	33
11.3.	Fonctionnement de l'outil et flux de lisain	34
12.	Coût de l'outil.....	34
QUATRIEME PARTIE Essais de fertilisation et diffusion.....		36
13.	Campagne de tests 2024.....	37
13.1.	Essais	37
13.2.	Résultats.....	38
13.3.	Récolte et sensibilisation sur le sujet de la valorisation de l'urine.....	40
Conclusion.....		41
Remerciements		41
Références.....		41

PREMIERE PARTIE : Les enjeux de l'utilisation de l'urine humaine en agriculture et le développement de filières citoyennes

1. Pourquoi valoriser l'urine humaine en agriculture ?

1.1. Une ressource riche en nutriments, perdue dans les eaux usées

L'urine est riche en nutriments (azote, phosphore et potassium notamment), éléments essentiels à la croissance des plantes. Son utilisation comme fertilisant agricole permet d'assurer une agriculture soutenable, reposant sur des engrais locaux et durables, et non pas sur des engrais de synthèse, dépendants de ressources fossiles (gaz naturel, minerais).

En évacuant les urines par une chasse d'eau vers les égouts, ces nutriments sont dilués dans les eaux usées. Or les systèmes d'assainissement urbains ne permettent qu'un faible niveau de recyclage de ces nutriments (Starck 2024). Par ailleurs, malgré des progrès ces dernières décennies, l'efficacité de la collecte et des traitements des eaux usées reste limitée ; l'azote et le phosphore provenant de l'urine constituent toujours une pollution importante de nos cours d'eau (Starck 2024). Ainsi, la collecte et la valorisation de l'urine permettent donc de réduire la pression environnementale sur les rivières. En outre, l'urine – à l'inverse des matières fécales – présente peu de risques sanitaires biologiques ce qui facilite sa collecte et son utilisation en agriculture.

1.2. Des économies d'eau

La toilette à chasse d'eau est le système très majoritairement utilisé pour évacuer nos excréments (urine et matières fécales). En France, l'ensemble des chasses d'eau représentent environ 20% de la consommation d'eau domestique, soit 750 millions de mètres cubes par an.

Le dérèglement climatique amène de plus en plus d'épisodes de sécheresses et en 2022, « plus de 2.000 communes ont connu des ruptures ou des tensions sur l'approvisionnement en eau potable durant l'été 2022 » (BERTRAND et al. 2023). Dans ce cadre-là, le confort de la chasse d'eau peut être remis en question.

1.3. Quelques chiffres clés (d'après (Fabien et al. s. d.) Esculier et al., 2022) :

L'urine de 1 personne pendant un an = environ 500 m³ de champs fertilisés.

- 25 millions de baguettes de pain par jour pourraient être préparées si la production d'urine de toute l'Île-de-France servait à fertiliser du blé.
- Comme les systèmes d'assainissement de l'agglomération parisienne n'éliminent qu'environ 60% de l'azote des eaux usées, c'est comme si 4 millions d'habitants de cette agglomération envoyaient l'azote de leur urine dans la Seine.
- Les émissions de gaz à effet de serre liées au système alimentation-excrétion sont divisées par 3 par la collecte de l'urine et sa valorisation dans un champ à moins de 100 km
- 20% de la consommation d'eau des foyers est représentée par la chasse d'eau

1.4. Le programme de recherche-action OCAP

Le projet Enville est porté par le programme de recherche-action OCAP, au sein du LEESU (Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains) à l'École nationale des ponts et chaussées. Ce programme vise à étudier et accompagner les transformations des systèmes alimentation/excrétion urbains dans un contexte de transition écologique et solidaire. Ce programme, interdisciplinaire, s'intéresse autant aux questions techniques, agronomiques et sanitaires, que sociologiques et culturelles, liées à la valorisation agricole des excréments humains (<https://www.leesu.fr/ocapi/>). Il est soutenu en particulier par l'Agence de l'Eau Seine Normandie, l'ADEME, ainsi que de nombreux autres partenaires techniques et financiers, principalement publics.

2. Le projet ENVILLE et le développement de filières citoyennes en lien avec des fermes maraîchères

2.1. Les filières citoyennes de valorisation agricole de l'urine humaine

On constate le développement de nombreux projets de collecte séparative des urines en France, dans plusieurs contextes (écoles, immeubles de bureaux, immeubles d'habitation, quartier entier, etc.). Les projets qui sont développés pour l'habitat sont essentiellement des constructions neuves. Ceci interroge la possibilité de mobiliser les gisements d'urine provenant des logements existants, sachant que le renouvellement de la ville n'est que d'environ 1% par an. De plus, la plupart des projets ne mobilisent pas ou peu les futurs usagers ou gestionnaires, qui se voient alors imposer un dispositif de valorisation de l'urine (toilettes à séparation d'urine, réseau de collecte, système de vidange, etc.), qu'ils vont devoir s'approprier pour le bon fonctionnement de la filière. Nous souhaitons donc développer un projet destiné à l'habitat existant, dans une perspective low-tech, facilement appropriable par ses usagers et qui les mobilise dès les premières étapes de conception.

Par ailleurs, au sein du programme OCAP, nous recevons des sollicitations de citoyens qui, découvrant la valeur fertilisante de leur urine et les enjeux d'un système alimentation/excrétion circulaire, nous interrogent sur la possibilité de collecter leur urine à domicile et la valoriser en agriculture « près de chez eux ».

Ainsi, le programme OCAP a développé le projet ENVILLE (« Engrais humain des villes »), qui explore les possibilités de développer des filières « citoyennes » de valorisation de l'urine, à destination des habitants équipés de toilettes à chasse d'eau conventionnelles. Ces filières reposent sur la volonté des participants de ne plus diluer et perdre leur urine dans l'eau de la chasse mais de la collecter « en dehors de la toilette à chasse d'eau », pour la valoriser en agriculture.

Très concrètement, ce projet a permis de développer une filière opérationnelle au sein d'une AMAP¹, entre un groupe d'habitants qui collectent leur urine à domicile, et une ferme qui récupère ensuite l'urine en vue de produire un fertilisant (fig. 1). Cette filière fonctionne depuis janvier 2024 et repose sur un ensemble de protocoles et dispositifs relativement simples à mettre en œuvre, que nous avons détaillés dans plusieurs publications sur le site du programme OCAP : <https://www.leesu.fr/ocapi/les-projets/enville/>. Au travers de cette diffusion, nous espérons permettre à d'autres collectifs d'habitants ou associations de reproduire des filières similaires, et nous sommes disposés à apporter un accompagnement à ces nouveaux projets.



Figure 1: Fonctionnement de la filière citoyenne de valorisation agricole de l'urine développée dans le cadre du projet ENVILLE, entre des habitants membres d'une AMAP et la ferme partenaire qui livre les légumes à l'AMAP.

¹ AMAP (Association pour le maintien d'une agriculture paysanne) = une association de consommateurs qui contractualisent avec un maraîcher, pour une année entière, la livraison de légumes en circuit-court chaque semaine

L'urine collectée jusqu'à présent dans cette filière de « démonstration » a été épandue sur des zones « tests » de la ferme partenaire. À travers ces premiers tests de fertilisation, il nous est apparu essentiel de mener un travail spécifique sur les outils d'épandage des *urinofertilisants* (= fertilisants produits à partir de l'urine humaine), c'est l'objet du présent rapport.

2.2. Les débouchés des filières citoyennes

Implication de fermes maraîchères et « paysannes »

Les filières de valorisation agricole de l'urine humaine peuvent impliquer tous types d'agriculture : aussi bien des grandes fermes céréalières que des fermes maraîchères *paysannes* de petite ou moyenne taille, qui distribuent leur production principalement en circuit-court. C'est principalement le contexte, spécifique à chaque filière, qui va définir les débouchés.

Il semble assez probable que le développement de filières citoyennes mobilise plutôt des fermes maraîchères paysannes, puisqu'elles ont déjà des liens forts avec leurs consommateurs, eux-mêmes engagés pour une agriculture agro-écologique. C'est pourquoi, pour favoriser l'émergence de filières citoyennes, il nous semble essentiel de proposer des dispositifs pratiques et facilement accessibles, pour réaliser les épandages dans ce type de contexte agricole.

Production d'urinofertilisants en contexte de filière citoyenne

Une fois l'urine collectée, il existe différents procédés pour transformer l'urine en « urinofertilisant ». Ces procédés sont plus ou moins simples de mise en œuvre, il convient de les choisir en fonction du contexte de la filière. Certains procédés ne sont d'ailleurs envisageables que pour des échelles de déploiement plutôt industrielles. Nous détaillons l'ensemble des urinofertilisants dans un document spécifique, présent sur le site internet du programme OCAP : https://www.leesu.fr/ocapi/wp-content/uploads/2024/12/fiches_agrocap_i_numerique_BD-compress%C3%A9.pdf

Les filières citoyennes de valorisation agricole de l'urine se développent dans des contextes plutôt low-tech, où, a priori, les investissements doivent être les moins élevés possibles et les dispositifs les plus simples d'appropriation. Ainsi, la transformation la plus probable (pour le moment) à déployer dans des contextes de filières citoyennes est **l'hygiénisation par stockage associée à la logique « multi-barrières »**, d'après les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS 2012). Nous détaillons cela dans la deuxième partie « Comment utiliser l'urine humaine en agriculture ». Le produit obtenu est appelé le lisain, et il présente des contraintes d'application pour éviter des fortes odeurs au moment de l'épandage et une perte potentielle de l'azote, car celui-ci est présent sous une forme particulièrement volatile.

Toutefois, il pourrait être envisagé de *stabiliser* l'urine par nitrification en installant un filtre « Pitribon ». Il s'agit d'un dispositif low-tech et relativement simple de mise en œuvre, proposé par l'association Aneco, qui met en ligne les ressources nécessaires pour construire soi-même son propre filtre : <https://an-eco.ch/solutions-promues/>. L'intérêt de la stabilisation de l'urine est d'obtenir un urinofertilisant dont la forme d'azote n'est pas volatile, à l'inverse du lisain². La réduction de la volatilisation limite les odeurs à l'épandage et les pertes d'azote. La stabilisation peut donc faciliter les conditions d'épandage. Nous n'avons pour le moment pas travaillé avec ce type d'urinofertilisant, mais nous espérons pouvoir tester sa mise en œuvre dans le futur car il nous

² Notons toutefois que le procédé est susceptible d'occasionner des émissions au moment du traitement, en particulier du protoxyde d'azote, et qu'il convient de mener une étude complète de cette filière, encore inexistante à ce jour à notre connaissance.

semble potentiellement adapté au contexte des filières citoyennes. D'autres types de procédés low-tech sont également envisageables (2).

Outils disponibles pour épandre du lisain

Dans la mesure où les filières citoyennes vont plutôt produire du lisain (= urine hygiénisée par stockage) nous souhaitons nous attarder sur le développement d'outils adaptés pour l'épandage de ce type de produit. Or, l'application de lisain présente des contraintes, notamment pour limiter la volatilisation mais aussi pour éviter le contact avec les parties aériennes des plantes. Ces contraintes sont détaillées dans la deuxième partie « Comment utiliser l'urine humaine en agriculture ».

