HAL
open science

Rapport de deuxième année AGREV 3 DT

Clémentine Frogneux, Marc Benoit

To cite this version:

Clémentine Frogneux, Marc Benoit. Rapport de deuxième année AGREV 3 DT. AGRIVAIR (AGRIVAIR). 2019. hal-02788257

HAL Id: hal-02788257

https://hal.inrae.fr/hal-02788257v1

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Rapport de deuxième année

AGREV 3 DT

Clémentine Frogneux

Marc Benoît

Inra SAD Aster, UR 055

88500 Mirecourt

27 mai 2019

Avec la collaboration d' agrivair

Table des matières

1- L'adaptation aux dynamiques de long terme des situations de gestion. Étude de cas sur les dispositifs de gestion de la protection de la ressource d'eau minérale naturelle. 1

1.1- Introduction 1

1.2- Comment penser l'articulation entre Situations de gestion et Dispositifs de gestion dans des cas de performance souhaitée durable et de long terme ? 2

1.3- Méthodologie 4

1.4- Analyse empirique 5

1.5- Retour sur l'analyse empirique : Ce que montrent les notions d'enquête et d'intrigue

1.6- Discussion 11

1.7- Conclusion 13

1.8- Bibliographie 14

2- Modélisation stochastique des changements d'occupation du sol sur l'impluvium de Vittel-Contrexeville 16

2.1- Introduction 16

2.2- Simulation de séquences à l'aide de modèles de Markov cachés 17

2.3- HMM pour la classification spatiale : le logiciel ARPEnTAge 19

2.4- Spatialisation de la prédiction des occupations du sol 20

2.5- Résultats 21

2.6- Conclusions 23

2.7- Références 24

3- Développement du territoire 25

3.1- Les potentiels de développement des cultures énergétiques pérennes 25

3.2- Préservation des prairies permanentes dans l'impluvium de Vittel-Contrexéville par une valorisation économique accrue 27

4- Les pertes de nitrates du réseau de bougies poreuses 28

4.1- Introduction 28

4.2- Description du dispositif 28

4.3- Méthode de calcul 29

4.4- Résultats 33

4.5- Conclusion 41

4.6- Bibliographie 41

ANNEXES 42

1- L'adaptation aux dynamiques de long terme des situations de gestion. Étude de cas sur les dispositifs de gestion de la protection de la ressource d'eau minérale naturelle.

Nathalie Raulet-Croset, Marc Benoît, Hervé Dumez, Mourad Hannachi. *Avec la participation de Camille Torloni et Arnaud Gobillot*

1.1- Introduction

L'agriculture est désormais la principale source de dégradation des ressources en eau en France et la protection des nappes phréatiques en zone agricole représente un enjeu fort en matière d'environnement. Pour maîtriser ces enjeux, des acteurs se retrouvent aux prises avec des situations de gestion qui s'inscrivent dans une temporalité très longue : il faut parfois plus de 30 ans avant de voir une source amorcer une amélioration, après changement d'activités agricoles. Ces acteurs sont alors amenés à penser la conception et la mise en œuvre de dispositifs divers visant à protéger ces nappes sur le long terme.

C'est l'interaction entre situation de gestion et dispositif de gestion, dans ces temporalités longues, que nous cherchons à explorer ici. Une même situation de gestion peut-elle résister à l'usure du temps, et les dispositifs peuvent-ils contribuer à son maintien dans le temps, ou au contraire à son évolution ?

Nous proposons d'utiliser ici deux concepts qui permettent d'appréhender, chacun de manière différente, la temporalité d'une situation de gestion : celui d' « enquête », proposé par Dewey, (1938/1993) et celui d' « intrigue », qui est au centre d'un article de Quéré (1997).

Notre réflexion se base sur l'analyse d'un cas spécifique, celui de la gestion d'eau minérale naturelle de l'impluvium de Vittel-Contrexéville, dont la particularité est qu'un acteur privé (l'entreprise d'eau minérale) joue le rôle d'acteur moteur gérant la protection de la nappe d'eau qu'il exploite. Sur ce terrain, six équipes de recherche de l'INRA, du CNRS, du CEMAGREF, de l'ENSAIA ont participé à la construction d'un dispositif de gestion de protection de la nappe, à deux périodes différentes, de 1987 à 1995 tout d'abord, puis lors d'une seconde période démarrée en 2014. Ce cas nous semble particulièrement représentatif d'une situation de gestion de long terme, qui peut subir une certaine « usure » liée au temps, et cela en particulier car les acteurs moteurs et les parties prenantes peuvent être amenés à évoluer au cours du temps.

Après avoir présenté notre cadre conceptuel, nous nous attacherons à détailler notre méthodologie, et présenterons les résultats empiriques issus de l'analyse narrative du processus de long terme. Puis nous proposerons un retour sur notre analyse empirique à partir des notions d'enquête et d'intrigue. Nous discuterons ensuite ces résultats et soulignerons la spécificité du cas d'environnement ici étudié.

1.2- Comment penser l'articulation entre Situations de gestion et Dispositifs de gestion dans des cas de performance souhaitée durable et de long terme ?

Dans cette première partie, nous revenons sur la notion de temporalité, telle qu'elle peut être associée à la réflexion sur les situations de gestion et les dispositifs de gestion et présentons deux notions conceptuelles, l'enquête et l'intrigue, qui permettent de penser différemment cette temporalité.

La temporalité dans les situations de gestion et les dispositifs de gestion

L'un des apports essentiels du concept de situation de gestion, proposé par Girin (1990), est qu'il rapproche le concept de situation de la question de la performance, et le positionne dans le champ des questionnements managériaux. Dans le champ de la protection de l'eau, la « performance » consiste à rétablir ou maintenir une qualité d'eau existante, souvent sur le long terme au vu des échelles de temps habituellement constatées pour diminuer les nitrates (polluants issus du devenir des engrais en azote ou des déchets d'élevage dans la « cascade de l'azote », c'est-à-dire les sols et sous-sols) ou les pesticides. Le jugement externe est quant à lui porté par les consommateurs, avec des exigences de qualité et de taux différentes selon le type d'eau (minérale ou potable). Pour ce qui concerne l'eau minérale naturelle, l'entreprise exploitante est aussi partie prenante du jugement externe, puisque c'est elle qui fixe les objectifs de qualité de l'eau, en vue de la vente à ses clients.

La situation de gestion, telle qu'elle est pensée par les acteurs moteurs, consiste en la définition d'un problème en vue de sa prise en charge. Mais cette définition ne dit pas comment (ou du moins très partiellement) le problème peut être réglé, comment les différentes ressources vont être articulées entre elles. C'est cette articulation qui est au fondement du dispositif de gestion. Pour approfondir la notion de dispositif, nous nous référons à Foucault, qui définit un dispositif comme un ensemble d'éléments hétérogènes, discursifs, matériels, institutionnels et organisationnels, qui puise sa force dans ce qui lie ces différents éléments entre eux (Foucault, 2001 ; Dumez, 2009 ; Aggeri, 2014). La construction des dispositifs répond à la façon dont la situation de gestion est construite par l'acteur moteur (définition de l'objectif, mise en scène du jugement externe, référence à l'espace, identification des parties prenantes).

Enquête et Intrigue, deux notions différentes pour penser la temporalité

La conceptualisation de la situation de gestion comporte par nature une dimension évolutive puisque le temps de la situation est « déterminé ». Toutefois, dans les situations de gestion de très long terme, le moment où la situation de gestion va s'éteindre n'est pas visible. Or certains des éléments qui la composent (les participants, les espaces de référence, les objectifs intermédiaires, etc.) sont amenés au fil du temps à évoluer, ce qui peut entraîner une disparition de la situation de gestion initiale.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à la dynamique temporelle d'une situation, selon des angles différents. Quéré (1997) a ainsi mis en avant la notion d'« intrigue » qui caractérise la structure temporelle de la construction d'une situation en lui associant un aboutissement. Dans une perspective différente, Dewey analyse l' « enquête » qui conduit à faire passer d'une situation indéterminée (où les constituants de la situation ne tiennent pas ensemble) à une situation plus déterminée, qui pourra faire l'objet d'un traitement, mais qui n'est pas une « *fin absolue* » (Dewey, 1993 : 298, cité par Journé, 2007)[1].

[1] Encore faut-il noter que la notion d'intrigue est également bien présente chez Dewey : « *En effet, la vie n'est pas une marche ou un flot uniformes et ininterrompus. Elle est comparable à une série d'histoires, comportant chacune*

L'intrigue : une téléologie inhérente à la situation de gestion

À la notion d'intrigue est associé le sens donné à la situation, qui dépend fortement de la façon dont est envisagé le dénouement attendu.

Prenons cet extrait de Quéré (1997) :

« Mais une situation n'est pas n'importe quelle totalité temporelle. On peut dire d'elle qu'elle a une structure d'intrigue. En effet, une situation émerge quand quelque chose se noue ; son développement, qui est imprévisible, correspond alors à l'enchaînement des péripéties, des contingences et des initiatives qui conduisent à son dénouement. L'ensemble formé par ces péripéties, contingences et initiatives forme une configuration : elles sont intégrées dans une totalité où elles trouvent une unité, une identité et un sens. Une sorte de téléologie est ainsi inhérente à la situation : non seulement se crée une attente d'un point final ; mais, de plus, la résolution de la situation correspond à un aboutissement, à un achèvement qui est fonction de ce qui y a conduit. Le dénouement de la situation n'est donc pas une simple cessation ; il n'est pas non plus une conclusion séparée et indépendante ; il est l'aboutissement d'un mouvement continu, le moment où celui-ci culmine dans une résolution. » (Quéré, 1997 : 182)

On le voit, pour Quéré, la situation comporte en elle-même une forme de téléologie, c'est-à-dire qu'elle tend vers un aboutissement. Cela suppose alors une fin possible de la situation, qui peut être l'atteinte de la performance visée.

L'enquête : la ré-ouverture de la situation de gestion

Si Dewey évoque aussi le « dénouement » d'une situation, donc une forme de fin d'un processus, il propose également le concept d'enquête qui met au contraire nous semble-t-il l'accent sur l'ouverture dans le temps de la situation. En effet, l'enquête permet la construction d'un problème, au travers de la transformation d'une situation au départ indéterminée en une situation déterminée, qui puisse être « expériencée », ressentie par les acteurs, et qui donne lieu à un problème porteur d'une résolution (Journé, 2007 ; Journé et Raulet-Croset, 2008). Pour Dewey, la notion de situation permet de comprendre le processus d'enquête, dans le sens où une situation peut être ressentie comme confuse, indéterminée, ce qui déclenchera alors une enquête, pour lui donner un caractère de « tout contextuel », c'est-à-dire un ensemble d'éléments inter-reliés qui peuvent constituer un problème, et donc entraîner la recherche d'une solution.

Journé (2007) a extrait un certain nombre de citations de Dewey, analysant son approche de l'enquête : *« L'enquête est la transformation contrôlée ou dirigée d'une situation indéterminée en une situation qui est si déterminée en ses distinctions et relations constitutives qu'elle convertit les éléments de la situation originelle en un tout unifié. » (Dewey 1993 : 169, cité par Journé, 2007).*

Cette transformation est liée à la notion de problème :

« Un problème représente la transformation partielle par l'enquête d'une situation problématique en une situation déterminée (…) Découvrir ce que sont le ou les problèmes qu'une situation problématique pose à l'enquête, c'est être déjà bien avancé dans l'enquête. » (Dewey 1993 : 172-173, cité par Journé 2007).

Si la transformation de la situation indéterminée en problème marque un tournant dans la temporalité de la situation de gestion, car elle ouvre la possibilité de mise en place d'un dispositif, il nous semble que l'on peut considérer qu'il s'agit uniquement d'une étape, et que l'enquête peut être ré-ouverte,

---

une intrigue, un début et une progression vers le dénouement, chacune étant caractérisée par un rythme distinctif et marquée par une qualité unique qui l'imprègne dans son entier. » (Dewey, 2005 : 60).

en particulier si la situation redevient confuse et ambiguë, du fait que les éléments constitutifs, parce qu'ils évoluent, tiennent moins bien ensemble.

Dans cet article, nous souhaitons mettre en avant le fait que les deux notions, d'intrigue et d'enquête, conduisent à regarder différemment la dynamique d'une situation de gestion, et son lien avec la constitution et l'évolution d'un dispositif. La notion d'enquête conduit à mettre l'accent sur la dynamique d'ouverture et fermeture de la situation au cours du temps, qui tend à faire tenir ou au contraire à distendre les liens entre les éléments constitutifs. La notion d'intrigue quant à elle met l'accent sur un sens porté par la situation, en lien avec son aboutissement, son dénouement, et conduit à porter le regard sur ce qui crée cette unité de sens, et donc le maintien de la situation de gestion. Ces deux notions mettent chacune l'accent sur des visions différentes de la temporalité de la situation de gestion.

1.3- Méthodologie

Notre analyse porte sur le cas de la protection de la nappe d'eau minérale naturelle de l'impluvium de Vittel-Contrexéville. En 1986, l'entreprise exploitante de la nappe met sur la place publique la constatation d'une hausse très lente mais régulière du taux de nitrates dans la nappe d'eau qu'elle exploite, et fait le lien avec la présence d'exploitations agricoles devenues plus intensives sur l'impluvium de la nappe. Suite à cet événement déclencheur, différents acteurs sont intervenus dans la situation, à l'incitation de l'entreprise que l'on peut considérer comme un acteur moteur dans la situation de gestion de protection de la nappe d'eau.

Un retour réflexif à plusieurs voix

Nous présentons dans cette partie les éléments de méthodologie qui permettent de situer la présence sur le terrain de différents auteurs de cet article, ainsi que les modalités de recueil de données associées. Le cas Vittel a en effet été l'objet de nombreux travaux de recherche (Chia, Raulet, 1994 ; Lemery et al., 1997 ; Benoît et al*.,* 1997 ; Raulet-Croset, 1998 ; Barbier, 2008) et il apparaît comme un cas pionnier en matière de construction de dispositifs de gestion collective de protection de ressources en eau.

Plusieurs des auteurs de cet article ont pu mener des investigations à ces différents moments de présence sur le terrain, et ont engagé une analyse de l'évolution des dispositifs de gestion de la protection de la nappe d'eau au cours du temps. Pour le travail plus spécifique mené pour cet article, nous avons mené une démarche de type narratif (Dumez, 2016). Sur la base de l'analyse ex-post de notre présence sur le terrain et d'une série d'entretiens ainsi qu'une analyse documentaire à partir des nombreux articles parus sur le cas[2], nous avons identifié des étapes clés dans l'articulation entre la dynamique de la situation de gestion et celle des dispositifs de gestion de la protection de la nappe.

Eclairages sur la collecte de données

Notre présence sur le terrain a été multiple, et a suivi différents objectifs, liés en particulier aux différents programmes de recherche-action qui se sont succédé.

Lors de la première étude (qui concerne la première période, démarrant en 1987 jusqu'à 1995), les travaux ont été fondés tout à la fois sur des entretiens auprès des différentes parties prenantes à la situation de gestion, et sur une observation participante. Les parties prenantes interrogées ont

[2] Plusieurs éléments utilisés à Vittel (contrats volontaires, cahiers des charges, mise au point des instruments de mesure in situ en parcelles d'agriculteurs de la qualité de l'eau…) caractérisent les dispositifs. Ces éléments ont fait l'objet de nombreuses analyses et publications (Barbier et Chia, 2001).

notamment été : des chercheurs de l'équipe pluridisciplinaire (agronomes, pédologues, économistes, sociologues, cadres de l'entreprise d'eau minérale ; le directeur de la société Agrivair, filiale de l'entreprise et en charge de la mise en œuvre des nouvelles pratiques agricoles, a été interviewé à de multiples reprises), les responsables municipaux, des agriculteurs (ayant participé ou non au projet). L'observation participante a été menée de 1991 à 1995 par l'une des auteurs de l'article, dans le cadre de sa thèse (Raulet-Croset, 1995). Un des autres auteurs de l'article a participé en tant qu'agronome chercheur à l'INRA aux programmes AGREV 1 et AGREV 2 (Benoît et al., 1997), et donc à la construction du dispositif mis en place à partir du moment où l'INRA a été amené à intervenir, dès les premiers contacts en 1987.

Lors de la deuxième étude, menée dans le cadre d'un programme appelé « AGREV 3, 20 ans après », des chercheurs en agronomie de l'INRA (dont deux des auteurs de l'article) sont revenus sur le site, à la demande de l'entreprise d'eau minérale, et ont étudié les évolutions des pratiques des exploitants (Benoît, Gobillot, 2016). Une reconstitution du processus incluant cette nouvelle phase a également été menée (Torloni, 2016).

Le nouveau programme de recherche Agrev 3 a pour ambitions :

- Le repérage pour chaque exploitation agricole des éventuelles transmissions (successions) et des évolutions de pratiques depuis 1992. Cette phase a été réalisée par entretiens auprès de 31 agriculteurs, et par la mobilisation des relevés d'occupations des sols annuels. Les agriculteurs ont ainsi fourni des informations sur les évolutions de leurs territoires d'action (celui de leur exploitation agricole) et la manière dont les liens à ces territoires ont évolué dans le temps (répartition des parcelles, choix des successions de culture, etc.).
- L'identification des innovations agronomiques des agriculteurs, suite à des discussions collectives avec les agriculteurs sur ces pratiques innovantes, ainsi que le repérage de territoires d'action pertinents (échelle de parcelle, ou de sole, ou de facettes paysagères) pour tester des évolutions de pratiques et la mesure de leurs effets.

La démarche narrative

En lien avec les notions d'intrigue et d'enquête, nous avons cherché à reconstituer les dynamiques à l'œuvre, sous la forme de narrations (Dumez, 2016). La démarche a notamment consisté à identifier les points de basculement dans les dynamiques (*turning points*), dans la perspective de repérer les décalages d'évolution entre situation et dispositifs et les réalignements, sur la période 1987-2016. Ce travail d'analyse conduit aussi à s'interroger sur le retour des chercheurs en 2014 : s'agit-il d'une évolution du dispositif, ou de la situation de gestion ? Quels sont les enseignements de la dynamique de long terme analysée pour mettre en perspective ce retour ?

1.4- Analyse empirique

L'analyse empirique s'attache, dans une démarche narrative, à repérer les changements de dispositifs et de situations de gestion s'il y a lieu.

Un premier dispositif fondé sur l'achat de terres, en réponse à une première situation qui a pour finalité la suppression immédiate de la source de nitrates excédentaires

Un premier dispositif, construit entre 1986 et 1988, est relié à l'achat de terres par l'entreprise. En effet, l'une des premières réponses explorées par l'entreprise suite à la constatation de la hausse du taux de nitrates a été l'achat de terres disponibles, avec l'accord de la SAFER qui gère le foncier agricole. L'objectif était d'imposer sur les terres des pratiques immédiatement non polluantes. Pour

ce faire, les dirigeants de l'entreprise ont rétrocédé ces terres à certains agriculteurs, à qui ils ont demandé d'appliquer sur ces terres des « mesures conservatoires », proposées par l'INRA dans l'attente de recherches plus approfondies sur les pratiques agricoles et la circulation de l'eau. On peut donc analyser l'achat de terres couplé aux mesures conservatoires comme une réponse à la situation de gestion. Toutefois, une quantité restreinte de terres a pu être ainsi acquise, et le problème de l'exploitation des terres s'est vite posé.

La construction d'un second dispositif, en réponse à une évolution de la situation de gestion centrée sur l'évolution des pratiques agricoles

Avec la prise d'ampleur des équipes de recherche dans la situation de gestion en 1989, il nous a semblé pouvoir identifier un point de basculement, avec tout à la fois un changement dans les composantes de la situation, et dans la finalité envisagée. Il s'agit de faire évoluer les connaissances sur les pratiques agricoles, afin de proposer des évolutions de pratiques qui permettent la protection de la nappe d'eau. Cette recherche-action participe à construire progressivement sur la période 1989-1992 un second dispositif qui peut être décrit de la façon suivante :

- Un suivi scientifique des relations entre l'évolution de l'agriculture du bassin et son effet sur les ressources en eau, grâce à 19 sites à bougies poreuses (i.e. des outils de mesure des nitrates) implantés dans les parcelles des agriculteurs de l'impluvium, ainsi que des suivis des parcelles et des eaux de surface. Ces bougies poreuses sont enterrées sous terre pour ne pas gêner les travaux culturaux et les pâtures par les troupeaux[3].
- Un cahier des charges, proposé par l'entreprise aux agriculteurs, dérivé du cahier des propositions construit par les équipes de recherche ;
- La création en 1992 d'une petite société anonyme Agrivair qui gère, pour les agriculteurs volontaires, l'application du cahier des charges, et en particulier les flux d'azote organiques : compostage des fumiers, épandage des déjections animales, réduction du chargement animal au pâturage, introduction de successions de culture basées sur la luzerne, arrêt des pesticides.
- La signature par les agriculteurs d'un contrat avec Agrivair, dès 1992, qui les engage dans une gestion nouvelle de leurs exploitations suivant le cahier des charges en échange de compensations financières, et d'investissements dans les exploitations (par exemple, il était précisé que toute construction de bâtiment neuf nécessitée par le changement d'agriculture serait pris en charge par l'entreprise).

Le dispositif est ainsi constitué de certains acteurs partie prenantes, dont en particulier les chercheurs, l'entreprise Agrivair filiale de la société d'eau minérale, et certains agriculteurs ; d'outillage comme les machines de compostage et les bougies poreuses ; de connaissances techniques et scientifiques pour aller vers une agriculture plus protectrice pour la nappe ; ou encore d'écrits comme le cahier des charges. Ce dispositif est stabilisé en 1992, et le deuxième contrat de recherche entre l'entreprise et les chercheurs de l'INRA, qui correspond à la période 1992-1995, est en réalité une poursuite tout à la fois de la situation de gestion qui vise la même finalité, et s'appuie sur les mêmes composantes. Une fois ce deuxième contrat achevé, les chercheurs n'ont plus été présents sur le terrain car comme l'explique un des chercheurs : *« le problème était considéré comme définitivement résolu ».*

Le retour de l'équipe de l'INRA en 2014

[3] Le suivi scientifique est réalisé sur dix ans, de 1987 à 1997. Les mesures mettront en évidence la nette baisse des teneurs en nitrate des eaux sous-racinaires et dans les eaux des aquifères superficiels, ce qui conduira à valider les changements intervenus dans les pratiques agricoles.

Lorsqu'une des équipes de recherche de l'INRA revient sur le terrain en 2014, les chercheurs constatent que depuis 1992, date de conception du premier cahier des propositions par les chercheurs et du premier cahier des charges par Agrivair, la situation de gestion a vécu plusieurs événements majeurs, qui touchent à certaines de ses composantes. Toutefois, elle semble avoir conservé une orientation proche de celle de 1992. Le dispositif lui aussi semble avoir conservé une stabilité apparente, mais nous montrerons qu'il s'est en réalité fortement adapté.

La situation de gestion et ses évolutions

La situation de gestion, au travers des acteurs participant, a fortement évolué quant aux personnes, mais les parties prenantes principales sont restées identiques. Ainsi, les agriculteurs ont changé. Certains ont pris leur retraite, une nouvelle génération est arrivée. Des parcelles ont été vendues, il y a eu installation de nouvelles exploitations. Globalement, le nombre d'agriculteurs a diminué car les exploitations ont grandi (ils sont passés de 27 à 18 exploitations sur le plateau lui-même, mais se sont ajoutés des agriculteurs sur le plateau voisin de Contrexéville). Leurs pratiques ont également évolué. Ainsi par exemple ils veulent beaucoup moins de pâturage, car certains ont installé des robots de traite. Ce sera d'ailleurs un point compliqué du point de vue des chercheurs : « *laisser des exploitations agricoles installer des robots de traite qui interdisent le pâturage, dans ce genre de lieu ce n'est pas possible. Je ne peux pas faire de l'eau à faible teneur en nitrate sans herbe, je suis désolé.* » (chercheur pilote)

Le nouveau directeur d'Agrivair a été à l'origine du retour des chercheurs. Les membres d'Agrivair ont collaboré avec l'équipe de recherche, en participant à la mise en place des dispositifs de suivi des relations « systèmes de culture-sols-eau-qualité des eaux », et en faisant part de leurs données de suivi concernant les pratiques sur l'ensemble du territoire (évolution des assolements, découpages parcellaires annuels, successions de culture). Pour ce qui est de l'entreprise d'eau minérale, on peut également noter des changements dans les personnes en charge du problème. En 1987, les chercheurs étaient en lien avec le directeur général de l'entreprise et le responsable de la production (du laboratoire de suivi de la qualité de l'eau), qui ont ensuite créé la filiale Agrivair pour la mise en œuvre du cahier des charges. Entretemps, le groupe Nestlé en 1992 est devenu propriétaire de l'entreprise, et une unité nommée Product Technology Center a été créée, en charge de l'innovation tout à la fois sur les bouteilles et de la préservation de la qualité de l'eau. C'est en lien avec des salariés de ce centre technologique que les chercheurs vont travailler dans le nouveau projet, en particulier sur la dimension hydrogéologique.

Un autre changement porte sur les filières agricoles. Ainsi, les comportements de notre société à l'égard de l'agriculture biologique, très développée sur ce territoire depuis 25 ans, se sont modifiés, de nouvelles filières de production sont apparues, comme les filières énergétiques par l'agriculture. L'équipe de recherche anticipe également d'autres évolutions, comme l'arrêt des quotas laitiers, pour deux ans plus tard en 2016, suite à la dernière réforme de la PAC (Politique Agricole Commune). Cet arrêt induira d'ailleurs des évolutions fortes suite à la baisse marquée des prix d'achat du lait aux producteurs. Ainsi, le maintien de surfaces en prairies permanentes, très protectrices des ressources en eau, nécessitera de nouvelles adaptations du cahier des charges proposé aux agriculteurs. Il existe également des opportunités nouvelles liées aux ressources énergétiques à biomasse (par exemple les biomasses sous forme de copeaux, issues des haies actuelles (49 km ont été implantés en 20 ans), et de futures parcelles dédiées (noisetiers, …)).

On note également des changements liés aux territoires de référence. Tout d'abord, l'entreprise a décidé d'étendre le dispositif aux agriculteurs sur l'impluvium de Contrexéville, construisant ainsi un impluvium contigu de 6200 ha de terrains agricoles (10400 ha de surface totale). Cette décision a été

prise lors du rachat de l'entreprise par le groupe Nestlé. Cela a augmenté de facto l'activité d'Agrivair qui a dû fournir des services aux agriculteurs sur un territoire beaucoup plus grand. Agrivair a d'ailleurs embauché, puisque l'entreprise compte en 2014 un directeur, un ingénieur, deux agronomes en apprentissage et 11 techniciens (contre 1 directeur et 1 technicien à sa création). Les territoires de référence pour les agriculteurs se sont également modifiés. Comme l'explique le chercheur agronome présent lors des différentes recherches : *« à l'époque, les agriculteurs avaient quasiment tous la totalité de leur exploitation sur l'impluvium. Il y en avait peut-être deux qui avaient 4 ou 5 ha à l'extérieur. Alors que maintenant, ils ont presque tous la moitié de leur exploitation à l'extérieur. (…) Donc il y a une question typiquement nouvelle, qui est l'incroyable changement des territoires d'exploitation par rapport à un impluvium qui ne change … qu'à une vitesse géologique… » (chercheur INRA, pilote du projet)*.

Sur le plan du cadrage général, la situation de gestion conserve toutefois la même orientation. Ainsi, l'objectif visé d'atteindre une performance quant à la qualité de l'eau en jouant sur l'adaptation des pratiques agricoles est resté le même. Et des éléments forts de la situation de gestion sont restés stables : les limites des impluviums, le rapport au territoire, l'enjeu des prairies.