Ainsi, toujours dans une perspective de soutenir le développement des filières citoyennes et faciliter l'application de lisain dans le contexte des fermes maraîchères et paysannes, nous avons souhaité recenser les outils disponibles pour fertiliser à l'urine humaine. Nous avons également cherché à définir les itinéraires techniques les plus probables. Ce recensement nous a notamment amenés à constater l'absence d'outils adaptés pour certains contextes d'application et c'est pourquoi nous avons également entamé un travail de conception, pour proposer aux fermes maraîchères un outil permettant d'appliquer du lisain sur leurs cultures.

Deuxième partie : comment utiliser l'urine humaine en agriculture ?

3. Cadre réglementaire et recommandations générales

4.1. Cadre réglementaire

On nomme urino-fertilisants les matières fertilisantes spécifiques issues d'un traitement de l'urine humaine et permettant d'en valoriser les nutriments. Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de réglementation spécifique relative à l'utilisation d'urino-fertilisants en agriculture. La réglementation relative à l'assainissement permet difficilement de prendre en compte les enjeux de circularité, salubrité et de sobriété, liés à la gestion des urines et matières fécales humaines.

La pratique étant émergente³, il est logique que la réglementation existante ne prévoise pas explicitement l'utilisation d'urino-fertilisants. L'absence de cadre réglementaire ne signifie pas une interdiction et ne devrait donc pas nécessairement être un frein au développement des projets de séparation à la source, comme le montre l'émergence de plusieurs filières expérimentales en France, qui sont parfois même de grande ampleur.

Au moins cinq cadres réglementaires possibles ont été identifiés pour les urino-fertilisants :

- La conformité à un règlement européen. À l'heure actuelle, aucun règlement européen pouvant concerner les urino-fertilisants n'a été repéré ;
- L'Autorisation de Mise sur le Marché (AMM). À l'heure actuelle, aucun acteur n'a demandé une AMM pour les urino-fertilisants envisagés dans le projet Enville ;
- Un cahier des charges du Ministère en charge de l'Agriculture. À l'heure actuelle, le Ministère en charge de l'Agriculture n'a pas rédigé de cahier des charges sur les urino-fertilisants ;
- La conformité à une norme. La possibilité d'utiliser cette voie réglementaire est actuellement à l'étude ;
- Le plan d'épandage sous statut de déchet. Par défaut, cette voie peut être utilisée. L'épandage d'urino-fertilisant est alors encadré par la loi sur l'eau (rubrique 2.1.4.0 *a priori*). La déclaration au titre de la loi sur l'eau est requise pour les projets qui épandent davantage que 1tN/an (soit environ 160m³ d'urine de bureaux/habitat ou 250m³ d'urine issue de contexte évènementiel).

Le groupe de travail thématique « séparation à la source » de l'association Arceau IdF a rédigé une note spécifique sur les questions réglementaires. Vous pouvez la consulter sur le site internet d'Ocapi pour une analyse juridique plus complète du sujet ([Bibliothèque → Bibliographie](#)) (ARCEAU 2023).

Le texte de référence internationale pour l'utilisation de l'urine en agriculture est le rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé relatif à l'utilisation sans risque des excréments humains (OMS 2012). Ce rapport indique notamment que le stockage de l'urine constitue une opération de traitement permettant d'utiliser l'urine sans danger pour la santé humaine, en adoptant également une logique multi-barrière. L'Institut de l'Environnement de Stockholm a également publié un guide pour l'utilisation de l'urine en agriculture (Richert, Gensch, et Jönsson 2011). Ce sont les deux

³ Si la pratique est aujourd'hui « émergente », elle n'est pourtant pas nouvelle : la fertilisation des cultures avec les excréments humains, notamment collectés dans les villes, était pratiquée pendant des siècles. Elle a été peu à peu abandonnée avec l'arrivée des engrais de synthèse, au début du 20^{ème} siècle, puis oubliée.

documents de référence principaux que nous appliquons pour les filières développées dans le projet Enville.

4.2. Logique « multi-barrière » et hygiénisation de l'urine humaine par stockage

Pour les filières développées dans le cadre du projet ENVILLE, nous appliquons la méthode « multi-barrière » préconisée par l'Organisation mondiale de la santé pour l'utilisation des excréments humains en agriculture (OMS 2012). Il s'agit d'un ensemble de conditions de collecte, stockage et d'application de l'urine qui permettent d'assurer une pratique à risque considéré négligeable pour la santé des consommateurs et des opérateurs. Chacune des barrières proposées permet d'abaisser le risque et elles peuvent être additionnées pour atteindre un niveau maximal de précaution. Les barrières sont les suivantes :

Séparation à la source (méthode de collecte de l'urine)

Nous recommandons de récupérer des urines qui viennent d'urinoirs fixes et d'appoints (OMS 2012). Le risque sanitaire principal de l'utilisation de l'urine humaine en agriculture est la contamination fécale croisée. Ce risque est donc très faible dans le cas de collecte dans des urinoirs ou bidons.

Stockage de l'urine

La transformation de l'urine qui a lieu au cours de son stockage est un traitement en soi. En effet, la transformation spontanée de l'urée en ammoniac fait atteindre un pH d'environ 9 (Udert, Larsen, et Gujer 2006). La combinaison du pH élevé et de l'ammoniac en solution assure un abattement de la plupart des micro-organismes pathogènes susceptibles d'être présents dans l'urine, même en cas de contamination fécale croisée (OMS 2012).

Le temps de stockage nécessaire varie de 1 à 6 mois : il dépend à la fois du risque de contamination, de la température de stockage et de la culture sur laquelle l'urine sera épandue (cf. section « Restriction des cultures fertilisées »).

Afin de garantir un temps de stockage permettant l'hygiénisation de l'urine, nous réalisons un suivi des dates de remplissage des cuves. Pour que le temps de stockage de six mois soit respecté, il ne faut pas que la cuve ait reçu d'apport d'urine supplémentaire durant toute la période de stockage.

Technique d'application

La façon d'appliquer l'urine sur les cultures participe aussi à réduire le risque sanitaire associé à la fertilisation à l'urine humaine. L'urine doit être appliquée dans le sol et non sur les parties comestibles des plantes. Si possible l'urine doit être recouverte ou enfouie dans le sol tout de suite après application (recouvrir par exemple de paillage ou tonte d'herbe), ce qui permet aussi d'augmenter l'efficacité fertilisante, et réduire la perte ammoniacale et les odeurs (Richert, Gensch, et Jönsson 2011).

Dans notre cas, nous allons mettre l'urine dans les sols avant les semis ou les plantations. Cette méthode nous paraît être le gage d'une utilisation structurellement la plus sûre possible du lisain.

Restriction des cultures fertilisées

Si l'urine a été traitée par stockage (6 mois à 20°C) et que les autres barrières sont respectées, il n'est pas nécessaire d'appliquer des restrictions particulières aux cultures fertilisées à l'urine.

Cependant, si vous épandez de l'urine qui a été stockée moins de six mois à 20°C, il faut restreindre la pratique à des cultures « non-sensibles » :

- Cultures qui ne se consomment pas (par exemple fleurs ornementales)
- Cultures qui se consomment uniquement transformées ou cuites (par exemple céréales, pomme de terre, aubergine, ...)
- Arbres fruitiers : permettant une distance entre le sol et la partie récoltée de la culture.

Période d'attente avant récolte

Un temps d'attente entre la dernière application d'urine et la récolte permet d'ajouter une barrière supplémentaire pour abaisser le risque sanitaire puisque les éventuels pathogènes seront détruits par des facteurs externes comme les UV, le séchage et la température (OMS 2012).

En particulier si les cultures se consomment crues, il faut prévoir un délai d'attente d'un mois entre la dernière fertilisation et la récolte (OMS 2012; Richert, Gensch, et Jönsson 2011).

4.3. Equipements de protection

Bien qu'il n'y ait pas de risque élevé associé à l'application d'urine traitée, il est recommandé aux ouvriers agricoles de porter des vêtements de protection appropriés, en particulier pour se prémunir des risques liés au contact direct (gants, chaussures, vêtements dédiés et changés après manipulation du lisain).

Pour les personnes qui travaillent régulièrement avec du lisain et particulièrement en milieu fermé, nous recommandons l'usage de masques anti ammoniac.

4.4. Cas particulier de l'agriculture biologique

L'agriculture biologique rencontre un enjeu majeur d'approvisionnement en nutriments et pourrait se trouver face à une impasse pour fertiliser ses sols (Nesme et al. 2016). Dans une étude interrogeant la possibilité de produire la totalité de l'alimentation mondiale selon le cahier des charges de l'agriculture biologique (Muller et al. 2017), l'approvisionnement en azote est présenté comme un facteur limitant important. Il pourrait être pallié notamment par l'utilisation de l'urine humaine, qui contient la majorité de l'azote, du phosphore et du potassium que nous ingérons (Billen et al. 2021).

L'urine humaine pourrait constituer un bon apport dit « starter » en sortie d'hiver quand les températures sont encore trop basses pour que l'activité biologique du sol assure la minéralisation de la matière organique.

Cependant, à ce jour, il est juridiquement peu clair de pouvoir utiliser des urino-fertilisants en agriculture biologique. Selon la réglementation, un fertilisant est autorisé en agriculture biologique s'il remplit deux conditions cumulatives : être légalement mis sur le marché (ou faire l'objet d'une dispense telle que notifiée dans l'article L255-5 du Code Rural et de la pêche maritime) et être inscrit à l'annexe II du règlement 2018/848. Pour le moment, il n'est pas certain que les urino-fertilisants remplissent juridiquement ces conditions.

Cela étant dit, les urines et matières fécales animales non issues d'un élevage industriel sont bien autorisées et certains considèrent que les excréments humains pourraient entrer dans cette même catégorie (en particulier s'il s'agit des matières issues du foyer de la ferme), mais cette interprétation reste à confirmer.

D'après une étude menée auprès de différents acteurs compétents (Marandet et Esculier 2022), deux freins principaux limitent l'introduction des urino-fertilisants en agriculture biologique. Le premier concerne les incertitudes vis-à-vis des micropolluants et résidus médicamenteux contenus dans l'urine humaine. On notera que les élevages bio, et *a fortiori* les élevages non bio mais non industriels, utilisent des traitements médicamenteux et que l'épandage de leurs effluents est autorisé en agriculture biologique. Le second frein concernerait le taux élevé d'azote sous forme minérale (et non organique) des urino-fertilisants. On notera que l'excrétion d'urine de ruminant ou de fiente de volaille au champ n'est pas interdite en agriculture biologique, ni le lisier animal ou les digestats de méthaniseurs dont les teneurs en azote minéral peuvent être similaires à celles du lisain.

La FNAB (Fédération Nationale de l'Agriculture Biologique) étudie actuellement l'opportunité de l'utilisation de l'urine humaine en agriculture biologique et les conditions qui permettraient à cette pratique de rentrer dans le cahier des charges de la certification, au regard des pratiques actuelles (FNAB 2024).

4. Spécificités du lisain

4.1. Fabrication du lisain

Le lisain (pour « lisier humain » (Esculier 2018)) est un urinofertilisant obtenu par stockage de l'urine dans un contenant fermé. Lors du stockage, l'urée est hydrolysée en azote ammoniacal, faisant augmenter le pH de l'urine autour de 9. Ces conditions permettent un abattement des pathogènes susceptibles d'être présents dans l'urine.