Le dispositif

Le dispositif, mis en place en 1992, semble aussi avoir perduré dans ses grandes lignes. La société Agrivair est toujours au cœur de son fonctionnement. Les pratiques identifiées dans le cahier des charges sont globalement suivies. Toutefois, si l'on regarde finement, le dispositif a lui-même connu des adaptations. Toutes les négociations entre les agriculteurs et Agrivair se fondent maintenant sur la recherche de solutions spécifiques pour chacune des exploitations, et non sur une application standard d'un cahier des charges commun. Dans la nouvelle configuration, à titre d'exemple, on peut citer le cas des bâtiments de séchage des foins en grange qui, pour compenser la fin de la culture du maïs fourrage, sont proposés uniquement à ceux dont les stocks fourragers les nécessitent. .

Les chercheurs constatent également que certaines des propositions faites par l'INRA vingt ans avant, et incluses dans le cahier des charges ne sont plus réellement appliquées. Ainsi il était conseillé de mettre en œuvre une rotation à base de luzerne suivie de deux céréales puis deux prairies temporaires, puis deux céréales. L'un d'eux constate : *« Quand j'ai quitté le plateau en 1995, il y avait 450 ha de luzerne cultivés, quand je l'ai retrouvé il y avait 3 ha de luzerne seulement. Donc c'était une proposition qui au départ a été beaucoup mise en œuvre par les agriculteurs, au moment de la phase de changement, mais beaucoup moins ensuite »*.

Le nouveau projet de recherche de l'INRA

Le démarrage d'un nouveau projet de recherche va-t-il conduire à une nouvelle situation de gestion, ou bien au contraire pérenniser la situation de gestion et son cadrage existant ? On peut à ce stade proposer quelques éléments de réflexion. Il semble tout d'abord que le projet des chercheurs ait évolué, du fait bien sûr de l'évolution globale des connaissances sur le sujet. La réflexion, pionnière à l'époque, s'inscrit maintenant dans une problématique beaucoup plus générale de réflexion sur la protection de la qualité des eaux, et d'une volonté de mettre en place un système adaptable : il s'agit de concevoir « *un dispositif qui doit permettre d'être en permanence en pilotage de la modification du cahier des propositions : on mesure, on regarde, on adapte. » (chercheur pilote)*

Bien évidemment, l'équipe de recherche n'est plus constituée des mêmes chercheurs, bien que le pilote du nouveau projet ait quant à lui été déjà présent lors des deux contrats de recherche. Il exprime le sentiment que l'objectif est différent dans la mesure où l'objectif de durabilité du dispositif est intégré. Il considère qu'il faut « *reprendre y compris certaines modalités du cahier des charges* », et

cela dans l'objectif de « *faire survivre une transition agro-écologique* », autrement dit s'intéresser à la résilience sur le temps très long du dispositif mis en place. Mais l'équipe ne remet pas en cause l'idée de travailler sur les pratiques, ni que cela puisse s'inscrire dans un cahier des charges. Les sites à bougies poreuses, installés lors du premier programme de recherche, sont de nouveau validés comme mode de jugement externe, et de nouvelles bougies poreuses sont mises en place. Leur rôle est cependant nouveau car elles ont pour objectif de comparer les performances de systèmes de culture issus du cahier des charges et des systèmes de culture innovants proposés par les agriculteurs et suivis par les chercheurs.

Ainsi, en 2014, il semble que des composantes importantes de la situation de gestion aient évolué : les acteurs participants, les territoires de référence par exemple, ainsi que le nouvel objectif de la recherche, celui d'une finalité encore plus durable dans le temps long quant aux évolutions de pratiques proposées. Mais des éléments de sens partagé demeurent, comme le fait de continuer à s'intéresser aux évolutions des pratiques agricoles, de maintenir une forte activité de mesure in situ, ou de s'appuyer sur le lien fort au territoire de vie qu'ont développé les différents protagonistes.

Les notions d'enquête et d'intrigue permettent d'éclairer ces dynamiques temporelles.

1.5- Retour sur l'analyse empirique : Ce que montrent les notions d'enquête et d'intrigue

L'enquête

La notion d'enquête permet de mettre l'accent sur le caractère indéterminé de la situation, et le passage à une situation problématique porteuse d'une vision du problème. Elle met également en avant la présence d'acteurs moteurs qui lancent l'enquête. Le cas fait en effet apparaître la construction progressive de la situation du point de vue de l'entreprise d'eau minérale qui prend implicitement la responsabilité du portage de la situation.

Notre analyse narrative nous a conduit à identifier deux moments clés dans le processus d'enquête (Cf. figure 1). Un premier cycle d'enquête aboutit au premier dispositif : l'achat de terres et l'application sur ces terres de pratiques agricoles dites « conservatoires ». Ensuite, la situation redevient confuse, suite aux réactions des agriculteurs face à ces achats de terre. Un nouveau cycle d'enquête démarre, qui aboutit au dispositif stabilisé en 1992 autour du cahier des charges des « bonnes pratiques agricoles ». En 1992, la situation de gestion est différente de celle de 1988, en particulier car la Recherche est devenue un acteur central, à l'origine de propositions scientifiques. Puis, une fois le dispositif construit autour du cahier des charges a été mis en place, les chercheurs ne sont plus présents dans la situation, mais cette dernière reste stable grâce au dispositif construit collectivement.

En 2014, le retour de chercheurs de l'INRA peut être analysé comme une réouverture de la situation de gestion, avec un nouveau cycle d'enquête qui s'ouvre. On peut identifier plusieurs changements dans les composantes de la situation :

- Le retour de l'acteur chercheurs, qui porte un objectif de durabilité de la protection de l'eau, et apporte aussi les évolutions en termes de connaissances sur le sujet ;
- Des changements au niveau des agriculteurs tels que décrits précédemment (nouvelles générations, changements dans les exploitations)
- Et des changements au niveau du territoire (évolutions de la surface et des fonctionnements des exploitations agricoles ; extension à l'impluvium de Contrexéville notamment).

Ces changements dans le contexte économique, technique et foncier, ont réintroduit une certaine confusion dans la situation, et des questions se posent sur la durabilité du dispositif. S'agit-il alors de réajuster, adapter le dispositif tout en maintenant la situation de gestion ? Ou bien de faire évoluer et le dispositif, et la situation de gestion ? La notion d'enquête met l'accent sur cette confusion, et interroge sur l'évolution possible vers une nouvelle situation de gestion.

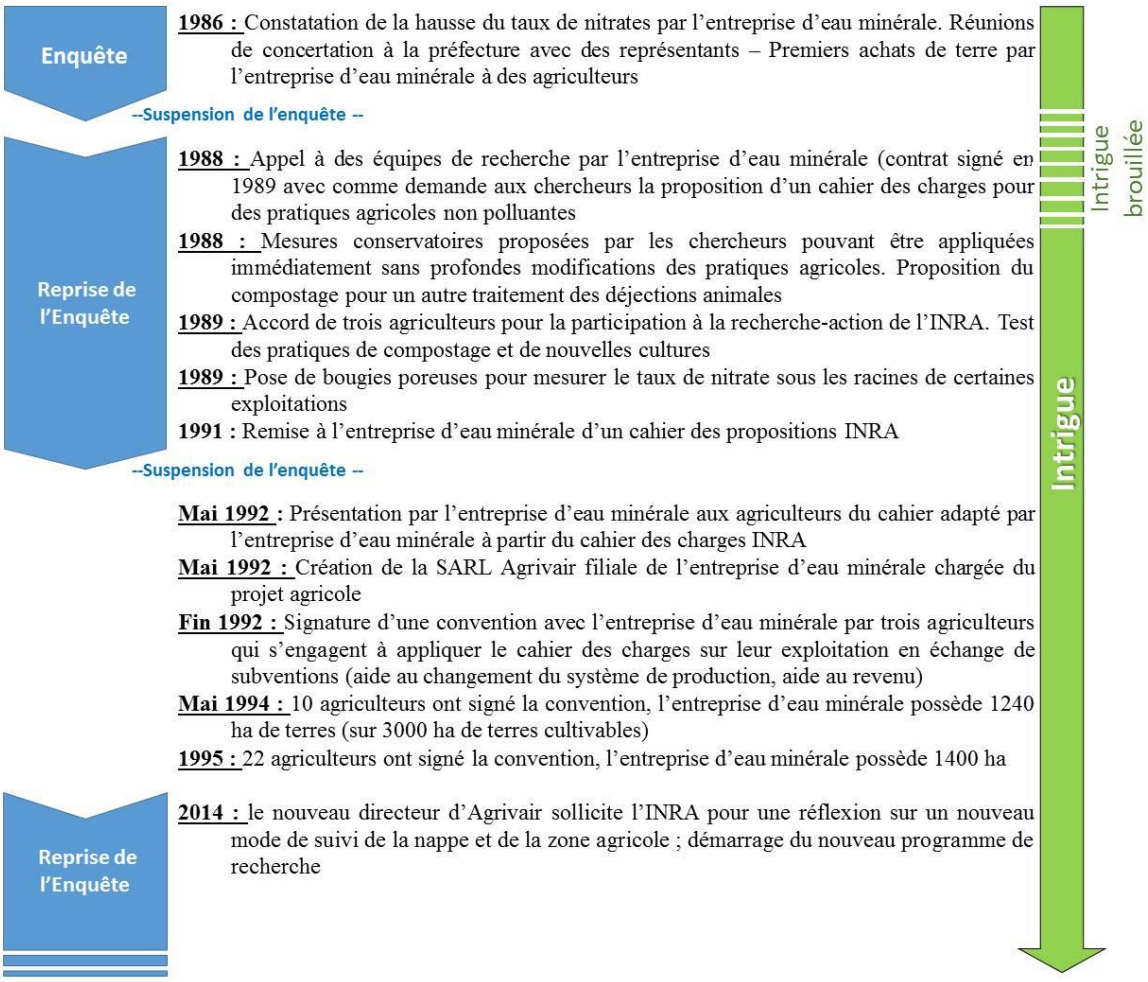
Toutefois, au côté de la notion d'enquête, qui met en avant des cycles de passage d'une situation confuse à une situation problématique, il nous semble intéressant de mobiliser la notion d' « intrigue » de la situation de gestion, pour approfondir la stabilité de la situation de gestion et ses conséquences sur les dispositifs qui lui sont liés.

L'intrigue

Sur une échelle de temps très longue, même si les acteurs et certains problèmes changent, il peut exister une continuité. On peut en effet considérer que la situation s'est inscrite, à partir de 1989, dans une même unité de sens, qui en a assuré la continuité, une unité dans le flux temporel. Lorsque les chercheurs de l'INRA reviennent dans la situation de gestion en 2014, l'intrigue semble encore celle de 1989, avec toutefois certaines nuances. L'accent est mis sur la participation des agriculteurs, sur l'innovation, et de manière appuyée sur la contribution collective à la préservation du territoire. Plusieurs questions se posent alors : comment la situation se maintient-elle, par qui et comment est-elle maintenue ? Est-ce l'intrigue qui crée ce maintien, en participant à redéfinir les identités des acteurs de manière qu'elles lui soient toujours liées (dans notre cas en lien toujours avec la volonté de protection de la nappe) ? Ou sont-ce des éléments de la situation de gestion, comme la vision du territoire, qui par leur durabilité permettent de créer une telle continuité ? Ou bien encore l'acteur moteur, ou le dispositif associé à la situation de gestion et qui s'est maintenu dans le temps, créent-ils cette continuité ?

Une réflexion plus approfondie sur l'unicité et la continuité dans le temps de la situation de gestion permet de mieux comprendre comment on peut tout à la fois permettre l'évolution de la situation de gestion, sans perdre sa continuité, c'est-à-dire sans perdre le sens qui lui est attaché, ici la protection collective de la nappe d'eau, dans une visée de changement des pratiques agricoles. Deux éléments qui orientent « téléologiquement » la situation de gestion, conduisent à considérer que la situation de gestion et le dispositif restent dans une continuité : le collectif d'acteurs identifié, et le rapport au territoire, qui ont caractérisé l'intrigue dans la situation de gestion telle qu'elle a été construite à l'initiative de l'entreprise d'eau minérale sur la période (1988-1992). En outre, l'acteur moteur reste l'entreprise d'eau minérale qui porte l'idée d'une protection à travers un changement de pratiques.

Figure 1 : chronologie des évènements au prisme de l'enquête et de l'intrigue



1.6- Discussion

Dans cette discussion nous revenons sur la question des temporalités, et soulignons la spécificité du cas d'environnement que nous avons mobilisé pour cette étude. Nous positionnons également ses apports pour la littérature sur les dispositifs de gestion de l'eau.

Adapter les dispositifs, un moyen de conserver l'intrigue de la situation de gestion ?

En matière d'environnement, le temps est tellement long que les situations de gestions se détruisent sous l'effet de changements exogènes et de la disparition ou de l'évolution profonde des acteurs. Or, le problème demeure.

Peut-on parler d'une même situation de gestion ? Ou s'agit-il d'une situation de gestion qui est redéfinie ? En effet, dans une situation de gestion classique, dans une entreprise, l'échelle de temps est généralement courte. Les acteurs ont une identité assez bien définie. En revanche, dans une échelle de temps aussi longue telle que décrite ici, il devient difficile de parler des mêmes acteurs : les agriculteurs ont changé, leur environnement économique et institutionnel s'est modifié, ce qui a fait évoluer leurs identités. Ainsi, les chercheurs ont en partie changé ; la structure Agrivair est toujours là, mais avec d'autres membres ; et l'organisation interne de l'entreprise exploitante a également évolué,

avec un nouveau département en interne chargé de l'innovation. Les acteurs, au sens institutionnel du terme, sont donc toujours là. Mais les personnes ont évolué, les connaissances et compétences ne sont plus les mêmes. On peut se demander si la situation ne se stabilise pas en imposant aux acteurs, qui ont changé mais qui participent peu ou prou à la même situation, les identités des uns et des autres, et surtout le projet porté par le dispositif (ici un projet commun de territoire). Le territoire commun semble très structurant. De fait, même si les agriculteurs en particulier changent, ils restent des agriculteurs dont l'identité est structurée par le fait que leur activité se déroule sur l'impluvium, et s'intègrent dans un projet collectif, dans le cadre d'une collaboration avec l'INRA et Agrivair. Ce rapport au territoire marque alors l'intrigue, et contribue à donner un sens partagé à la situation.