A ce pH, l'azote sous forme ammoniacal se volatilise fortement dans l'atmosphère. Il est donc impératif de bien fermer la cuve de stockage et de ne surtout pas la ventiler, sans quoi une partie de l'azote est perdu et il se dégage de très fortes odeurs.

C'est aussi pour cette raison qu'il est recommandé d'enfouir le lisain ou le recouvrir après application (cf. paragraphe « Méthode d'application » ci-dessous).

1.1. Teneur du lisain en nutriments

L'urine stockée, appelée aussi « lisain », est un engrais liquide et majoritairement minéral, contenant, en plus de l'azote, une certaine quantité de phosphore, de potassium, de soufre et de micronutriments (Etter, Udert, et Gounden 2015). Les concentrations varient en fonction des contextes. **Une valeur typique de « NPK » du lisain est 0,6/0,05/0,1** (Martin et al. 2020).

Les nutriments contenus dans le lisain sont principalement sous forme ionique et leur biodisponibilité est comparable à celle des engrais de synthèse (Fabien et al. s. d.). L'azote présent dans le lisain est principalement sous forme ammoniacale (9).

1.2. Dosages recommandés

Le lisain peut être appliqué sur la plupart des cultures, et en particulier celles qui ont une forte demande en azote (épinards, choux, blettes, maïs, blé...). Le chiffre de base qui est recommandé dans plusieurs ouvrages est **2L/m²**, mais qui peut être affiné en fonction des cultures (de Looze 2018; Richert, Gensch, et Jönsson 2011).

D'après l'ouvrage « L'urine de l'or liquide au jardin » de Renaud de Looze (de Looze 2018), voici deux méthodes possibles d'application du lisain :

- Méthode 1 : en une fois avant les plantations

En complément de l'amendement habituel (compost, fumier...), incorporer le lisain non dilué dans le sol, 15 jours avant les plantations (dosage en fig. 2).

- Méthode 2 : en cours de culture

En complément de l'amendement habituel s'il y a lieu (compost, fumier...), diluez le lisain au taux de 5% (1 part de lisain pour 19 parts d'eau) et appliquez le lisain toutes les 2 ou 3 semaines, à raison de 10 litres de mélange lisain – eau par m².

Apportez la fertilisation surtout en début de croissance des plantes et stoppez l'application de lisain 1 mois avant la récolte si les cultures sont consommées crues.

Catégorie	Plante	Nombre de litres d'urine à épandre par m ²
Usage intense	Chou et blette	4
Usage soutenu	Céleri	3
	Carde	
	Concombre	
	Aubergine	
	Poireau	
	Poivron	
Usage moyen	Artichaut	2
	Asperge	
	Betterave	
	Brocoli	
	Ail	
	Oignon	
	Pomme de terre	
	Epinard	
	Courge	
	Tomates	
	Courgettes	
Usage modéré	Carottes	1
	Persil	
	Radis	
	Salade	
	Echalote	
	Fraise	
	Navet	
Moins utile	Pois, fèves	0,5
	Petits pois	

Figure 2 : Quantité totale de lisain (avant dilution éventuelle) à appliquer, en fonction des cultures. D'après (de Looze 2018).

De nombreuses publications scientifiques décrivent l'efficacité fertilisante de l'urine, notamment en comparaison avec d'autres engrais et fertilisants disponibles, organiques ou minéraux, sur tous types de cultures (céréales, arbres fruitiers, légumes, prairies...). Vous pourrez en trouver une liste détaillée dans Martin *et al.*, 2020 (Martin et al. 2020).

1.3. Précautions

Si la sensibilité de la culture au lisain n'est pas encore connue ou expérimentée, il peut être mieux d'appliquer le lisain soit avant semis⁴ (15 jours avant) ou à une certaine distance des plantes, ceci afin d'éviter que les racines de la plante trempent complètement dans le lisain appliqué.

⁴ Dans le cadre des essais 2024 nous étions dans l'incapacité d'attendre ce délai et nous n'avons pas remarqué de problématique de levée de semis.

1.4. Méthodes d'application

Pour appliquer le lisain, la méthode recommandée est l'enfouissement. L'ammoniac étant très volatil, il faut le recouvrir de terre (ou autre) pour limiter au maximum les pertes dans l'atmosphère.

Pour les cultures irriguées en goutte à goutte, il est aussi possible d'utiliser ce système pour fertiliser. Lorsque le goutte à goutte est sous du paillage ou des bâches, la volatilisation est d'autant moins importante.

Le lisain présente des caractéristiques proches des digestats de méthaniseur (produit liquide, concentration en nutriments, risque de volatilisation...) et du lisier. Il est donc possible de suivre les mêmes recommandations que pour l'épandage de digestats (Bes de Berc et al. 2021) ou de lisier.

5. Outils existants pour fertiliser au lisain

Dans le cadre du développement de la filière citoyenne de « démonstration », nous avons recensé plusieurs outils disponibles pour que la ferme partenaire puisse réaliser les fertilisations au lisain sous serre, sur planches ou en plein champ. Par ailleurs, le Rich Earth Institute⁵ a également publié un guide d'utilisation des urines humaines en agriculture à destination des agriculteur.ices (lien en anglais <https://richearthinstitute.org>).

Si irrigation en goutte-à-goutte : fertirrigation et injecteur à engrais

Il est possible d'appliquer le lisain dilué dans l'eau d'irrigation, si celle-ci se fait en goutte-à-goutte (asperseurs exclus). Cette technique nous semble être la plus simple de mise en œuvre dans les contextes où un réseau d'irrigation par goutte-à-goutte est déjà en place. Cela peut être fait à l'aide d'un injecteur à engrais venturi ou bien une pompe doseuse. Ces systèmes facilitent grandement l'épandage puisqu'il suffit de réaliser le montage une fois avec une dérivation au réseau d'irrigation de passer par l'injecteur ou la pompe qui prélèvent directement dans la cuve de lisain qui peut être entreposée à proximité.

L'injecteur à engrais venturi fonctionne mécaniquement. La pression d'arrivée d'eau d'irrigation permet d'entraîner l'engrais pour le diluer automatiquement. Le débit d'injection (et donc le % de dilution) dépend du débit d'irrigation.

La pompe doseuse prélève la quantité d'engrais programmée pour l'injecter au réseau d'irrigation. Dans le cadre du projet Enville nous n'avons pas testé ce type de pompe.

⁵ Le Rich Earth Institute, basé aux Etats-Unis, est à la fois un institut de recherche et une communauté de producteur d'urinofertilisant. Ils ont créé la première filière citoyenne avec point d'apport volontaire d'urine.



Figure 3 : Fertirrigation au lisain, dilué par injecteur à engrais venturi et réseau de goutte-à-goutte. A gauche : cuve de lisain à proximité des serres. A droite : Injecteur à engrais venturi relié au réseau d'irrigation et plongé dans la cuve de lisain.

Concernant les taux de dilution, nous avons relevé une grande diversité des pratiques : ce taux varie de 50% (une part de lisain pour une part d'eau) jusqu'à 5% (une part de lisain pour 19 parts d'eau). La dilution pourrait permettre une meilleure assimilation du fertilisant par les plantes (d'après Renaud de Looze (de Looze 2018)). Un autre avantage de la dilution est qu'elle permet de diminuer le risque de volatilisation, de brûlure et de salinisation du sol.

Cependant, une dilution de lisain dans une eau dure peut provoquer la création de dépôts solides qui peuvent boucher les gouttes-à-gouttes (Agricultural Uses for Urine Fertilizer 2021; Zandee, Etter, et Udert 2012). Il est donc recommandé de rincer le réseau d'irrigation après une application de lisain dilué. Il est possible de diminuer le colmatage en envoyant dans le réseau de goutte à goutte de l'eau, puis du lisain puis de l'eau à nouveau. L'application du lisain au goutte-à-goutte est plutôt appropriée car ce système dépose le produit à même le sol. Si les lignes de goutte-à-goutte sont posées sous une bâche ou du paillage c'est encore mieux pour limiter la volatilisation de l'ammoniac.

Il est également envisageable d'utiliser le réseau d'irrigation en goutte-à-goutte pour fertiliser directement au lisain non dilué, à l'aide d'une pompe ou en « gravitaire » (cf. section suivante).

Fertilisation au goutte-à-goutte « gravitaire »

Nous avons relevé des projets qui installent simplement les cuves de lisain en hauteur pour que celui-ci s'écoule de façon gravitaire dans le réseau d'irrigation. C'est ce que nous avons réalisé pour certaines fertilisations, simplement en levant la cuve avec la fourche du tracteur.



Figure 4 : Fertilisation au lisain non dilué, appliqué au goutte-à-goutte "gravitaire"

Il peut donc être envisagé d'installer des cuves en hauteur de façon pérenne comme décrit dans certaines expérimentations (Zandee, Etter, et Udert 2012).



Figure 5 : À gauche : dispositif d'expérimentation de fertilisation au lisain pour mesurer le colmatage en différents contextes au Népal (36) ; À droite : Expérimentation agronomique de fertilisation au lisain en Côte d'Ivoire : cuve surélevée de 1m (Tandia 2006).

Enfouisseur à lisier

Pour des « grandes cultures » (blé, maïs, colza...) le lisain peut être appliqué avec du matériel similaire à celui utilisé pour enfouir le lisier ou les digestats de méthaniseur, pour lesquels des bonnes pratiques d'épandage ont été définies (Bes de Berc et al. 2021). Le lisain a des caractéristiques très proches de ces fertilisants (produit liquide, concentration en nutriments, risque de volatilisation...).

Pulvérisateur et pendillards

L'usage de pulvérisateur est à éviter pour du lisain car la volatilisation est très importante. L'usage de pendillards est déjà plus approprié que le pulvérisateur mais la volatilisation reste importante à la surface du sol plusieurs dizaines d'heures après l'épandage. Idéalement il faudrait donc l'appliquer avant une pluie ou bien – encore mieux – l'enfouir après application.

Epandeur auto-construit

Le Rich Earth Institute propose un épandeur auto-construit attelé à l'arrière d'un tracteur et avec une cuve. Ce modèle permet de fertiliser des planches maraîchères ou des cultures de plein champ.

Cet outil nous semble très intéressant mais il ne permet pas de limiter la volatilisation de l'azote puisque le lisain n'est pas enfoui à l'application (ou bien il faut réaliser un travail du sol / enfouissement après l'application). Cependant, cet outil est très adapté à l'application d'urinofertilisants « stabilisés » c'est-à-dire pour lequel l'azote n'est pas sous forme volatile (c'est-à-dire pas sous forme d'ammoniac mais préférentiellement sous forme de nitrates). Nous ne détaillerons pas cette technique, mais il est possible d'obtenir de l'urine stabilisée par nitrification, et notamment grâce à un procédé low-tech mis au point par Aneco (<https://an-eco.ch/>) : le Pitribon (ANECO 2024).