De manière générale, quand on réfléchit à des situations de gestion d'environnement de long terme, on peut penser qu'inéluctablement, des éléments exogènes lourds vont déstabiliser une situation de gestion lorsqu'elle se déploie sur le temps long. Alors que le temps érode la situation de gestion, certains acteurs la maintiennent, la recréent. Ainsi, en même temps qu'ils sont *dans* la situation, les acteurs *entretiennent* la situation, la *maintiennent*. Dans le temps court, la situation est structurante ; dans le temps infini des situations de gestion environnementale, la situation est structurante et structurée.

La spécificité d'un dispositif piloté par des acteurs privés

Les dispositifs de gestion de la pollution agricole de l'eau sont largement étudiés dans la littérature. Le plus souvent, ces dispositifs sont analysés dans le cadre de l'action publique et concernent l'eau potable (Salles, 2009 ; Busca, 2010 ; Daniel et Salles, 2012). Dans notre cas, le dispositif est mis en place et piloté par un acteur privé. L'examen de nos résultats à l'aune de cette littérature nous permet d'identifier des similitudes mais aussi des spécificités.

Autour des questions de gestion de l'eau, la mise en place des instruments d'action publique est généralement soumise à un travail de négociation visant à transformer des contraintes environnementales en opportunités productives (Busca, 2010). Les agriculteurs sont plus ou moins associés à la définition des enjeux, très fréquemment en aval de ces dispositifs publics, et dans une logique de réparation consistant à renégocier à la baisse les objectifs environnementaux (Busca, 2010). Ces dispositifs publics volontaires visent à générer un processus de responsabilisation individuelle des agriculteurs mais ils engendrent autant de vocations « environnementales » chez certains agriculteurs que de comportements « éco-opportunistes » chez d'autres (Busca et al., 1999 ; Salles, 2009 ; Busca, 2010).

Dans notre cas de dispositif privé, les acteurs s'engagent pour un objectif bien au-delà des seuils de potabilité de l'eau. Ils ne visent pas un objectif minimum mais essayent d'avoir la meilleure qualité possible pour l'eau minérale naturelle de la société exploitant les sources. L'enjeu pour les agriculteurs ne se limite pas à des obligations contractuelles ou des intérêts individuels directs. Il concerne aussi des intérêts collectifs qui les touchent indirectement. L'entreprise et son usine représentent le principal employeur de la région et les agriculteurs se trouvent enracinés dans un tissu social et économique composé de salariés de l'entreprise dont l'activité dépend de la ressource eau en sous-sol. Par ailleurs le nom de l'eau minérale produite est le nom du territoire dans lequel vivent les agriculteurs, ce qui fait que la qualité de l'eau véhicule aussi des logiques d'appartenance et des phénomènes identitaires. Pour toutes ces raisons, beaucoup parmi les agriculteurs adhèrent à la défense d'un projet qui dépasse la question de la préservation de l'environnement écologique ou des intérêts individuels.

Que ce soit dans le cas des démarches publiques ou privées, le lien au territoire et l'intégration de ses spécificités restent d'une importance majeure pour la compréhension des dynamiques locales et de la construction sociale sous-jacente. Dans le cas de l'action publique, les années 90 ont ouvert la voie à un processus de territorialisation des dispositifs agro-environnementaux, contribuant à une diversification des instruments d'action publique (Salles, 2009 ; Daniel, Salles, 2012). Dans le cas analysé ici, les acteurs locaux ont développé des innovations techniques (ex. les bougies poreuses enterrées in situ) et institutionnelles (ex. la création d'Agrivair) pour mettre en place un dispositif de gestion adapté à leur territoire.

Toutefois, la question de l'usure du dispositif est centrale quand le pas de temps est très long. Nous mettons en évidence un point novateur au regard de la littérature qui permet de mieux comprendre les processus d'évolution des dispositifs face à des évolutions des situations de gestion : les dispositifs se mettent en place, disparaissent ou se renouvellent, via des processus d'enquêtes et des intrigues. Ici un acteur privé contrôle ce processus de déclenchement d'enquête et de construction de l'intrigue ; ce processus est probablement rendu plus facile parce que l'acteur est privé et qu'il a un intérêt qu'il défend avec force et constance dans le temps – l'image de la qualité de l'eau qu'il vend. Dans le cas des politiques publiques, les intérêts sont plus flous et plus contradictoires, ce qui peut rendre plus compliquée la gestion des temporalités. Mais tous sont maintenant confrontés au temps des ressources, leur protection se doit d'être permanente, le temps du processus de protection est désormais infini.

1.7- Conclusion

A l'instar de nombre de situations de gestion environnementales, la gestion de l'eau se fait sur une échelle de temps long, voire plus précisément, de temps infini. Pouvoir considérer ce pas de temps nous permet d'apporter un regard original sur la construction des situations de gestion et leur plus ou moins grande stabilité, ainsi que sur la façon dont des dispositifs vont interagir avec la situation de gestion, soit accompagner son changement, soit soutenir sa pérennité.

Dans ce texte, nous avons mobilisé les notions d'enquête et d'intrigue, pour analyser : 1) à travers l'enquête la dynamique d'évolution d'une situation de gestion qui conduit à passer d'une situation confuse à une situation problématique, et à ouvrir à l'évolution des composantes quand la situation est à nouveau confuse ; 2) et à travers l'intrigue cette dynamique en termes d'unité de sens.

Cet apport sur le lien entre situation de gestion et dispositif de gestion apparait spécifique aux situations de gestion de long terme, telles que les situations de gestion environnementales où le rapport au temps existe mais est distendu du fait du temps de réaction des systèmes socio-écologiques impliquant à fois des processus humains et des processus naturels.

En termes de management du dispositif, cela peut ouvrir en prolongement à plusieurs questions. Comment l'acteur ou les acteurs en charge du dispositif peuvent-ils participer à la construction de ces temporalités, et cela pour adapter le dispositif aux évolutions de la situation de gestion ou à la volonté d'en maintenir le sens profond ? Assurer une continuité de la situation de gestion, tout en permettant ses évolutions, permet-il de maintenir le sens partagé par les différents acteurs, et de soutenir l'action collective ? Quels sont les facteurs, au-delà de l'adaptation des dispositifs, qui permettent de maintenir l'intrigue de la situation de gestion sur le long terme, et en particulier le rôle de l'acteur moteur et le lien au territoire sont-ils structurants ? Des investigations plus approfondies, et l'analyse d'autres cas d'interaction entre situations de gestion et dispositifs de gestion nous semblent une piste intéressante pour creuser ces questionnements, et donner des pistes d'action dans le cas des situations de gestion de très long terme.

1.8- Bibliographie

Aggeri F., 2014, « Qu'est-ce qu'un dispositif stratégique ? Eléments théoriques, méthodologiques et empiriques ». Le Libellio d'Aegis, vol 10, n°1, pp.47-64

Barbier M., Chia E., 2001. « Negotiated agreements on groundwater quality management: a case study of a private contractual framework for sustainable farming practices ». In Agricultural Use of Groundwater, pp. 195-212. Springer.

Barbier M., 2008. «Bottling water, greening farmers: the socio-technical and managerial construction of a 'dispositif' for underground water quality protection », IJARGE, *7*(1-2), pp. 174-197.

Benoît M., Gobillot A., 2016. «Nitrogen use efficiency within the Vittel mineral watersheds of: a participatory investigation to set up the best management practice at different scale ». 19th Nitrogen Workshop. Sweden 27 June.

Benoît M., Deffontaines J-P., Gras F., Bienaimé E., Riela-Cosserat R., 1997. « Agriculture et qualité de l'eau. Une approche interdisciplinaire de la pollution par les nitrates d'un bassin d'alimentation. » CERFA, 6(2), pp. 97-105.

Busca D., 2010, L'action publique agri-environnementale. La mise en œuvre négociée des dispositifs, Paris, L'Harmattan

Busca D., Salles D., Zélem MC., 1999, Les agriculteurs face aux dispositifs de gestion de l'eau, Rapport CERTOP-UTM-ECOBAG.

Chia E., Raulet N., 1994. « Agriculture et qualité de l'eau : négociation et rôle de la recherche. Le cas du programme AGREV ». Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement, 28, pp. 177-193.

Daniel F.J., Salles D., 2012, « L'agriculture à l'épreuve de l'environnement » *in* Barbier R., Boudes P., Bozonnet J.P., Candau J., Dobré M., Lewis N., Rudolf F. (dir.), Manuel de sociologie de l'environnement, Lyon, PUL, pp. 177-188.

Dewey J., 1938, Logic: The Theory of Inquiry, New York, Henry Holt and Company.

Dewey J., 1993, Logique. La théorie de l'enquête, (première édition 1938), Paris : PUF.

Dewey J., 2005, Œuvres philosophiques, Tome III. L'art comme expérience., éditions Farrago.

Dumez H., 2009. « Qu'est-ce qu'un dispositif ? Agamben, Foucault et Irénée de Lyon dans leurs rapports avec la gestion », Le libellio d'Aegis, vol. 5, n°3, automne, pp. 34-39

Dumez H., 2016. Méthodologie de la recherche qualitative : Les questions clés de la démarche compréhensive. Paris, Vuibert.

Foucault, M., 2001. Dits et écrits, tome II. 1976-1988. Paris, Quarto/Gallimard, pp. 298-329

Girin J., 1990, « L'analyse empirique des situations de gestion : éléments de théorie et de méthode », in Martinet, A.-C. (Ed.), Epistémologies et Sciences de Gestion, Paris: Economica, pp. 141-182

Journé B., Raulet-Croset N., 2008, « Le concept de situation : contribution à l'analyse de l'activité managériale dans un contexte d'ambiguïté et d'incertitude », *M@n@gement*, vol. 11, n° 1, pp. 27-55

Journé B., 2007, «Théorie pragmatiste de l'enquête et construction du sens des situations », Le Libellio d'Aegis, vol. 3, n° 4, novembre, pp. 3-9

Lemery B., Barbier M., Chia E., 1997, « Une recherche-action en pratique : entre production d'eau minérale et agriculture ». Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement, n° 30, pp. 71-89

Quéré L., 1997, « La situation toujours négligée ? » *Réseaux*, vol. 15, n°85, pp. 163-192.

Raulet-Croset N., 1995, Du conflit à la coopération: un processus de structuration. Le cas de la protection d'une nappe d'eau minérale vis-à-vis de pratiques agricoles. Thèse de Sciences de Gestion, Université Paris Dauphine.

Raulet-Croset N., 1998. « Du conflit à la coopération autour d'un problème d'environnement - Une première étape, la construction d'un cadrage », Gérer et Comprendre, n°51, pp. 4-14
Salles D., 2009, « Environnement : la gouvernance par la responsabilité? » revue VertigO, Hors-Série n°6.

Torloni C., 2016, Etude de l'action collective pour la gestion de la pollution de l'eau dans les territoires agricoles, Mémoire de stage de Master 2, Ecole des Mines Albi-Carmaux, 87 pages.

2- Modélisation stochastique des changements d'occupation du sol sur l'impluvium de Vittel-Contrexeville

Jean-François Mari (LORIA Nancy), Arnaud Gobillot (Inra, Aster, Mirecourt), Marc Benoit (Inra, Aster, Mirecourt)

2.1- Introduction

L'organisation d'un territoire est le reflet de l'activité humaine qui adapte la couverture du sol et son usage en fonction des contraintes ou opportunités économiques [1].

L'arrangement temporel et spatial des occupations du sol (OCS) a une forte influence sur les risques environnementaux [6, 8, 18]. Sa connaissance permet d'alimenter des modèles de simulation prospective afin d'évaluer l'impact de différents scénarios d'évolution de la couverture du sol [5]. Afin d'extraire des connaissances sur les changements d'usage et de couverture des sols, la fouille des données agronomiques permet la mise au point de modèles de classification des mosaïques parcellaires et d'outils de visualisation des résultats [11, 17]. L'expert qui fouille ces données désire avoir une vue précise sur les successions de cultures et leur localisation ainsi que sur les futurs possibles de ce territoire en fonction de différents scénarios. Les modèles stochastiques en fouille de données ont montré une bonne aptitude pour cerner le bruit des données issues de processus vivants et extraire des régularités qu'un expert peut expliquer [3].

La définition d'un modèle de simulation prospective d'un territoire sur la base d'un scénario pose le problème de la description de l'organisation temporelle et spatiale du territoire [7]. La calibration du modèle pose le problème du choix de la période temporelle et de la zone d'étude pour l'apprentissage des paramètres. Enfin sa validation amène sa comparaison à un modèle "nul" qui représente la poursuite de la tendance actuelle ne serait ce que pour y déceler des ruptures dans la dynamique paysagère [10].

Cet article présente une méthodologie à base de modèles stochastiques pour identifier, localiser et simuler en fonction du temps les occupations des régions différenciées par leurs successions de culture. Nous nous plaçons dans un cadre de définition de modèles spatialement explicites couplés à un système d'information géographique (SIG) selon la catégorisation définie par [1]. Les *shapefiles* sont calculés par le système ARPEnTAge qui délivre une classification à la fois temporelle et spatiale d'un territoire sur la base des occupations du sol relevées chaque année. Nous proposons une méthode de simulation du territoire qui tienne compte des dynamiques temporelles et spatiales des années précédentes observées dans différentes sous régions. L'écart entre données simulées et observées permet de déceler des ruptures dans le processus de mise en valeur du territoire en fonction des contraintes ou opportunités s'offrant aux agriculteurs. Les écarts sont mesurés à l'aide du taux de reconnaissance de pixels sur une représentation rasterisée du territoire.

Cet article est organisé de la façon suivante : après une introduction, la seconde section décrit le principe de la simulation d'une séquence – plus exactement, sa prolongation – à l'aide de HMM. Nous décrivons comment se passent l'apprentissage du modèle et la simulation du prochain terme de la séquence. La section suivante décrit logiciel ARPEnTAge d'effectuer une classification du territoire d'étude en régions (*patches*) homogènes vis à vis des successions de culture qui s'y pratiquent. La quatrième section présente la méthode utilisée pour prédire l'occupation du territoire l'année suivante. Dans la représentation rasterisée du territoire, l'occupation de chaque pixel est prédite sur la base de ses occupations les deux dernières années et sur la base des occupations de ces voisins. La section cinq est consacrée aux

résultats. Elle montre comment l'utilisation d'ARPEnTAge permet de localiser des sous régions de même dynamique donne des résultats de simulation plus contrastés en éliminant l'influence des zones stables (forêts, prairies permanents) et permet de définir plus précisément un modèle "nul" dans lequel siège des rotations caractérisant ainsi la tendance actuelle.

2.2- Simulation de séquences à l'aide de modèles de Markov cachés

Le problème de la simulation d'une séquence d'OCS est le suivant : étant donné un territoire agricole représenté par un ensemble de sites s_i possédant un suite d'occupations du sol en fonction du temps – soit la suite des occupations temporelles du site s_i – quelles seront les hypothèses vraisemblables pour $o^{i,t+1}$? Nous nous plaçons dans un cadre probabiliste qui suppose que $o^{i,t+1}$ suit la même loi de probabilité que $o^{i,t}$ et que ses voisins spatiaux $o^{j,t+1}$ (s_j est voisin de s_i). A l'intérieur de ce cadre, se pose le problème du choix de la période temporelle et de la portion d'espace pendant lesquelles sera estimée cette densité. Dans ce travail, nous avons choisi de calculer la ressemblance des séquences à l'aide de modèles de Markov cachés du second-ordre (`HMM2`) tels que mis en œuvre dans le logiciel CarottAge[12]. Ces modèles permettent une segmentation temporelle du processus d'allocation des terres en le considérant stationnaire par morceaux. Ils permettent aussi une bonne estimation du champs de Markov qui modélisent la structure spatiale du territoire [15].

2.2.1- Les modèles de Markov cachés

2.2.1.1- Notations et définitions

Un modèle de Markov caché est défini par la donnée de :

– un ensemble fini comprenant N états ;

–A la matrice donnant les probabilités de transition entre états :

– $A=(a_{ij})$ pour un modèle d'ordre 1 (`HMM1`) avec la contrainte :

– $A=(a_{ijk})$ pour un modèle d'ordre 2 (`HMM2`), avec la contrainte :

– $b_i(.)$ les lois des densités sur l'ensemble des observations associées aux états s_i.

s_1		s_2		s_3	
prairies	0.029	prairies	0.029	prairies	0.029
blé	0.029	blé	0.029	blé	0.029
colza	0.029	colza	0.029	colza	0.029
maïs	0.029	maïs	0.029	maïs	0.029
jachères	0.029	jachères	0.029	jachères	0.029
…		…		…	

Fig. 1: Les états cachés sont dénotés. Les observations sont des occupations du sol. Les distributions $b_i(.)$ sont données pour chaque état (ici équiprobables).

La matrice A contient un ensemble de valeurs qui permettent de définir la topologie du graphe des transitions entre états : quelles sont les transitions autorisées, aller simple ($a_{ij}>0$, $a_{ji}=0$), aller-retour , bouclage ($a_{ii}\neq 0$), etc.

La modélisation d'une suite d'observations par des HMM est ainsi fondée sur deux principes : (i) la séquence peut être découpée en segments par une chaîne de Markov et (ii) la séquence est la réalisation d'un processus stationnaire représenté par une densité de probabilité sur l'espace des observations à l'intérieur d'un segment.
En modélisant de la sorte les segments composant la séquence, on ignore la réalité de la production du signal comme résultat d'un processus intelligent mais on peut utiliser des algorithmes d'apprentissage et de reconnaissance rapides [2]. Cette façon de procéder est complémentaire d'une approche analytique et explicative fondée sur un mécanisme de raisonnement. En mesurant précisément par une probabilité ce que l'on qualifie au premier abord de hasardeux, on diminue l'indéterminisme de notre perception du processus et on peut faire apparaître des comportements explicables donc prévisibles qui pourront être réutilisés dans un mécanisme de raisonnement ; ce mécanisme d'extraction et de réutilisation est un des principes de la fouille de données.

2.2.2- Probabilité d'un alignement temporel dans un HMM2

En adoptant les notations définies dans [16], on appelle **Erreur !** une suite d'états atteints respectivement aux temps $1, 2, \ldots T$ et une suite synchrone d'observations. La probabilité de la suite d'états $Q^{T,1}$ est définie par :
lorsque est la probabilité de l'état q_1 et $a_{q_1 q_2}$ la probabilité de la transition $q_1 \rightarrow q_2$ (initialisation du modèle aux instants t=1 et t=2).
La probabilité de l'alignement entre la suite d'états $Q^{T,1}$ et la suite d'observations $O^{T,1}$ est définie par la probabilité jointe :
Dans le cas des modèles de Markov gauche-droite décrits dans la figure 1, un alignement entre états et observations définit une segmentation.
La vraisemblance $L(O)$ est calculée en considérant tous les alignements possibles.
Comparés à des `HMM1`, les `HMM2`élisent mieux les phénomènes de durée et n'ont pas la complexité des `HMM`continus [13].

2.2.3- Simulation d'occupation du sol

Une fois donné un corpus de données représentant les occupations du sol entre les instants 1 et t, différents algorithmes permettent l'apprentissage d'un HMM et la détermination des paramètres A et $b_i(.)$. Nous utilisons l'algorithme Forward - Backward [14] qui est une variante de l'algorithme EM [4]. Le résultat est constitué par les nouvelles valeurs des transitions a_{ijk} et des densités $b_i(.)$. L'occupation au temps t+1 est obtenue par un tirage au hasard en utilisant la densité $b_i(.)$ du dernier état du HMM qui modélise le dernier segment.

Afin de tenir compte des phénomènes de rotation entre cultures, nous utilisons des *n−uplets* d'observations (des triplets d'observations dans notre cas) qui se chevauchent d'année en année. La distribution est utilisée pour calculer. Cette dernière est utilisée pour générer o_{t+1} en supposant les deux dernières observations o_{t-1} et o_t. Le processus est supposé stationnaire sur la période modélisée par le dernier état du `HMM2`. Cette façon de faire correspond à la définition du modèle "Nul" tel que le définit Pontius [10]. Dans cette étude, l'auteur s'intéresse à l'agrandissement de l'emprise des villes dans les campagnes en attribuant deux modalités à un site : "Change" et "No change". Nous généralisons ce principe pour tenir compte des rotations entre OCS. Par exemple, la poursuite au

temps t+1 d'une rotation triennale commencée en t−1 correspond toujours à l'utilisation d'un modèle "NUL" malgré le changement d'OCS.

2.3- HMM pour la classification spatiale : le logiciel ARPEnTAge

Dans un espace de dimension deux, comme une image, la notion de chaîne de Markov se généralise en donnant naissance à la notion de champ de Markov : l'état d'un site dépend seulement de ses plus proches voisins spatiaux. Les algorithmes d'estimation et de classement deviennent alors plus complexes à mettre en œuvre.

ARPEnTAge un logiciel qui détecte les successions d'occupation du sol et les localise en considérant deux modèles stochastiques : une chaîne de Markov cachée pour représenter l'évolution temporelle des assolements et un champ de Gibbs pour représenter l'organisation spatiale des successions. Les outils de visualisation développes avec ARPEnTAge représentent le territoire étudié comme une image de successions plutôt que comme une succession d'images. ARPEnTAge été décrit initialement dans EMS[15].

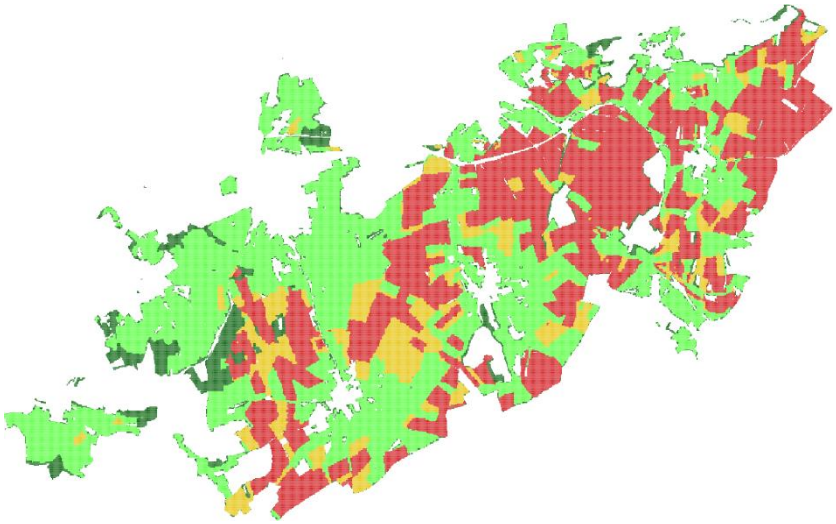


Fig. 2: Le territoire de Vittel-Contréxeville classé en 4 patches. Les patches 2 (vert clair) et 3 (vert sombre) correspondent respectivement aux prairies et forêts pérennes. Les diagrammes de Markov des états 4 (rouge) et 5 (jaune) sont donnés dans les figures 3 et 4

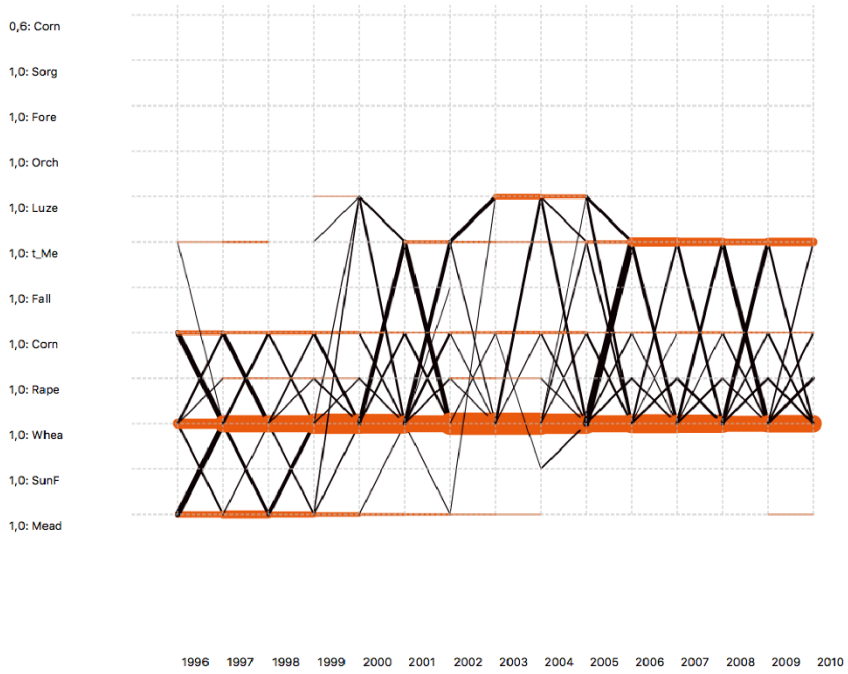


FIG. 3: Diagramme de culture relatif au patche 4

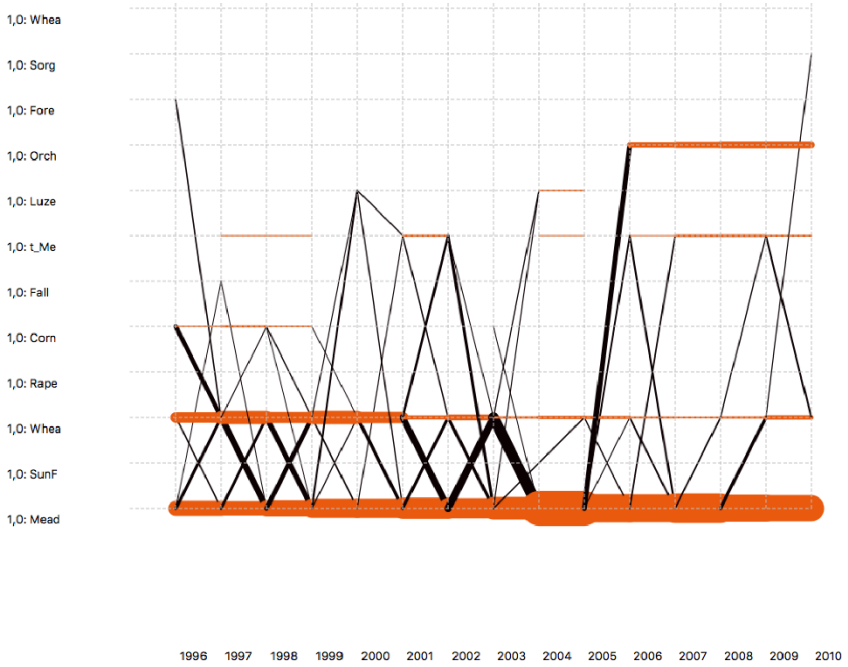


FIG. 4: Diagramme de culture relatif au patche 5

2.4- Spatialisation de la prédiction des occupations du sol

Les HMM2és aux “patches” détectés par ARPEnTAgeles instants 1 et *t*, sont utilisés pour simuler les OCS à l’instant *t*+1. Ces différentes OCS sont ensuite considérées comme un champs de Gibbs pour tenir compte des effets de voisinage. Cette façon de faire possède plusieurs avantages : (i) ARPEnTAge écèle les zones à couverture pérenne telles que les prairies permanentes et les forêts pour lesquelles une simulation n’est pas d’actualité pour le scénario, (ii) les résultats de la simulation ne sont plus biaisés par de grandes étendues à couverture pérennes, et enfin (iii) le lissage par le champ de Gibbs spatialise les simulations temporelles des sites.