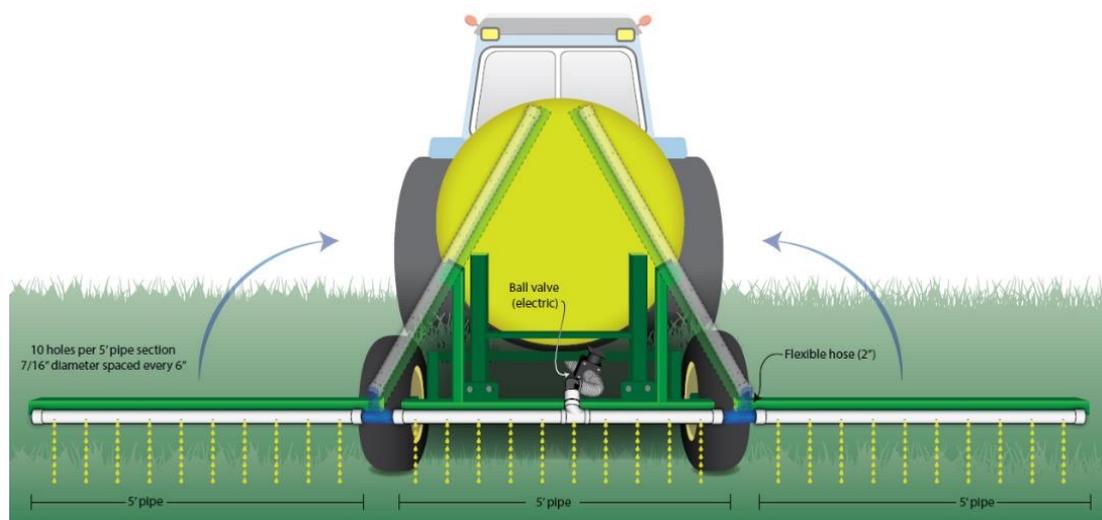


Figure 6 : Épandeur à urine stabilisée auto-construit par le Rich Earth Institute (Atlee 2019) à utiliser en grandes cultures et prairies. Source : Rich Earth Institute



Figure 7: Photos de l'épandeur à urine stabilisée auto-construit du Rich Earth Institute, en cours d'utilisation. Source : Rich Earth Institute.

Injecteur à ferments (autoconstruits)

Nous avons repéré d'autres cas où les agriculteur.ices cherchent à injecter du liquide dans les sols : il s'agit de l'application de ferments et/ou de micro-organismes. Nous n'avons pas trouvé de machines sur le marché pour ces utilisations, mais nous avons identifié des modèles auto-construits, à partir de machines existantes, pour réaliser ces injections dans le sol.



Figure 8 : Fissuration de pâture et injection de ferments avec une machine modifiée. Crédit P.S Calvados / Ulrich Schreier(Schreier 2021)

Cette photo (figure 8 ci-dessus) montre l'utilisation de deux éléments (pulvérisateur, à l'avant, et outil de travail du sol, à l'arrière) combinés pour enfouir le liquide dans les sols.



Figure 9 Dents avec injecteurs. Crédit : Eco-Dyn (Eco-Dyn s. d.)

Ces deux outils sont intéressants car ils montrent qu'il est possible de modifier facilement des outils existants afin d'injecter le lisain dans les sols.

TROISIEME PARTIE

Conception d'un outil d'injection de lisain sur des planches maraîchères

6. Pourquoi développer un outil agricole spécifique ?

Contexte du développement de l'outil et choix de l'itinéraire technique

Les premiers tests de fertilisation au lisain en maraîchage, avec la ferme partenaire du projet Enville, nous ont permis d'identifier les outils existants pour réaliser ces épandages mais également d'identifier des outils « manquants » pour appliquer le lisain dans certaines conditions. En effet, nous ne disposons pas d'outils pratiques pour fertiliser les cultures qui n'étaient pas équipées d'un réseau d'irrigation en goutte-à-goutte, c'est-à-dire les cultures de plein champ et une bonne partie des cultures sur planches (souvent irriguées par aspersion).

Or, la ferme avec qui nous travaillions était particulièrement intéressée de fertiliser des productions justement cultivées dans ces conditions : poireaux, choux, pomme de terre, betteraves... De plus, la fertilisation de ces cultures nous paraissait particulièrement intéressante à effectuer avec du lisain non dilué appliqué en une fois avant semis ou plantation, afin de respecter un délai de plus d'un mois entre la dernière fertilisation et la récolte, d'après les recommandations de l'OMS sur ce sujet (OMS 2012; Richert, Gensch, et Jönsson 2011).

La ferme partenaire du projet Enville était déjà équipée d'un tracteur et nous souhaitions pouvoir y atteler un outil pour injecter le lisain dans le sol avant plantation ou semis, sur planche maraîchère. L'injection permet de limiter la volatilisation au maximum, et donc la perte d'azote et les odeurs.

L'outil que nous avons développé s'adresse donc à des fermes en maraîchage diversifié, en planches, entre 80cm et 1m20 de large, et équipées d'un tracteur d'environ 40CH.

- Itinéraire technique choisi

Nous avons défini la fertilisation au lisain à partir de plusieurs paramètres essentiels : trouver un moyen d'injecter le lisain dans le sol pour limiter la volatilisation et les risques sanitaires biologiques de manière structurelle et réduire le temps de travail nécessaire pour effectuer l'épandage.

Dans un contexte de maraîchage où les sols sont travaillés à l'aide d'outils tractés, il nous semble opportun de venir réaliser la fertilisation après cette préparation ou juste avant le semis/la plantation. L'injection du lisain dans le sol permet de ne pas devoir réaliser un passage supplémentaire pour venir recouvrir le produit après son application, comme cela est fait dans certains contextes, notamment en grandes cultures, après passage par pendillards ou queue de carpe.

L'application du lisain non dilué, en une fois, permet de limiter le temps de travail lié à l'application du fertilisant. De plus, l'application sur sol nu (avant semis ou plantation), nous donne toute la liberté de pouvoir ouvrir le sol pour l'injection.

Pour un itinéraire sur poireaux, nous avons également pensé à la possibilité d'appliquer le lisain au moment du butage, puisque cette action requiert le passage de disque qui vient recouvrir de terre la base des poireaux. L'application pourrait avoir lieu juste avant le recouvrement de terre pour enfouir le lisain. Nous n'avons cependant pas réalisé un tel outil ni testé cet itinéraire.

Nous n'avons pas (encore !) travaillé sur des solutions adaptées aux fermes maraîchères non mécanisées et en non travail du sol. Nous espérons mener un travail spécifique sur ce sujet dans les années à venir, sous réserve en particulier d'obtenir les financements nécessaires.

7. Présentation générale de l'outil développé

Nous avons développé plusieurs outils à atteler à un tracteur, pour enfouir le lisain dans le sol avant plantation ou avant semis. Les outils sont sous licence CC BY NC SA. Afin de ne pas surcharger ce document, la notice détaillée pour le montage et la maintenance est présentée dans un autre document disponible sur le site OCAPI :

<https://www.leesu.fr/ocapi/les-projets/enville/outils-agricoles/>

L'objectif étant d'enfouir le lisain dans le sol, nous avons cherché à transformer des outils de travail du sol, notamment le vibroculteur, sur lesquels seraient fixés les tuyaux d'application du lisain, combinés également à une cuve et une motopompe.

Le nom choisi pour le premier outil développé est le Pipiculteur : il a été pensé comme un enfouisseur de lisain (ou de **pipi**) mélangeant les caractéristiques des **vibroculteurs**, cultivateurs, et épandeurs.



Figure 10 Vibroculteur (Crédit Agriuro)



Figure 11 Cultivateur (Crédit Agriuro)



Figure 12 Epandeur (Crédit Agriuro)

Lors de la conception de l'outil, nous avons envisagé l'utilisation d'éléments de seconde main. Cependant, pour faciliter le prototypage et dans le but de proposer un outil répliquable, nous avons privilégié du matériel courant dans le commerce ou basé sur de l'autoconstruction simple. Nous avons également fait des choix pour réduire le coût de l'outil et nous incitons grandement les personnes qui le peuvent à modifier du matériel déjà présent sur leur ferme pour fabriquer d'autres machines dans l'esprit du Pipiculteur.

Le premier prototype a été conçu de manière modulable afin de pouvoir tester différents outils d'enfouissement. Le Pipiculteur est composé de plusieurs éléments :

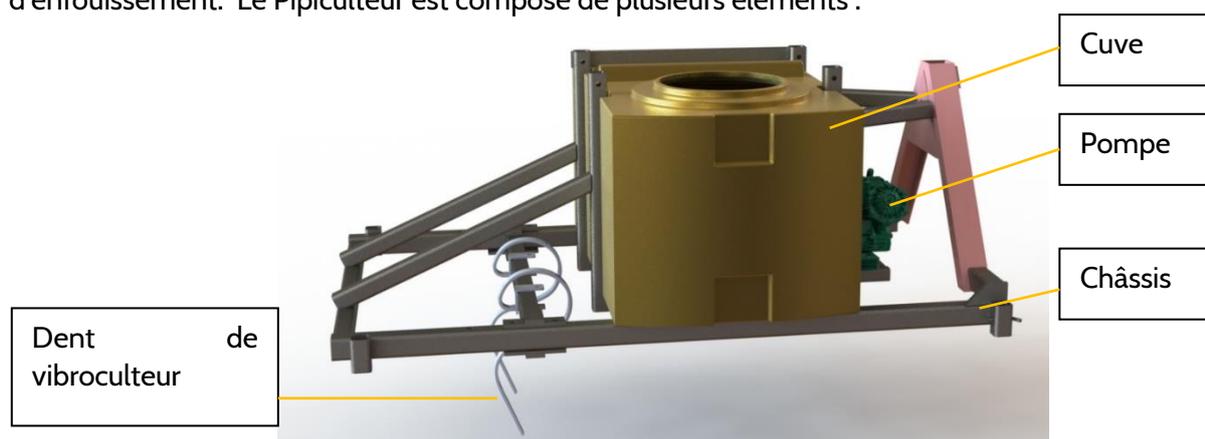


Figure 13 : Modélisation 3D du Pipiculteur

- **Le châssis** est inspiré du vibroplanche de l'Atelier Paysan (<https://latelierpaysan.org/Vibroplanche>). Il se compose notamment d'un triangle d'attelage et d'un support pour la pompe et la cuve. Dans la première version du Pipiculteur, les dents sont montées sur une barre transversale amovible. Ce qui permet de mettre une barre de section 50x50mm adaptée aux dents de vibroculteur ou bien en 80x80mm adaptée aux dents de cultivateur.
- **Une pompe de pulvérisateur** qui est reliée à la prise de force du tracteur avec un cardan. Cette pompe sert à la fois pour remplir la cuve de l'outil, injecter le lisain et vider la cuve en fin d'utilisation. Un répartiteur et les changements de vitesse moteur permettent de régler le débit de lisain injecté.
- **Une cuve de 400L** qui permet de transporter le lisain en même temps que l'outil.
- **Des dents de vibroculteur** associées à un tuyau permettent d'injecter le lisain dans le sol.
- **Un système de tuyauterie** qui permet grâce à un système de vannes de remplir, vider et nettoyer l'outil (non représenté sur la 3D ci-dessus). Le diagramme ci-dessous présente la circulation de lisain dans le Pipiculteur

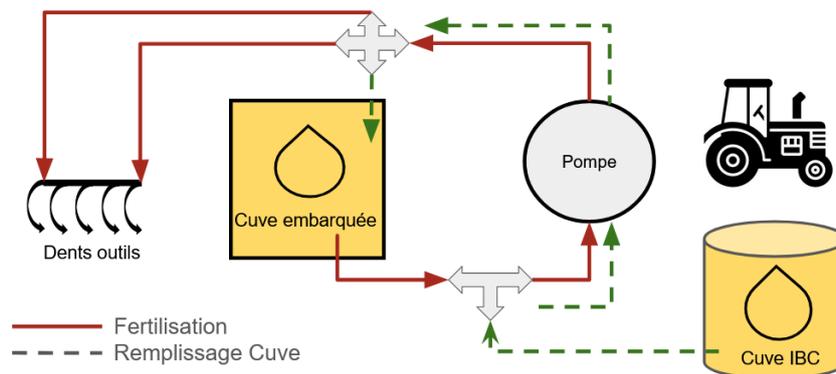


Figure 14 Schéma des flux de lisain dans le Pipiculteur

8. Description et choix techniques

8.1. Réemploi d'un pulvérisateur ?

Initialement nous pensions acheter un corps de pulvérisateur et le transformer pour pouvoir souder des dents pour injecter le lisain. Ce choix a vite été abandonné car les pulvérisateurs coûtent cher et que les châssis ne sont pas assez solides pour réaliser un travail du sol.