2.5- Résultats

Le territoire de Vittel Contrexeville – 78 km^2 – est “rastérisé” en une matrice de pixels avec une résolution de 15 m. Chaque site possède une modalité parmi les 11 relevées (cf. Tab. 1) par enquête annuelle entre les années 1996 et 2010. Dans la calibration des modèles, l’année 2011 n’est pas utilisée et sert à la validation de la simulation.

"non Classé"	–	0
"prairie permanente"	Mead	1
"tournesol"	SunF	2
"cereale"	Wheat	3
"colza"	Rape	4
"mais"	Corn	5
"chaume"	Fall	6
"prairie temporaire"	t_Me	7
"vergers"	Orch	8
"bois"	Forest	9
"sorgho"	Sorgh	10
"luzerne"	Luze	11

TAB. 1: Les occupations du sol relevées et leurs abréviations

Dans un premier temps, le système ARPEnTAge délivre une classification en 4 classes – aussi appelées état car en rapport avec les HMM2és – qui sont localisées (cf. Fig. 4). Différents nombres d’états ont été essayés par l’analyste. L’expert n’en a retenu que quatre. Parmi ces 4 états, deux ont retenu l’attention de l’expert car étant porteurs d’enjeux environnementaux : l’état “quatre” (en rouge) représente des zones céréalières appartenant à des exploitations non conventionnées par opposition à l’état “cinq” (en jaune). Sur chacun de ces deux corpus de données, nous avons entraîné des HMM2 linéaires (cf. 1) possédant un nombre croissant d’états : de 1 à 4. Ces HMM2 supposés segmenter la période 1996 – 2010 en autant de segments stationnaires. Seul le dernier état est utilisé pour simuler l’OCS de 2011.

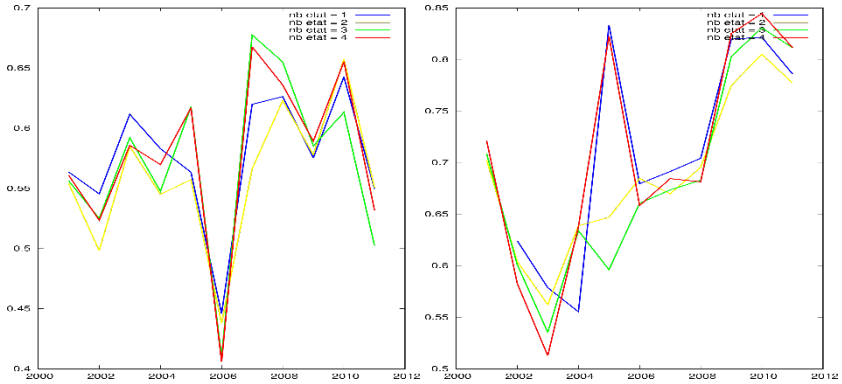


FIG. 5: Taux de reconnaissance de pixels en fonction du temps sur les patches 4 (rouge) et 5 (jaune)

La figure 5 représente le taux d'erreurs entre le pixel prédit une année à partir des données des années précédentes et le pixel observé cette année. Les apprentissages des HMM faits selon le principe du maximum de vraisemblance par le logiciel CarottAge. Nous utilisons des observations constitués par des triplets d'OCS se chevauchant. Un état de HMM est une distribution de triplets qui permet de calculer la distribution conditionnelle est simulé à partir de cette distribution.

La figure montre la variation des taux de reconnaissance en parallèle avec les dynamiques des successions de cultures. On remarque que les taux sont très faibles chaque fois qu'une discontinuité se produit dans le processsus d'allocation des terres.

On remarque aussi que le modèle simple à 1 état a un comportement moyen honorable comparé aux modèles à plusieurs états. Il s'adapte moins vite aux changements car ces derniers sont moyennés par des données passées devenues obsolètes.

	Mead.	Wheat	Rapes.	Corn	t_Mead.	Orch.	Fore.
Mead.	0.84	0.04			0.12		
Wheat		0.76	0.007	0.076	0.15		
Rapes.	0.004	0.87	0.004	0.072	0.05		
Corn	0.027	0.74	0.003	0.16	0.062		
t_Mead.		0.47		0.045	0.49		
Orch.		0.012				0.96	
Fore.						0.92	
Sorg.		0.48		0.006	0.51	0.003	

TAB. 2: Matrice de confusion sur l'état 4

	Mead.	Whea	Rapes.	Corn.	t_Mead.	Orch.	Fore.	X
Mead.	0,99							
Whea	0,24	0,60		0,05	0,10	0,01		
Rapes.	0,06	0,59		0,26	0,01	0,04		
Corn	0,05	0,76	0,01	0,11	0,07			
t_Mead.	0.25	0.39		0,03	0,34			
Orch.						1,00		
Fore.							0,22	0,78
Sorg.	0,01	0,94			0,05			

TAB. 3: Matrice de confusion sur l'état 5

	X	Mead	Whea	Rape	Corn	t_Me	Orch	Fore
Mead		1,00						
Whea		0,05	0,78		0,05	0,12		
Rape		0,02	0,88		0,06	0,04		
Corn		0,06	0,71		0,16	0,06		
t_Me		0,03	0,48		0,04	0,44		
Orch	0,01						0,99	
Fore	0,07							0,93
Sorg		0,01	0,52			0,44		0,02

TAB. 4: Matrice de confusion sur tout le territoire

2.6- Conclusions

Nous avons présenté une méthode pour simuler les dynamiques d'occupation du sol qui s'appuie sur des modèles stochastiques. Cette méthode permet de simuler l'occupation d'un pixel (carré de 15m de coté) sur la base des occupations des 2 années précédentes et des carrés voisins. Le même formalisme permet de modéliser l'évolution temporelle et spatiale. La simulation se fait par tirage aléatoire des occupations à l'aide de densités estimées sur une région spatiale et une période temporelle choisies pour être le siège de processus stationnaires. Le résultat de la simulation peut être vu comme la constitution d'un territoire "nul" dans lequel se poursuit la tendance actuelle. L'écart entre le modèle "nul" et la réalité permet de déceler des ruptures dans le processus d'allocation des terres par les agriculteurs.

2.7- Références

[1] C. Agarwal, G. L. Green, M. Grove, T. Evans, and C. Schweik. A review and assessment of land-use change models : dynamics of space, time and human choice. In *ECOSYSTEMS AND THE NORTH AMERICAN CARBON CYCLE 9 HUMAN CHOICE. CIPEC COLLABORATIVE REPORT SERIES NO. 1, CENTER FOR THE STUDY OF INSTITUTIONS, POPULATIONS, AND ENVIRONMENTAL CHANGE, INDIANA UNIVERSITY AND THE USDA FOREST SERVICE*, pages 10–1111, 2000.

[2] A. Boyer, J. Di Martino, P. Divoux, J.-P. Haton, J.-F. Mari, and K. Smaili. Statistical Methods in Multi-Speaker Automatic Speech Recognition. *Applied Stochastic Models and Data Analysis*, 6(3) :143–155, 1990.

[3] M.S. Castellazzi, J. Matthews, F. Angevin, C. Sausse, G.A. Wood, P.J. Burgess, I. Brown, K.F. Conrad, and J.N. Perry. Simulation scenarios of spatio-temporal arrangement of crops at the landscape scale. *Environmental Modelling & Software*, 25(12) :1881 – 1889, 2010.

[4] A.P. Dempster, N.M. Laird, and D.B. Rubin. Maximum-Likelihood From Incomplete Data Via The EM Algorithm. *Journal of Royal Statistic Society, B (methodological)*, 39 :1 – 38, 1977.

[5] Peter Elias, Samuel Dekolo, and Olatunji Babatola. Land Use Change Modelling In Developing Countries : Issues And Prospects. *International Journal of Geography and Geology*, 1(1) :23–41, 10-2012 2012.

[6] Richard T.T. Forman. Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology*, 10(3) :133–142, 1995.

[7] Thomas Houet. Usages de modèles spatiaux pour la prospective. *Revue internationale de Géomatique*, 25(1) :123 – 143.

[8] A. Joannon, V. Souchère, P. Martin, and F. Papy. Reducing runoff by managing crop location at the catchment level : considering agronomic constraints at farm level. *Land Degradation and Development*, 17(5) :467–478, 2006.

[9] R.Gil Pontius Jr. and Laura C Schneider. Land-cover change model validation by an {ROC} method for the ipswich watershed, massachusetts, {USA}. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1–3) :239 – 248, 2001. Predicting Land-Use Change.

[10] Robert Gilmore Pontius Jr, Diana Huffaker, and Kevin Denman. Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. *Ecological Modelling*, 179(4) :445 – 461, 2004.

[11] E.G. Lazrak, J.-F. Mari, and M. Benoît. Landscape regularity modelling for environmental challenges in agriculture. *Landscape Ecology*, 25(2) :169 – 183, Sept. 2009.

[12] F. Le Ber, M. Benoît, C. Schott, J.-F. Mari, and C. Mignolet. Studying Crop Sequences With CarrotAge, a HMM-Based Data Mining Software. *Ecological Modelling*, 191(1) :170 – 185, Jan 2006.

[13] S. E. Levinson. Continuously Variable Duration Hidden Markov Models for Automatic Speech Recognition. *Computer Speech and Language*, 1 :29 – 45, 1986.

[14] J.-F. Mari, J.-P. Haton, and A. Kriouile. Automatic Word Recognition Based on Second-Order Hidden Markov Models. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 5 :22 – 25, January 1997.

[15] Jean-François Mari, El-Ghali Lazrak, and Marc Benoît. Time space stochastic modelling of agricultural landscapes for environmental issues. *Environmental modelling & software*, 46 :219–227, August 2013. http ://hal.inria.fr/hal-00807178/PDF/arpentage_hal.pdf.

[16] L. Rabiner and B. Juang. *Fundamentals of Speech Recognition*. Prentice Hall, 1995.

[17] Noémie Schaller, El Lazrak, Philippe Martin, Jean-François Mari, Christine Aubry, and Marc Benoît. Combining farmers' decision rules and landscape stochastic regularities for landscape modelling. *Landscape Ecology*, 27 :433–446, 2012.

[18] Adrian Southern, Andrew Lovett, Tim O'Riordan, and Andrew Watkinson. Sustainable landscape governance : Lessons from a catchment based study in whole landscape design. *Landscape and Urban Planning*, 101(2) :179 – 189, 2011.

3- Développement du territoire

Les agricultures se doivent de fournir une réponse aux enjeux de développement durable et les systèmes agricoles doivent s'inscrire dans la démarche globale de sobriété de nos sociétés. La recherche-intervention AGREV3DT menée en partenariat avec les acteurs du territoire a pour objectif d'informer, d'impulser et d'accompagner des démarches globales apportant des réponses à la lutte contre le changement climatique.

Divers systèmes de cultures à destinations alimentaire ou énergétique peuvent garantir une préservation de l'environnement et notamment de la qualité des eaux. De nombreuses études ont permis de relever l'intérêt des surfaces en herbe pour protéger la qualité de l'eau, des cultures bas-intrants à bas niveau d'impact telles que le miscanthus, le switchgrass et les taillis à (très) courte rotation (T(T)CR) et, de manière générale, les systèmes menés en agriculture biologique si possible avec de larges surfaces en prairies permanentes, qui sont des couverts agricoles à bas niveau d'impact. Outre l'intérêt pour la ressource en eau, ces systèmes de culture peuvent présenter un avantage économique s'ils sont inscrits dans des filières pérennes.
C'est en se basant sur ces systèmes de culture et la nécessité de les lier à des filières solides pour les pérenniser que les orientations d'AGREV 3 DT ont été établies. Le programme de recherche contient ainsi depuis fin 2017 un nouvel axe de travail qui est le développement et la construction de filières agricoles favorables à l'environnement.

3.1- Les potentiels de développement des cultures énergétiques pérennes

Suite aux recherches préliminaires sur la culture de miscanthus, le travail réalisé au cours du stage de fin d'études d'ingénieur agronome de Renaud BOULEC *(voir annexe 1)* a permis d'informer de l'intérêt d'implanter des cultures pérennes à biomasse telle que le miscanthus dans l'impluvium de Vittel-Contrexéville.

Une première partie de l'étude a consisté à réaliser une synthèse bibliographique approfondie de l'impact de la culture sur l'environnement.

La culture de miscanthus est très favorable pour la qualité de l'eau. Son fonctionnement cyclique autonome n'exige aucun intrant pour atteindre le potentiel maximal de productivité, et ses racines permanentes dues au caractère pérenne de la culture assure une très faible lixiviation des nitrates. De même, la culture limite fortement les contaminations des eaux superficielles par ruissellement.

En revanche, sa forte évapotranspiration due à l'importante production de biomasse entraine une réduction de la quantité d'eau drainée sous parcelles. Mais les données de modélisation issues de la littérature nous informent qu'à moins de recouvrir l'intégralité de la surface agricole de l'impluvium en miscanthus, aucun effet négatif n'est à craindre sur les recharges de nappes phréatique. L'enjeu quantité d'eau prend en effet de l'importance compte tenu des changements climatiques à l'œuvre, et il convient de le prendre en compte dans le développement du territoire de l'impluvium de Vittel-Contrexéville afin de ne pas diminuer les recharges des nappes.