Il y a cependant des caractéristiques très intéressantes qui peuvent être empruntées aux pulvérisateurs, comme la présence d'une **cuve de rinçage d'outils**, une **cuve de rinçage pour les mains** et un **fond en cône** pour éviter de garder du produit dans la cuve. Dans le cas de la version actuelle du Pipiculteur, ces éléments ne sont pas intégrés à la machine afin de réduire le poids total de l'outil. Les éléments de rinçage sont quand même prévus dans l'usage de l'outil mais ils doivent être amenés sur site lors de la fertilisation.

8.2. Cuve(s)

En discutant avec plusieurs agriculteur.ices et en considérant les capacités de leurs tracteurs, nous avons fixé un poids max de l'outil à 500/600 kg. Par estimation du poids de l'outil à vide nous sommes donc partis sur une capacité embarquée de 400L de lisain.

Pour la cuve embarquée nous avons besoin des caractéristiques suivantes :

- Cuve rigide
- Suffisamment solide en cas de choc
- Composée d'un matériau qui ne réagit pas avec le lisain
- Possibilité de percer pour utiliser des passe-paroi.

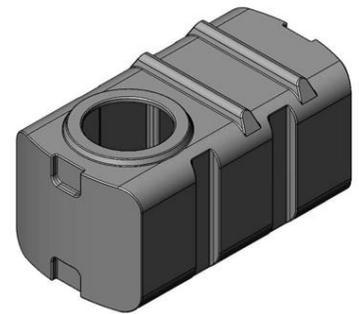


Figure 15 Représentation 3D de la cuve

Nous avons sélectionné le modèle ci-contre car il remplissait tous les critères.

Nous avons également utilisé une cuve type IBC de 1000L pour stocker l'urine en bout de champ et remplir la cuve embarquée si besoin. Dans le cas d'utilisation de tracteur avec fourche, cette cuve peut servir pour alimenter directement la pompe. Cela réduit le nombre de transvasements à réaliser pour faire une fertilisation, mais attention à la capacité de levage de la fourche (cuve IBC pleine = 1 tonne).



Figure 17: utilisation des fourches du tracteur pour embarquer le volume de lisain (alternative à la cuve intégrée à l'outil)

8.3. Pompe

La pompe installée sur la machine sert à la fois à remplir la cuve embarquée avant l'épandage et à envoyer le lisain dans les tuyaux d'injection dans le sol lors de l'épandage. Nous avons besoin des caractéristiques suivantes :

- Résistance aux produits chimiques tel que le lisain (fortement corrosif car riche en ammoniac)
- Mise en route par la prise de force du tracteur
- Possibilité de brancher plusieurs tuyaux en sortie

- Débit important (minimum 60L/min mais idéalement supérieur à 80L/min)
- Faible pression de sortie
- Auto-amorçante
- Hauteur de relevage de 1m minimum

Nous avons choisi un modèle de pompe suite à une discussion avec un commercial de fournitures agricoles. Il est certain qu'il y a d'autres modèles disponibles pour cette utilisation.

Un répartiteur en sortie de pompe ainsi que des vitesses différentes de prise de force nous permettent de pouvoir choisir tous les débits d'injection entre 15L/min et 100L/min.

8.4. Dents

Afin de creuser un sillon pour déposer le lisain nous avons choisi d'utiliser des dents de vibroculteur ou de cultivateur. Nous avons ensuite fixé les tuyaux d'arrivée de lisain derrière les dents avec du ruban adhésif solide (type « gaffeur »). Sur la photo ci-dessous les tuyaux sont fixés un peu « haut » et peuvent être mis plus bas sur la dent.



Figure 18 Dents de vibroculteur avec le tuyau d'arrivée de Lisain (qui peut être fixé plus bas que sur cette photo)

Il est possible d'ajouter un disque ou un déflecteur pour refermer le sillon après l'application de lisain. Nous avons constaté lors de nos essais qu'une préparation fine du sol permet aux sillons de se refermer d'eux-mêmes après le passage des dents. Ainsi, nous n'avons pas cherché à ajouter de disque pour refermer mécaniquement les sillons. Cependant, ceci nous a semblé important pour application sur un sol présentant encore des grosses mottes (cf. paragraphe « 11.1 Préparation du sol »).



Figure 19: A gauche, utilisation de l'outil sur un sol préparé grossièrement : les sillons ne pouvaient se refermer d'eux-mêmes et nous avons constaté de la volatilisation (odeurs). A droite, sol préparé de façon assez fine, les sillons se refermaient d'eux-mêmes après passage des dents et nous avons observé peu d'odeurs.

8.5. Châssis

En prenant en compte les éléments précédemment cités nous avons conçu un châssis en acier. Celui-ci est mécanosoudé et sa fabrication est assez simple. Nous nous sommes inspirés du [vibroplanche](#) de l'Atelier Paysan (L'Atelier Paysan 2024).

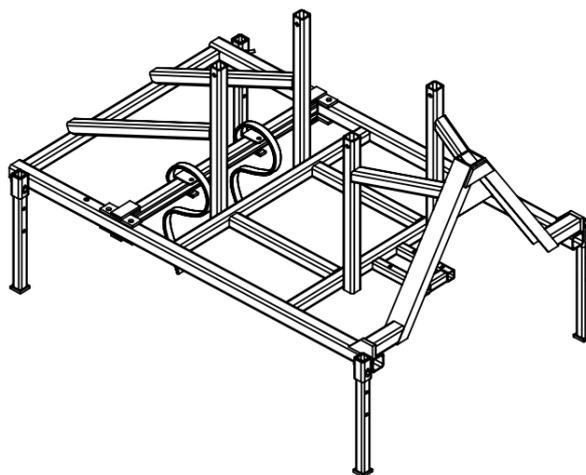


Figure 20 Représentation 3D du châssis du Pipiculteur

8.6. Tuyauterie

Pour choisir les éléments de tuyauterie nous avons défini les fonctions indispensables pour une utilisation correcte du Pipiculteur :

- Remplir la cuve embarquée depuis la cuve IBC « en bout de champ »
- Remplir la cuve embarquée depuis des bidons « en bout de champ »
- Envoyer le lisain aux dents depuis la cuve embarquée
- Envoyer le lisain aux dents depuis la cuve IBC « sur les fourches »
- Vider la cuve embarquée dans des bidons ou dans la cuve IBC

Le système a été conçu de façon à ce que toutes ces étapes puissent être réalisées avec la même pompe, la motopompe embarquée sur l'outil et reliée à la prise de force du tracteur.

En plus de ces fonctions indispensables, il est très important dans tout projet sur la fertilisation au lisain de réduire au maximum les risques de débordements, projections et contact avec les opérateurs. L'utilisation de raccords rapides et de vannes sur les tuyaux, peut diminuer l'exposition. De plus, il est important de porter des équipements de protection adaptés (cf. section « Equipement de protection »).

Nous avons choisi ensuite les différents tuyaux et raccords en fonction des caractéristiques de la pompe et de la cuve IBC. Les éléments qui composent la machine sont détaillés dans la notice de fabrication et d'utilisation. Ci-dessous le schéma des flux de lisain pour le remplissage de la cuve et la fertilisation.

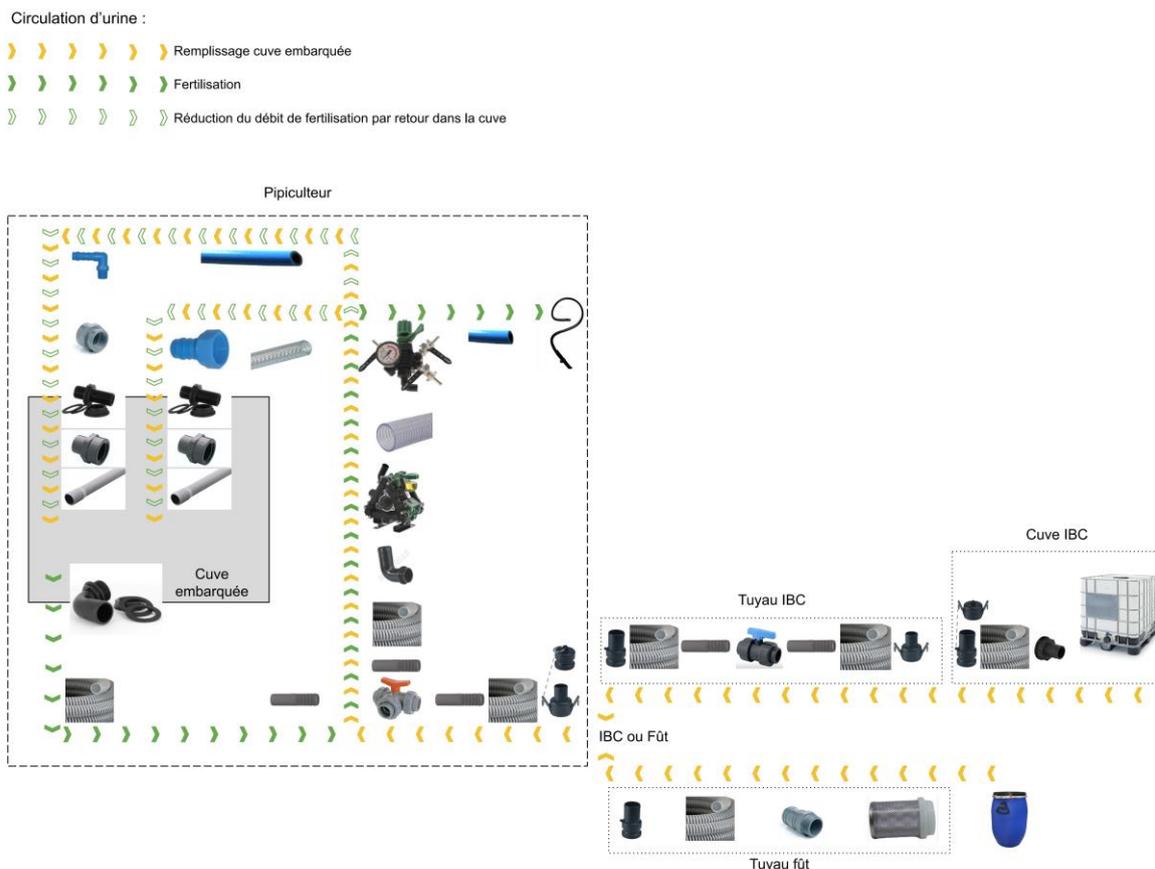


Figure 21 : Schéma de circulation du lisain dans le Pipiculteur. Le remplissage de la cuve embarquée et l'application de lisain dans le sol se font avec la même pompe : c'est l'orientation des vannes qui donne le sens de fonctionnement de la pompe.