Le dernier impact étudié de la culture de miscanthus concerne les émissions de gaz à effet de serre. Il apparaît que cette culture à biomasse énergétique entraîne une moindre émission de gaz à effet de serre comparé à une rotation culturale moyenne :

- Stockage du carbone dans les sols (pérennité de la culture) et stockage du carbone dans la biomasse aérienne fortement productive dans le cas d'un débouché autre que la combustion
- Réduction de l'ordre de cinq fois des flux de protoxyde d'azote comparé à une rotation culturale usuelle de Lorraine
- Ratio Energie produite/Energie utilisée bien meilleur que celui des cultures énergétiques de colza et de maïs
- Moins de consommation de fioul nécessaire à la gestion de la culture (hors étape d'implantation) : un seul passage annuel d'engins agricoles pour la récolte est nécessaire à la gestion de la culture.

Il a ainsi été relevé dans la littérature que, du point de vue des performances environnementales, les systèmes de culture comprenant le miscanthus montrent des résultats globalement meilleurs que tout autre système de culture comprenant une ressource énergétique.

La culture représente donc, avec les prairies permanentes et avec les cultures menées en agriculture biologique, un couvert permettant d'atteindre de très bons niveaux pour la qualité de l'eau et l'environnement de l'impluvium.

La validation de l'intérêt de la culture pour l'environnement nous a ensuite mené à nous pencher sur le développement concret de la filière dans notre territoire. 10 agriculteurs sur les 18 potentiellement concernés ont ainsi été enquêtés au printemps/été 2018 quant à leurs motivations et afin de déceler les leviers de création de débouchés pour cette culture.

Lors des entretiens compréhensifs (Kauffmann, 1996), les agriculteurs ont perçu comme débouché le plus réaliste la combustion dans des chaufferies collectives ou d'entreprises. Les collectivités territoriales ont ainsi été rencontrées pour discuter du projet de développement de partenariats avec les agriculteurs dans le territoire. Les discussions sont encore en cours, et certaines collectivités dont la commune de Contrexéville sont intéressées par une telle démarche, à l'image des communes d'Ammertzwiller et de Brumath en Alsace. L'opportunité nous a été donnée de rencontrer les élus communaux de Contrexéville pour discuter ensemble (commune, Agrivair et INRA) de l'intérêt d'un montage d'une telle filière. Certaines collectivités sont en effet inscrites « Territoire à énergie positive pour la croissance verte », elles doivent donc inscrire leurs actions dans la transition énergétique. Le tissage de liens socio-économiques dans ce territoire est réaliste et la dynamique dépendra des acteurs du territoire. Ce travail se poursuit dans le cadre de la recherche-intervention menée dans le projet AGREV3DT.

Un autre débouché du Miscanthus a été relevé particulièrement intéressant pour le territoire : la litière animale. Les enquêtes auprès des éleveurs ayant eu lieu avant la sécheresse estivale, ce débouché ressort assez peu dans le traitement des données. Cependant, certains agriculteurs ont subi à l'achat un prix particulièrement élevé de la paille, et l'argument d'autonomie en litière permise par l'implantation de miscanthus sur leurs exploitations semble les intéresser de plus en plus. Une recherche approfondie du système de « compost bedded pack barn », système de litière pouvant être composée de miscanthus ou autres copeaux, a d'ailleurs été menée dans le cadre d'AGREV3DT (Réflexions pour réfléchir de nouveaux bâtiments dans l'impluvium : paillage en plaquette bois selon la méthode du « compost bedded pack barn », août 2018)

Suite à ce travail et en lien avec les motivations spécifiques de deux agriculteurs, du Miscanthus sera implanté d'ici à fin juin 2019. L'une des utilisations prévues de la culture par les agriculteurs partenaires d'Agrivair est la méthanisation. Le miscanthus récolté en vert (coupe en octobre) et non pas en sec (coupe en avril) implique une gestion différente de la culture, et entraine des impacts différents sur l'environnement. Une synthèse bibliographique a été menée sur le sujet afin de répondre au mieux aux attentes des agriculteurs et à l'enjeu qualité de l'eau *(voir annexe 2, synthèse en cours de validation)*. Ce sont 7 ha qui vont être implantés, avec l'aide de l'entreprise Novabiom, spécialiste du miscanthus. Les agriculteurs partenaires d'Agrivair seront conviés à assister à cette implantation et un temps d'échange autour du travail mené jusqu'à présent sur ce sujet est prévu. La culture de miscanthus étant encore peu connue dans la région, cette expérience pourrait être source d'inspiration pour le développement d'autres territoires.

3.2- Préservation des prairies permanentes dans l'impluvium de Vittel-Contrexéville par une valorisation économique accrue

L'enjeu est ici de valoriser au mieux les productions à base d'herbe dans les filières actuelles ou dans de nouvelles filières. Si rien n'est fait très rapidement pour valoriser les produits issus des élevages herbagers, le territoire de l'impluvium risque de connaître une évolution semblable à celle du reste du plateau lorrain : un retournement marqué des prairies.
Couvert agricole prioritaire en terme de maintien de la qualité des ressources en eau, les prairies ont donc fait l'objet de deux stages dans le cadre d'AGREV3DT, l'un en cours sur la valorisation des produits, l'autre sur la possibilité de mise en place d'une unité de séchage collective de fourrages. Ces deux études ont pour premier but d'étudier et de mettre en avant le critère qualité : qualité du fourrage en lui-même (unité de séchage) et qualité des produits permis par ce fourrage qualitatif (valorisation des produits d'élevage à l'herbe).

Les résultats de l'étude sur la mise en place d'une unité de séchage collective menée par Henri DUCHAUX nous indique que deux systèmes pourraient être adaptés à l'impluvium, le séchage en vrac et le séchage en bottes *(voir annexe 3 – H. DUCHAUX, Etude des modalités d'introduction d'une unité de séchage collective des fourrages dans l'impluvium de Vittel-Contrexéville, document de synthèse bibliographique, 2019)*. Le premier système permet de maintenir une qualité maximale du fourrage mais le deuxième semble plus adapté d'un point de vue logistique à l'acheminement de fourrages sur de longues distances. Le principe même du programme de recherche AGREV3DT est de co-construire des actions avec tous les acteurs du territoire. Sur la base des données recueillies dans le cadre du stage, les discussions pourront se baser sur l'état actuel des connaissances et le projet sera mis en forme en selon les multiples spécificités liées au territoire et aux aspirations des parties prenantes.

L'étude menée en parallèle par Adrien POTIER sur la valorisation des produits dans le cadre d'un stage de fin d'études de master a d'ores et déjà permis de prouver un intérêt nutritionnel certain à la consommation de produits carnés et laitiers de ruminants élevés à l'herbe *(A. POTIER, Synthèse bibliographique : qualité du lait en fonction de l'alimentation des vaches laitières, 2019)*. Ainsi, plus la proportion d'herbe est importante dans la ration des animaux, meilleur sera le produit pour notre santé. L'action de pâturer participe également à la production de viande ou produits laitiers de qualité. Suite à la réalisation de cette synthèse bibliographique, le travail en cours consiste à évaluer les possibilités de débouchés de ces produits à l'herbe, en circuit court et local mais également en filière longue.

Pour renforcer la valorisation des produits locaux et de qualité, la mission consiste à rencontrer tous les commerces et établissements privés ou publics de restauration hors domicile, pour à la fois sensibiliser à l'intérêt de l'herbe et évaluer les opportunités de partenariat avec les éleveurs de l'impluvium. Ce travail permet de faire un état des lieux et d'orienter la suite de nos recherches.

La filière longue est également étudiée à travers l'élaboration d'une reconnaissance sous forme de label, qui serait lié aux pratiques vertueuses des agriculteurs partenaires. Le cahier des charges en cours de construction est basé sur les travaux de recherche sur les intérêts nutritionnels de la viande et du lait à l'herbe. Il est en cours d'étude et sera monté le cas échéant dans le cadre du programme de recherche AGREV3DT avec toutes les parties prenantes.

4- Les pertes de nitrates du réseau de bougies poreuses

Les données récoltées au cours de la campagne 2018 ont fait l'objet de l'étude ci-dessous. Les observations de la campagne agricole 2019 (prélèvements d'eau encore en cours) seront présentées aux agriculteurs après la dernière moisson. L'objectif cette année est d'avoir un ordre d'idée de la productivité et de la qualité des productions agricoles sur les différentes parcelles testées selon les deux modalités (cahier des charges/innovation), pour enrichir le débat. L'analyse des données des sourcettes réparties dans l'impluvium sera également réalisée pour une présentation à l'automne.

4.1- Introduction

A sa mise en place à partir de 2015, ce nouveau dispositif de BP avait pour objectif de servir à co-construire de nouvelles pratiques avec les agriculteurs et à tester la pertinence des mesures du cahier des charges d'Agrivair, basé sur le cahier des propositions INRA du 17/05/2016 – Argumentaire des actions pour une pérennisation de la transition agro-écologique de l'impluvium de Vittel-Contrexéville. Des répétitions d'expérience n'étant pas prévues (plusieurs parcelles ayant le même type de sol, le même climat, le même couvert et dont l'itinéraire technique est identique), ce dispositif ne sert pas à faire des mesures statistiques mais bien à vérifier les tendances et orienter les recherches en mesurant in situ les effets des systèmes de culture mis en œuvre par les agriculteurs. En fin de campagne 2019, la lixiviation de nitrates sous le dispositif aura été observée pendant trois campagnes (seront exclus de l'étude les résultats de la première année qui présentent un risque de biais du fait de la déstructuration du sol lors de la pose des bougies poreuses), soit une rotation courte pour la plupart des BP. Nous pourrons donc, en fonction des résultats, faire des recherches approfondies sur certaines pratiques qui se révèleraient in situ plus favorables ou au contraire plus défavorables que prévu.

4.2- Description du dispositif

Un réseau de 168 bougies poreuses disposées sous 24 parcelles a été mis en place dans l'impluvium à partir de l'année 2015, faisant suite à une recherche de la méthode la mieux adaptée au territoire pour approximer le taux de lessivage des nitrates sous les parcelles agricoles. Les prélèvements sont réalisés pendant la période hivernale qui correspond à la période drainante dans le territoire de l'impluvium. L'eau prélevée dans chaque bougie tous les 40 mm de pluie et toutes les deux semaines minimum est analysée par le laboratoire de Nestlé Waters pour en mesurer la concentration en nitrates.

L'emplacement des bougies poreuses dans le territoire a été réfléchi avec les agriculteurs volontaires de façon à représenter l'intégralité des sols présents dans l'impluvium et les différents types de

couverture du sol agricole : prairies permanentes, prairies temporaires, culture d'hiver et de printemps, CIPAN.

Carte de l'impluvium renseignant sur la délimitation de la zone de recharge (trait rouge), la localisation des parcelles à bougies poreuses (entourées en vert) et la localisation des sourcettes prélevées (signalées en orange)

Elles sont regroupées par lots de 7 en un même site, présentant le même type de sol et le même itinéraire technique, chaque lot étant lui-même associé à un autre lot sur une même parcelle à quelques mètres de distance. L'intérêt de positionner deux lots de bougies sur une même parcelle est de pouvoir comparer les variabilités liées à l'itinéraire technique. Une moitié de parcelle est gérée selon le cahier des charges Agrivair et l'autre partie est gérée selon les envies des agriculteurs. Cette dernière modalité appelée « innovation », initiée par l'agriculteur, peut être liée par exemple à une culture différente ou à une fertilisation différente.

Parcelles divisées en deux

→ *Gestion selon le cdc Agrivair*

→ *Gestion « innovante »*

4.3- Méthode de calcul

Les parcelles étudiées ayant des sols à Réserve Utiles différentes et des cultures différentes, la comparaison des données brutes exprimées en concentration n'est pas pertinente, car à même quantité lessivée, la concentration dépendra de la capacité du sol à retenir l'eau. Ainsi, une plus forte dilution ne traduit pas systématiquement un moindre risque pour la qualité de l'eau. Nous avons donc choisi de traduire les concentrations en quantité d'azote lessivé afin d'approximer au mieux le lessivage des nitrates. Ce choix s'est fait également pour faciliter le dialogue avec le monde agricole

qui exprime la valeur azotée des fertilisants en Unité d'azote = kg d'azote. Il est ainsi plus visuel de se représenter les pertes sous racine en kg d'azote, en comparaison à ce qui a été apporté à la parcelle.

4.3.1- Utilisation des données brutes de concentration en nitrates des eaux des BP

Pour chaque campagne de prélèvement, la médiane des concentrations des 7 échantillons d'eau des bougies a été retenue comme représentative de la concentration en nitrates de l'eau retrouvée dans le sol environnant la bougie poreuse, du prélèvement précédent jusqu'à la date du jour du prélèvement. La médiane permet en effet d'exclure les valeurs aberrantes qui peuvent être dues à une erreur de manipulation ou à une pollution locale non représentative de la majorité du sol. Les valeurs médianes des concentrations sous prairies permanentes pâturées permettent également d'approximer les valeurs que l'on retrouverait sous prairies permanentes uniquement fauchées, ces dernières étant considérées d'après la littérature comme couvert le plus protecteur de l'eau en agriculture. Lorsque seul un échantillon avait pu être prélevé et analysé, la donnée n'était pas utilisée. Par la suite du travail, il pourrait être envisagé d'utiliser l'intégralité des données pour un traitement statistique, notamment pour l'étude du lessivage en cas de pâturage, après vérification de chacune d'entre elle d'une bonne représentativité.

Afin de réaliser le calcul de kg d'azote lessivé, la quantité d'eau drainée sous les parcelles, autrement appelée lame drainante, a dû être estimée :

4.3.2- calcul de la lame drainante

Utilisation du modèle de Burns pour calculer quotidiennement la lame drainante :

P-kc.ks.ETP

P = pluviométrie du jour
kc = coefficient cultural
ks = coefficient de stress hydrique
ETP = évapotranspiration potentielle

Les données de pluviométrie et d'ETP exprimées en mm sont issues de la station météorologique de l'INRA à Mirecourt. A partir du 1er janvier 2017, les données de pluviométrie utilisées proviennent de la station météorologique de Lignéville.