8.7. Axes d'amélioration

Suite à la fabrication d'un premier prototype du Pipiculteur, nous avons fait des légères améliorations. Les plans que nous publions incluent ces modifications.

Voici également quelques suggestions supplémentaires d'améliorations ou modifications qui ne figurent pas dans les plans publiés.

Cuve 400L ou 500L

La cuve que nous avons choisie ne possède pas de couvercle étanche. Il est donc pas recommandé de ne pas la remplir complètement pour éviter les débordements dus aux secousses lors du déplacement avec le tracteur.

Il est possible de mettre une cuve de 500L (au lieu de 400) et de la remplir en fonction des capacités de levage du tracteur. Cela impliquerait de modifier la position des renforts sur le châssis et donc impacterait la largeur totale de la machine.



Figure 22 Cuve 500 L possible pour le Pipiculteur

Bac de rinçage de la pompe et « lave-main »

Pour augmenter la durée de vie des éléments et éviter le bouchage des tuyaux, il est recommandé de nettoyer la pompe et la cuve avec de l'eau après chaque utilisation. Il peut être intéressant de souder sur le châssis une structure pour mettre un Bidon de 20L pour faciliter ce nettoyage.

Un bidon pour le nettoyage des mains peut également être facilement mis en place, notamment un bidon déjà équipé d'un robinet.

Attention, l'ajout de ces éléments augmente le poids total de la machine. Pour le prototype réalisé nous avons choisi de ne pas les mettre pour que la machine soit utilisable par le plus de tracteurs possibles.

Défecteur

Si le travail du sol avant fertilisation donne des mottes suffisamment petites, les sillons se referment directement après le passage des dents. Lors de nos essais nous n'avons pas utilisé d'outils pour refermer le sillon mais il est facilement possible d'ajouter un déflecteur, un disque, ou une patte d'oie par exemple.

Si le Pipiculteur est utilisé dans un itinéraire technique qui n'inclut pas de travail du sol important, nous recommandons de refermer mécaniquement les sillons avec des disques ou déflecteurs.

Roues de terrage

Il est possible de remplacer les béquilles arrière par des roues de terrage pour régler plus facilement la profondeur de travail.

9. Réglementation sur les outils portés en agriculture

9.1. Homologation

Le Pipiculteur n'est pas soumis à une homologation routière car il s'agit d'un outil porté.

D'après la chambre d'agriculture du Loiret : « Pour circuler sur les voies de circulation, la très grande majorité des machines agricoles doit faire l'objet d'une homologation routière (dit aussi « réception routière »). Seuls en sont exclus, les outils portés et les véhicules remorqués inférieurs ou égaux à 1,5 tonne de PTAC. » (DESEAU 2021).

9.2. Certification CE

D'après l'Atelier Paysan qui est une coopérative d'autoconstruction de matériel agricole : « La procédure de certification des machines agricoles qui s'applique aux grands constructeurs concerne également l'exploitant auto-constructeur qui met à disposition une machine conçue et construite par ses soins. Il se doit de respecter les règles essentielles de santé et de sécurité qui s'appliquent à toutes les machines mises sur le marché européen. Afin de justifier, sous sa responsabilité, de la conformité de la machine, il doit établir un ensemble de documents décrits ci-dessous. Les formalités obligatoires pour l'auto-certification sont définies dans la Directive européenne 2006/42/CE transcrite dans le code du travail (Articles R 233-73 à R 233-76). » Plus d'informations concernant l'autocertification sont disponibles sur le site de l'Atelier Paysan (<https://latelierpaysan.org/Techniques-securite-reglementations>).

Le Pipiculteur est considéré comme une machine car il comporte une pompe qui est entraînée par le moteur du tracteur. Chaque constructeur d'un Pipiculteur a donc la responsabilité de construire une machine qui respecte les règles de construction européenne, et de l'auto-certifier d'après la procédure décrite par l'Atelier Paysan.

Nous mettons à votre disposition un modèle de dossier d'auto-certification, basé d'après les deux machines que nous avons construites et auto-certifiées. Vous devrez adapter ces modèles aux détails techniques de la machine que vous avez effectivement construite. Le dossier est téléchargeable sur le site internet OCAP (<https://www.leesu.fr/ocapi/les-projets/enville/outils-agricoles/>), il est composé de :

- la notice de la machine
- le document « dossier de certification Pipiculteur »
- la déclaration CE de conformité.

10. Variantes de l'outil sans la cuve embarquée

Il est possible, si le tracteur le permet, d'utiliser une cuve de 1000 L (IBC par exemple) portée par les fourches, à l'avant du tracteur. Cela permet de travailler avec un plus grand volume de lisain et donc de réduire les aller-retours de remplissage au cours de l'épandage. Pour ces variantes, nous proposons donc d'enlever la cuve sur le châssis à l'arrière, ce qui permet de réduire sa taille, son poids, le temps nécessaire de fabrication et facilite le transport d'une ferme à l'autre.



Figure 23: Exemple de cuve IBC à l'avant du tracteur

Cependant, au moment de la rédaction de ce rapport les options avec la cuve à l'avant du tracteur n'ont pas été testées en conditions réelles.

Pour les variantes sans cuves embarquées, les avantages sont multiples (poids, dimensions et coûts plus faibles), mais elles nécessitent un tracteur adapté.

Pipiculteur sans cuve

Cette variante reprend la structure du Pipiculteur en enlevant la partie cuve embarquée.

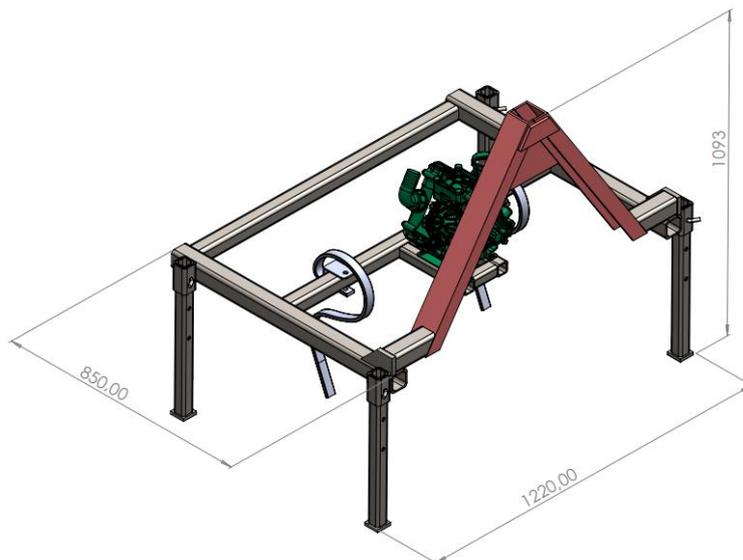


Figure 24 : Dimensions du Pipiculteur sans cuve

Triangle d'attelage avec pompe

Cette variante est en fait un adaptateur entre le tracteur et un outil de travail du sol (vibroculuteur, cultivateur, barre porte outils...) déjà existant. Attention, lors de la rédaction de ce rapport, la conception de cet adaptateur n'est pas finalisée (il manque notamment les renforts entre les deux triangles).

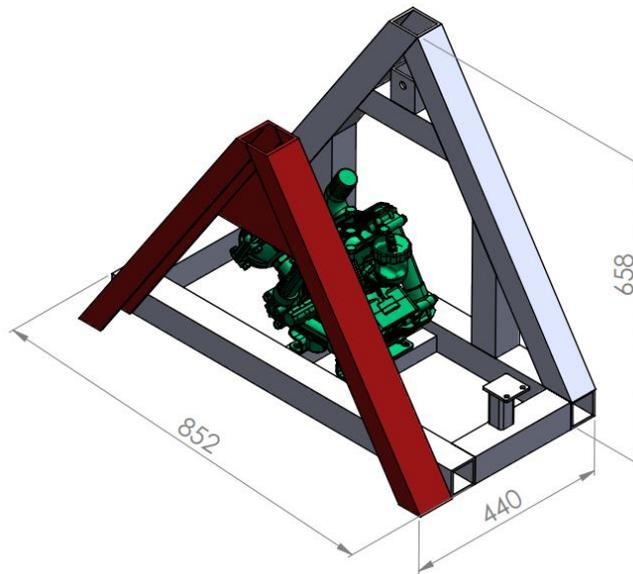


Figure 25 Dimensions de l'adaptateur triangle

Pompe amovible sur cultivateur ou vibroculteur existant

Pour les personnes qui possèdent déjà un outil de travail de sol, il est possible de souder un support pour la pompe sur leur outil, ou bien de créer un système qui permet d'attacher la pompe dessus en cas de besoin. Cette option est la plus économe en temps et en argent.

Nous n'avons pas conçu ce module là car il dépend de chaque outil. Mais la fabrication est assez simple.

11. Utilisation

Les explications complètes sur l'utilisation de l'outil sont présentées dans la notice de fabrication et d'utilisation, disponible sur ce lien : <https://www.leesu.fr/ocapi/les-projets/enville/outils-agricoles/>

11.1 Préparation du sol

Comme expliqué précédemment, le lisain doit être injecté dans le sol, recouvert après application, afin de limiter au maximum la volatilisation. Cette pratique permet également de limiter structurellement les risques sanitaires biologiques. Nous avons fait plusieurs essais, un premier avec une préparation rapide du sol et la présence de grosses mottes et un deuxième avec une préparation de sol plus importante et des mottes beaucoup plus petites.

Dans le premier cas, une partie du lisain s'est retrouvé à l'air libre car les mottes étaient trop grosses pour recouvrir correctement le sillon. L'odeur d'ammoniac nous a également indiqué qu'il y avait de la volatilisation.

Dans le second cas, nous avons pu vérifier visuellement que le sol s'est correctement refermé après le passage de l'outil. De plus, il n'y avait pas d'odeur.



Figure 26 : A gauche, utilisation de l'outil sur un sol préparé grossièrement (beaucoup de grosses mottes et de résidus) : les sillons ne se referment pas d'eux-mêmes après le passage des dents et nous avons constaté de la volatilisation (odeurs). A droite, sol préparé de façon assez fine, les sillons se refermaient d'eux-mêmes et nous avons observé peu de volatilisation (peu d'odeurs).

Pour ces essais, nous avons fertilisé au lisain juste avant de semer ou de planter afin de ne pas avoir à retravailler le sol après fertilisation. Les conditions nécessaires pour une bonne fertilisation sont sensiblement les mêmes que pour l'utilisation d'un semoir ou d'une planteuse à pomme de terre, donc nous n'avons pas eu d'étapes de préparation spécifique pour la fertilisation, ce qui était un des objectifs afin de limiter le temps de travail lié à cette fertilisation.

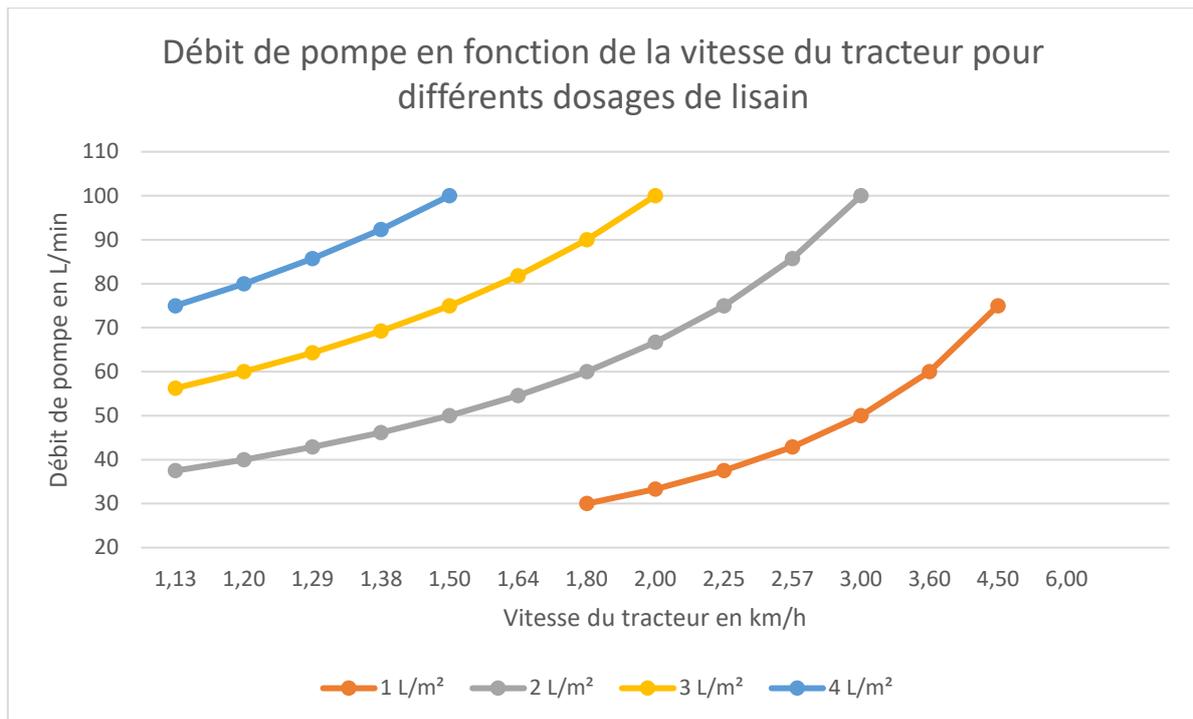
11.2. Réglages du débit d'injection du lisain

La conception et l'utilisation de cet outil est assez simple et low-tech, c'est pourquoi il n'y a pas de capteur ou régulateur automatique du débit injecté dans le sol. Il est donc nécessaire de connaître le débit de la pompe et la vitesse d'avance du tracteur pour connaître le volume de lisain injecté dans le sol.

Dans un premier temps il faut réaliser un passage à vide pour connaître la vitesse du tracteur et le temps à parcourir pour une longueur de planche. Par exemple, dans le cadre de nos tests, en vitesse « Tortue 2 » nous parcourons une planche de 50 m en 60 sec (soit 3km/h).

Pour avoir une concentration de 2 L/m² il faut donc se mettre sur un débit de pompe de 100 L/min.

Nous avons fait un abaque pour connaître le débit de la pompe (L/min) en fonction de la vitesse du tracteur (km/h), pour les différents dosages de lisain :



11.3. Fonctionnement de l’outil et flux de lisain

La première étape est de remplir de lisain la cuve embarquée, à partir du stock d’urine (cuve IBC par exemple) et grâce à la motopompe de l’outil. En ouvrant et fermant des vannes, cette même pompe va servir ensuite pour alimenter les tuyaux reliés aux dents de l’outil, pour fertiliser la planche.

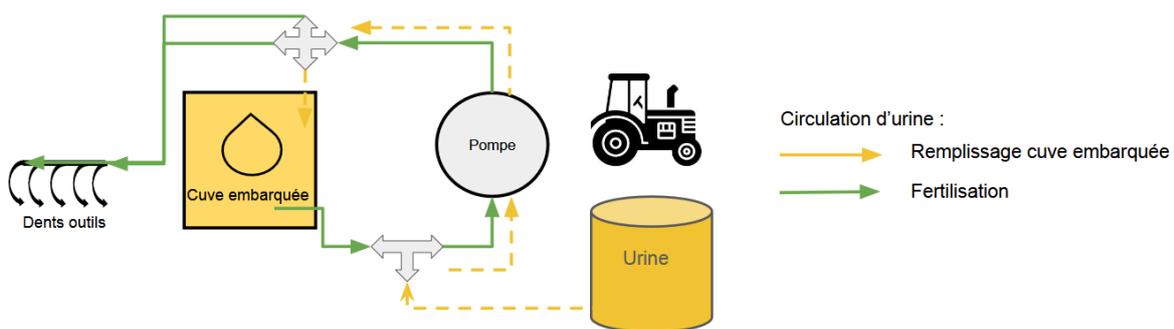


Figure 27 Schéma des flux d’urine dans le Pipiculteur

12. Coût de l’outil

Voici le coût en matériel, sans main d’œuvre ni consommables (baguettes de soudure, disques...). Le détail des pièces nécessaires est disponible sur la notice de fabrication (prix en novembre 2024).

Version avec cuve sur le châssis :

Version sans cuve sur le châssis :

Type	Prix TTC
Cardan	95,42 €
Cuve	199,00 €
Dents	60,00 €
Métal	436,90 €
Pompe	480,15 €
Quincaillerie	40,00 €
Tuyauterie - raccords	338,16 €
Total général	1 649,63 €

Type	Prix TTC
Cardan	95,42 €
Dents	60,00 €
Métal	250,78 €
Pompe	480,15 €
Quincaillerie	40,00 €
Tuyauterie - raccords	165,43 €
Total général	1 091,78 €

QUATRIEME PARTIE

Essais de fertilisation et diffusion

13. Campagne de tests 2024

13.1. Essais

En 2024 nous avons réalisé des essais simples d'injection de lisain dans le sol. Le but était avant tout de vérifier le bon fonctionnement du Pipiculteur. Ces essais ont été réalisés dans une ferme maraîchère en Ile-de-France sur des parcelles non destinées à la production de légumes pour la ferme. Il y a eu deux parcelles expérimentales, une de 50x25m (16 planches) non irriguée et une de 50x7m (4 planches) irriguée.

Il était prévu que les agriculteur.ices qui nous ont laissé la parcelle à disposition ne s'occupent pas de l'entretien des cultures. Nous avons donc choisi de faire pousser de la moutarde (aucun entretien) sur 14 planches, ainsi que des betteraves (entretien modéré) sur deux planches et des pommes de terre sur 2 planches (entretien faible).

Pour tous les essais nous avons utilisé 2 dents de vibroculteur pour injecter le lisain mais il est possible de mettre plus de dents pour répartir davantage les zones fertilisées. Il faut respecter un écartement minimum entre les dents et une bonne préparation de sol pour éviter le bourrage.

Parcelle 1 - Moutarde :

Sur cette parcelle nous sommes partis d'une prairie. Nous avons passé différents outils de travail du sol avant d'utiliser le Pipiculteur.



Figure 28 : Itinéraire technique de notre essai de moutarde

Nous avons alterné les planches avec une fertilisation à 2L/m² de lisain et les planches sans fertilisation. Nous avons ensuite semé de la moutarde blanche (variété Cabella) à la volée (sur 14 planches) avant de passer un rouleau.

Parcelle 2 – Betteraves et pommes de terre :

Cette parcelle a été préparée à l'automne 2023 par les maraîchers de la ferme (donc 6 mois avant). Nous avons fait un travail du sol simple en supplément. Nous avons commencé par les betteraves. Lors du semis nous nous sommes rendu compte que les mottes étaient un peu trop grosses, nous avons décidé de passer le rotavator avant la plantation des pommes de terre.



Figure 29 : Itinéraire technique de nos essais de pomme de terre et betterave

Pour les betteraves, nous avons fait un mélange de deux variétés, Robuschka et Formanova. Nous avons organisé deux chantiers collectifs de désherbage avec les membres du programme de recherche OCAP. Il faut noter que les adventices ont aussi profité de la fertilisation au lisain et qu'elles ont davantage poussé sur la planche fertilisée (observation visuelle).

Pour ces planches, nous n'avons pas d'informations sur les fertilisations des années précédentes.



Figure 30 : Différence de croissance sur les adventices avec et sans lisain

Pour les pommes de terre, nous avons également fait un buttage en cours de culture et un désherbage manuel. Nous avons planté ces patates assez tardivement (11 juin), nous avons donc choisi les Chéries car cette variété pousse assez rapidement.

13.2. Résultats

Moutarde

Ce test avait pour but de vérifier visuellement le bon fonctionnement du Pipiculteur et les effets sur les cultures.

Nous n'avons pas récolté la moutarde et il est prévu que cette parcelle redevienne une prairie à partir de l'année prochaine.

Sur la photo ci-dessous on peut clairement voir les effets positifs du lisain sur la croissance de la moutarde



Figure 31 : Parcelle de moutarde 3 semaines après le semis

La photo ci-dessous montre également les différences de cultures avec et sans lisain.



Figure 32 : Parcelle de moutarde 6 semaines après le semis

Pour ce test il aurait été intéressant de mesurer la zone impactée par le lisain et de la comparer à l'écartement des dents afin de connaître le nombre d'injecteurs nécessaires pour les prochains tests.

Betteraves

Nous avons récolté les betteraves fin septembre et avons pesé les récoltes sur une zone de 12m² par planches. Lors des désherbages nous avons pris soin de travailler en parallèle sur les deux planches afin que les betteraves avec et sans lisain grandissent dans les mêmes conditions.

Nous avons obtenu les résultats suivants :

	Lisain	Sans lisain
Poids moyen sur 100 betteraves	238 g	190 g
Poids total récolté sur 12m ²	44 kg	28 kg

Nous observons en moyenne un effet positif du lisain sur les betteraves mais il est difficile de conclure précisément sur cet échantillon de l'augmentation des rendements. Effectivement la betterave est une culture qui possède une grande variation de calibres sur une même planche. Sur la photo ci-dessous, on peut observer la différence entre une des plus grosses betteraves récoltées et une des plus petites. Les deux proviennent de la planche sans fertilisation. Il faudrait faire des essais sur plus de planches et plus de betteraves.



Figure 33 : Deux betteraves de la planche sans lisain

Pommes de terre

Concernant les pommes de terre, nous avons récolté des quantités très faibles, sur les planches avec et sans lisain. Cela peut être expliqué par plusieurs facteurs :

- Nous avons planté les pommes de terre assez tard dans la saison
- Il y a eu peu de désherbage pendant la saison car nous nous sommes concentrés sur les betteraves
- Il n'y a pas eu d'actions contre les doryphores
- La météo n'a pas été favorable à l'été 2024 et les agriculteur.ices qui nous ont hébergés pour nos essais ont également eu des faibles rendements
- Le sol était très humide lors de la récolte et donc nous avons utilisé la souleveuse uniquement en superficie.

Nous avons récolté 12,5 kg sur 25m² avec et sans lisain ce qui est très faible. Nous ne sommes pas en mesure de conclure sur cette culture.

13.3. Récolte et sensibilisation sur le sujet de la valorisation de l'urine

Nous n'avons pas mené d'essais agronomiques à proprement parler. Cependant l'efficacité fertilisante du lisain a déjà été prouvée dans de nombreuses publications (32, 11, 41).

Les tests que nous avons menés sont tout de même essentiels, d'une part pour vérifier le fonctionnement de la machine, et d'autre part en tant que démonstrateur. À titre d'exemple, les agriculteur.ices qui nous ont mis à disposition leur atelier de soudure et des parcelles pour faire nos tests ne souhaitaient pas forcément utiliser d'urino-fertilisant avant les essais. Après avoir vu les différents résultats (effets visuels) ils envisagent désormais d'intégrer le lisain à leurs pratiques de fertilisation.

Les betteraves et pommes de terre récoltées seront proposées à la dégustation comme support de sensibilisation à la valorisation agricole de l'urine et au cycle des nutriments. En effet, il est toujours plus ludique et impactant de pouvoir montrer, raconter voire goûter, et de savoir que la pratique existe déjà dans certaines fermes ! Par exemple, nous avons donné les légumes fertilisés au lisain aux membres de l'AMAP de la ferme qui nous a accueillis.



Figure 34: Les betteraves fertilisées au lisain ont eu plus de succès que les autres !

Les amapien.nes ont globalement été très intéressé.es par ce sujet et plusieurs personnes ont manifesté leur envie de créer un point d'apport volontaire d'urine pour leur quartier (cf. projet ENVILLE, rapport et fiches pratiques). Nous avons ensuite proposé les betteraves en libre-service en expliquant le projet aux amapien.nes de la ferme qui nous a accueillis pour nos essais. Leur engouement pour ce sujet peut se voir sur la photo ci-contre car à la fin de la distribution, il ne restait presque plus de betteraves fertilisées au lisain alors qu'il restait des betteraves non fertilisées.

Nous avons prévu de continuer cette sensibilisation auprès des autres AMAP de la ferme.

Conclusion

La conception et la fabrication du Pipiculteur nous ont permis de tester la fertilisation au lisain dans des conditions réelles de culture, sur planche maraîchère par injection dans le sol. Le développement de cet outil permet de compléter le projet Enville qui cherche à favoriser le développement de filières citoyennes. Le projet a par ailleurs déjà développé des outils et protocoles pour assurer les autres étapes de la filières (collecte à domicile, point d'apport volontaire d'urine, logistique pour acheminer l'urine sur la ferme, etc.), en collaboration avec un groupe d'habitants volontaires. Vous trouverez les détails de ces éléments sur la page dédiée au projet : <https://www.leesu.fr/ocapi/les-projets/enville/>.

Nous avons conçu cet outil pour qu'il soit low-tech, opensource, le plus simple de fabrication et d'utilisation tout en respectant trois points fondamentaux qui sont la sécurité des utilisateur.ices, la problématique de volatilisation liée à l'utilisation de lisain (= urine hygiénisée par stockage) et la bonne gestion des risques sanitaires biologiques dans une logique multi-barrière. Par souci de diffusion le plus large possible nous n'avons pas utilisé de matériel de seconde main mais il est tout à fait possible d'utiliser du matériel déjà présent sur les fermes.

Nous invitons fortement toutes les personnes intéressées à télécharger les plans de cette machine, à la construire, la modifier ou en créer d'autres. Si vous avez des questions à ce sujet, ou des idées d'amélioration vous pouvez nous contacter à : enville@enpc.fr. Aussi, nous allons prochainement éditer un site internet dédié au développement des filières citoyennes.

Enfin, nous aimerions prêter les prototypes fonctionnels afin de collecter différents retours de la part des professionnels. Ainsi, si vous souhaitez tester la machine mais n'êtes pas en mesure de fabriquer la vôtre, n'hésitez pas à nous contacter également.

Remerciements

Je remercie toutes les personnes qui ont contribué à ce projet humainement et financièrement.

Merci à Louise et Fabien d'avoir créé un poste d'ingénieur maraîcher soudeur.

Merci à la ferme qui nous à fourni un atelier et du terrain pour faire nos expérimentations ainsi qu'à toutes les personnes qui ont aidé pour les semis et entretien des cultures.

Merci particulièrement à l'équipe d'OCAP pour l'accueil et la session de désherbage.

Références

Agricultural Uses for Urine Fertilizer: Rich Earth Summit 2021. 2021.
<https://www.youtube.com/watch?v=nZqG2hdS2p8> (7 décembre 2023).

ANECO. 2024. « Le filtre à Pitribon ». https://an-eco.ch/wp-content/uploads/2024/12/Affiche_A1_Pitribon.pdf.

ARCEAU, Île-de-France. 2023. « ENJEUX RÉGLEMENTAIRES RELATIFS À LA SÉPARATION À LA SOURCE DES URINES ET MATIÈRES FÉCALES EN VUE D'UNE VALORISATION AGRICOLE ». https://www.leesu.fr/ocapi/wp-content/uploads/2023/03/NOTE-GTT-S%C3%A9paration_web_230330.pdf.

- Atlee, Jennifer. 2019. « Rich Earth Institute: Community Guide ». <https://richearthinstitute.org/urine-diversion-guide/> (4 décembre 2023).
- BERTRAND, Nathalie, Patricia BLANC, Pascal CAZIN, Céline DEBRIEU-LEVRAT, Virginie KLES, et Sophie PLANTE. 2023. *Retour d'expérience sur la gestion de l'eau lors de la sécheresse 2022*.
- Bes de Berc, Laureline, Florian Christ, Cyril Flamin, et Florent Levavasseur. 2021. *L'utilisation des digestats en agriculture - Les bonnes pratiques à mettre en oeuvre*. ENGIE, INRAE, AAMF, AgroParisTech, ATE, ACE Méthanisation.
- Billen, Gilles, Eduardo Aguilera, Rasmus Einarsson, Josette Garnier, Simone Gingrich, Bruna Grizzetti, Luis Lassaletta, Julia Le Noë, et Alberto Sanz-Cobena. 2021. « Reshaping the European Agro-Food System and Closing Its Nitrogen Cycle: The Potential of Combining Dietary Change, Agroecology, and Circularity ». *One Earth* 4(6): 839-50. doi:10.1016/j.oneear.2021.05.008.
- DESEAU, Sylvain. 2021. « L'immatriculation des véhicules agricoles ». https://paca.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Provence-Alpes-Cote_d_Azur/O2O_Inst_Paca/CA04/Documents/Actualites/Archives/2021/Immatriculation_machine.pdf.
- Eco-Dyn. *Elaboration du ferment régénérateur: mode d'emploi*. https://vernoux.org/agriculture_regenerative/Elaboration_du_ferment-regenerateur.pdf.
- Esculier, Fabien. 2018. « Le système alimentation/excrétion des territoires urbains : régimes et transitions socio-écologiques. » phdthesis. Université Paris Est. <https://hal.science/tel-01787854> (4 décembre 2023).
- Etter, Bastian, Kai M. Udert, et Teddy Gounden. 2015. *VUNA: Valorisation of Urine Nutrients. Promoting Sanitation & Nutrient Recovery through Urine Separation. Final Project Report 2015*. ETH Zurich. Report. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/107991> (4 décembre 2023).
- Fabien, ESCULIER, HOUOT Sabine, LEVAVASSEUR Florent, MARTIN Tristan, DESCHAMPS Marjolaine, AUBRY Christine, BRUN Florent, AUBIN Joël, et Projet Agrocapi. « Projet Agrocapi – Étude de filières de valorisation agricole d'urinofertilisants. Rapport final. » : 2022.
- FNAB. 2024. *Des toilettes aux champs: doit-on nourrir les sols bio avec des effluents humains? RESULTATS DE L'ENQUETE MENEES PAR LA FNAB AUPRES DE SES ADHERENTS*. <https://www.produire-bio.fr/wp-content/uploads/2024/11/RESULTATS-ENQUETE-FNAB-MONA-Excretats-2.pdf>.
- L'Atelier Paysan. 2024. « Vibroplanche ». <https://latelierpaysan.org/Vibroplanche>.
- de Looze, Renaud. 2018. *L'Urine, de l'or liquide au jardin - Guide pratique pour produire ses fruits et légumes en utilisant les urines et composts locaux*. Terran. <https://www.terran.fr/produit/71/9782359811001/l-urine-de-l-or-liquide-au-jardin> (4 décembre 2023).
- Marandet, Odile, et Fabien Esculier. 2022. *Analyse des freins et leviers à l'utilisation d'excrétats humains en agriculture biologique*.

- Martin, Tristan M. P., Fabien Esculier, Florent Levavasseur, et Sabine Houot. 2020. « Human urine-based fertilizers: A review ». *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 52(6): 890-936. doi:10.1080/10643389.2020.1838214.
- Muller, Adrian, Christian Schader, Nadia El-Hage Scialabba, Judith Brüggemann, Anne Isensee, Karl-Heinz Erb, Pete Smith, et al. 2017. « Strategies for Feeding the World More Sustainably with Organic Agriculture ». *Nature Communications* 8(1): 1290. doi:10.1038/s41467-017-01410-w.
- Nesme, Thomas, Benjamin Nowak, Christophe David, et Sylvain Pellerin. 2016. « L'Agriculture Biologique peut-elle se développer sans abandonner son principe d'écologie ? Le cas de la gestion des éléments minéraux fertilisants ». *Innovations Agronomiques*: np. doi:10.15454/1.4721176631543018E12.
- OMS. 2012. « Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excreta et des eaux ménagères. » <https://www.who.int/fr/publications-detail/9241546859>.
- Richert, Anna, Robert Gensch, et Håkan Jönsson. 2011. « Conseils Pratiques pour une Utilisation de l'Urine en Production Agricole ».
- Schreier, Ulrich. 2021. *La fissuration avec l'injection de ferments lactiques : un outil efficace au service de l'agriculture 3D*. Le Monde de l'Agriculture Régénérative. http://vernoux.org/agriculture_regenerative/La_fissuration_avec_injection_de_ferments_microbiens_un_outil_efficace_au_service_de_l_agriculture_3D.pdf.
- Starck, Thomas. 2024. « Towards a Circular Management of Nitrogen and Phosphorus in Human Excreta: Current State, Global Agricultural Potential, and Spatial Constraint in France ». phdthesis. Ecole nationale des ponts et chaussées. <https://hal.science/tel-04727806> (16 janvier 2025).
- Tandia, Cheick Tidiane. 2006. « ECOSAN en milieu scolaire, Petit Badien (Côte d'Ivoire) ». *ECOSAN Info* (n°07). https://www.susana.org/_resources/documents/default/2-1516-ecosan-info-no07-december-2006.pdf.
- 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. doi:10.2166/wst.2006.921.
- Zandee, Marijn, Bastian Etter, et Kai M. Udert. 2012. *Risk of clogging of drip-line emitters during urine fertilization through drip irrigation equipment*. https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/schwerpunkte/ewm/STUN/Drip_pdfs/Urine_Fertigation_with_Drip_Irrigation.pdf.

Crédits photos et illustrations : si non spécifié, le crédit des photos est Ocap.