Le coefficient cultural dépend du stade de croissance de la plante. Les coefficients culturaux utilisés dans l'étude proviennent de données de Robelin, 1969 :

Kc Robelin 1969

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Prairie naturelle	1	1	1	1	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	1	1
Prairie temporaire	1	1	1	1	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	1	1
Céréale hiver	1	1	0.9	0.9	1	1	0.4	0.5	0.6	0.65	1	1
Orge de printemps	1	1	0.6	0.65	0.9	0.9	0.6	0.5	0.6	0.65	1	1
Sorgho	1	1	0.6	0.6	0.5	0.6	0.85	1	0.8	0.55	1	1

Le coefficient de stress hydrique est lié au stress que subit la plante quand l'eau contenue dans le sol n'est pas disponible en quantité suffisante :
La réserve utile représente l'eau qui peut être utilisée par la plante. Cette réserve utile (RU) est composée d'une réserve facilement utilisable (RFU) et d'une réserve difficilement utilisable (RDU). La réserve facilement utilisable correspond à la quantité d'eau dans le sol pour laquelle la pression de

rétention du sol n'est pas suffisamment forte pour induire un stress chez la plante. Nous admettrons qu'elle vaut 2/3 de la RU [1] [2]. La réserve difficilement utilisable représente quant à elle la différence entre la RU et la RFU. Elle correspond à une quantité d'eau dans le sol disponible pour la plante, mais qui subit une rétention du sol, ce qui augmente la pression à exercer par la plante pour la prélever, induisant ainsi un stress appelé stress hydrique. Dans cette situation, la plante ne transpire pas autant que si la RFU était atteinte. Le coefficient de stress hydrique, qui varie de 0 à 1, permet de traduire cette réaction physiologique dans le calcul du bilan hydrique [3] :

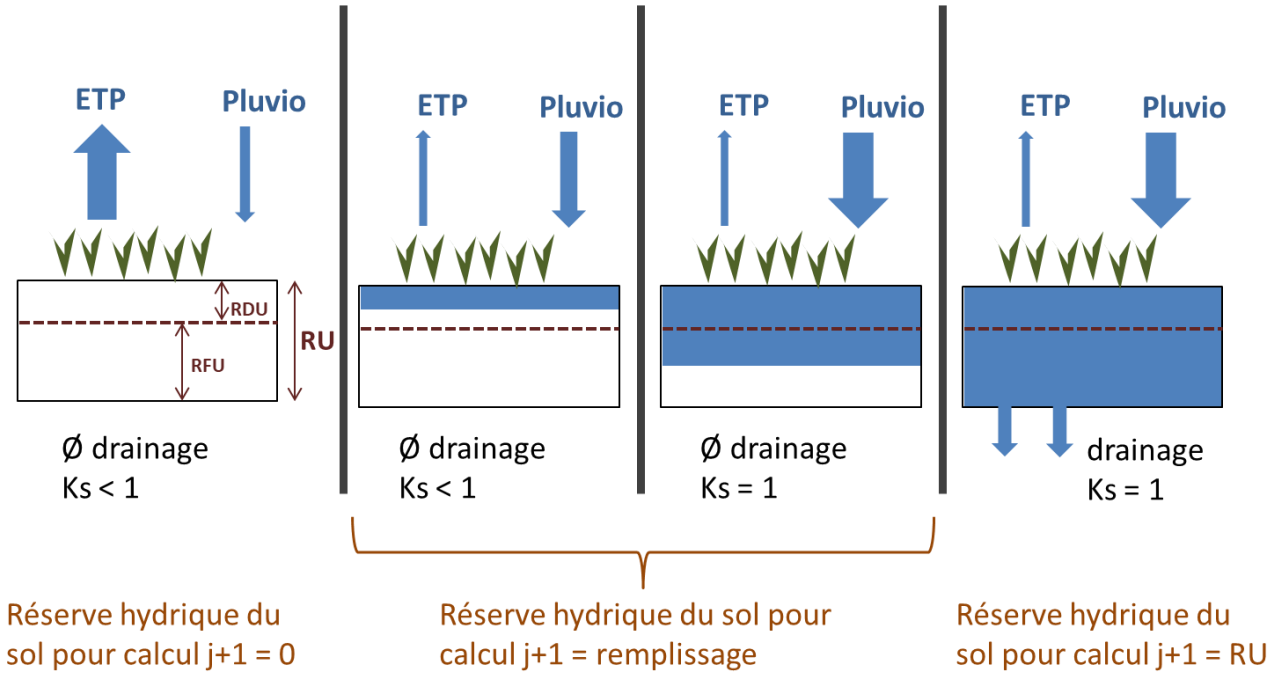
- Lorsque la réserve hydrique du sol est supérieure à la RDU (qui correspond au tiers de la RU dans notre étude) : ks = 1
- Lorsque la réserve hydrique du sol est inférieure à la RDU :
  ks = Réserve hydrique du sol / RDU

Les calculs des lames drainantes ont été automatisés sous tableur excel pour chaque parcelle à BP en fonction de sa RU (données des RU issues de la carte des sols réalisée par M. GURY, collègue du CNRS, en 2002) avec la formule suivante :

=SI(ET((**RéserveHydriqueJPréc**<=(**RU**/3));0<(**RéserveHydriqueJPréc**+**PluvioJ**-(**kc***(**RéserveHydriqueJPréc***3/**RU**)***ETPP**)));**RéserveHydriqueJPréc**+**PluvioJ**-(**kc***(**RéserveHydriqueJPréc***3/**RU**)***ETPP**);SI(ET((**RéserveHydriqueJPréc**<=**RU**);((**RU**/3)<**RéserveHydriqueJPréc**);(**RéserveHydriqueJPréc**+**PluvioJ**-(**kc*** **ETPP**))>0);**RéserveHydriqueJPréc**+**PluvioJ**-(**kc***ETPP**);SI(ET((**RU**<**RéserveHydriqueJPréc**);(**RU**+**PluvioJ**-(**kc***ETPP**)>0));**RU**+**PluvioJ**-(**kc***ETPP**);0)))

où

- **RéserveHydriqueJPréc** la réserve hydrique du sol le jour précédent,
- **PluvioJ** la pluviométrie du jour,
- **ETPP** l'évapotranspiration potentielle du jour,
- **RU** la réserve utile du sol,
- **kc** le coefficient cultural du jour.



Schématisation des étapes du calcul pour arriver à la modélisation de la lame drainante

4.3.3- Estimation de la quantité d'azote lixivié

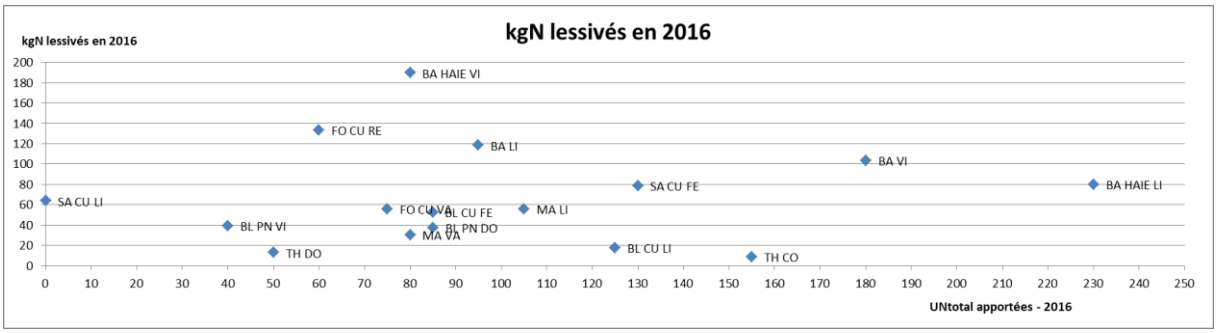
La lame drainante exprimée en millimètres est la première étape pour calculer de façon estimative la quantité de nitrates lessivés à partir des mesures de concentration en nitrates des eaux du dispositif de BP. Nous avons pu estimer le volume d'eau drainée à la parcelle sur une surface de 1 ha et ainsi la masse d'azote lessivé.

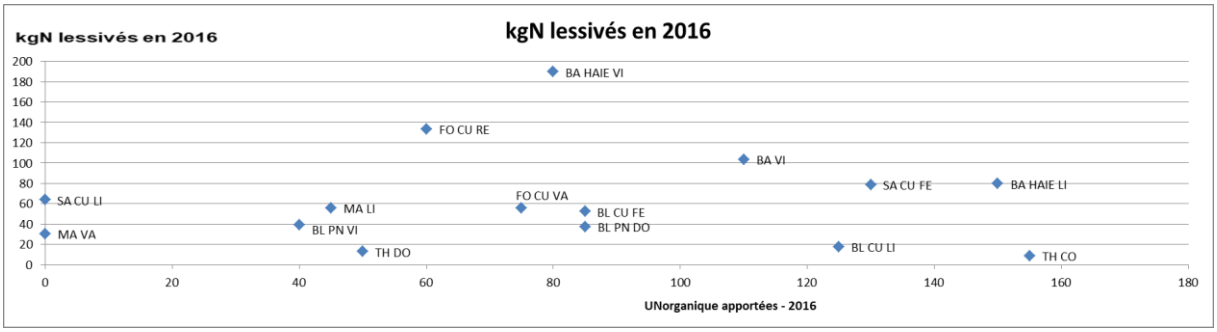
Ex. de calcul : A = lame d'eau et B = concentration en nitrates
A [mm] * 10^{-3} * 10 000 [m²] → volume d'eau drainée sous 1 ha en m^3
B [mg/l] * 10^{-3} → concentration en nitrates en kg/ m^3
↔ Kg de nitrates lessivés sous 1 ha = $A*B*10^{-2}$

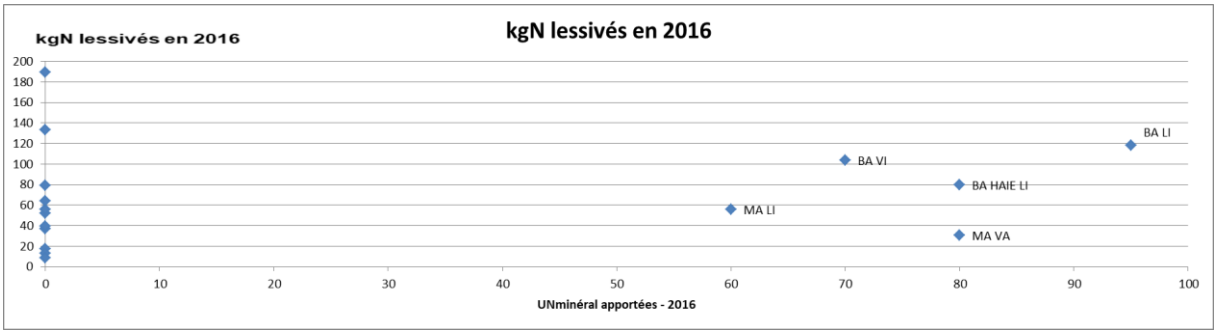
Enfin, pour passer des kg de nitrates en azote, il suffit de diviser la valeur obtenue par 4,428 du fait des masses molaires de l'azote (16 g/mol) et de l'oxygène (14 g/mol) du nitrate NO3-.

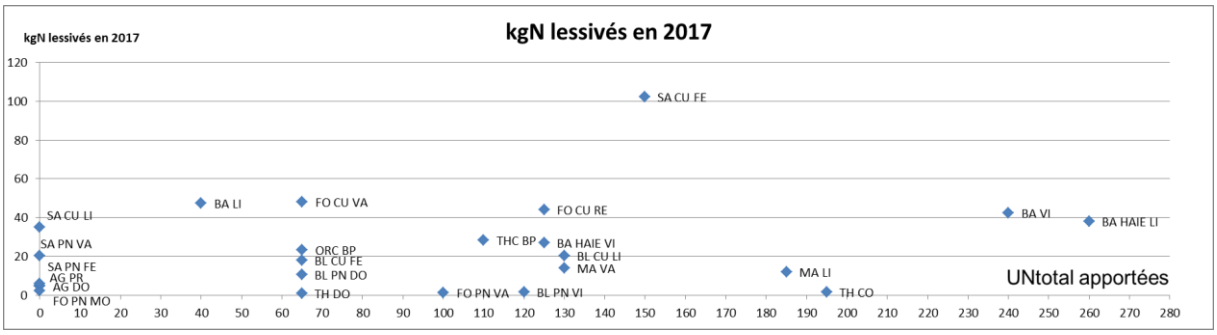
4.4- Résultats

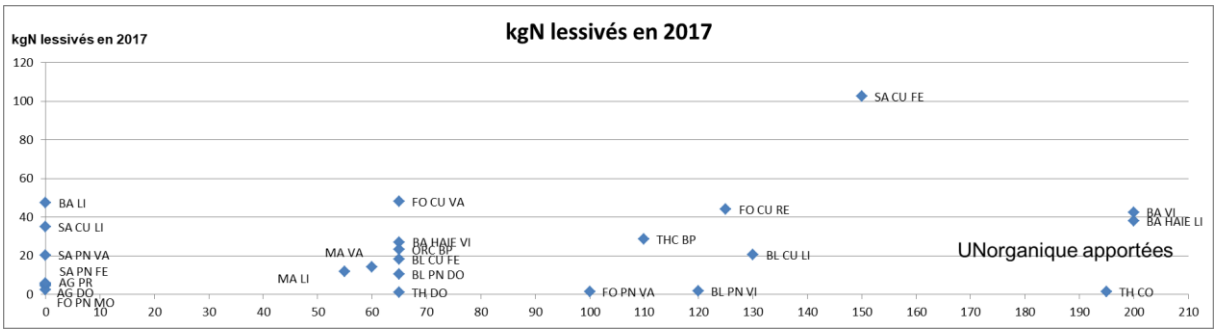
4.4.1- Recherche d'un lien entre quantité d'azote apportée (au total, organique et minérale) et la lixiviation d'azote par bougie poreuse et par an

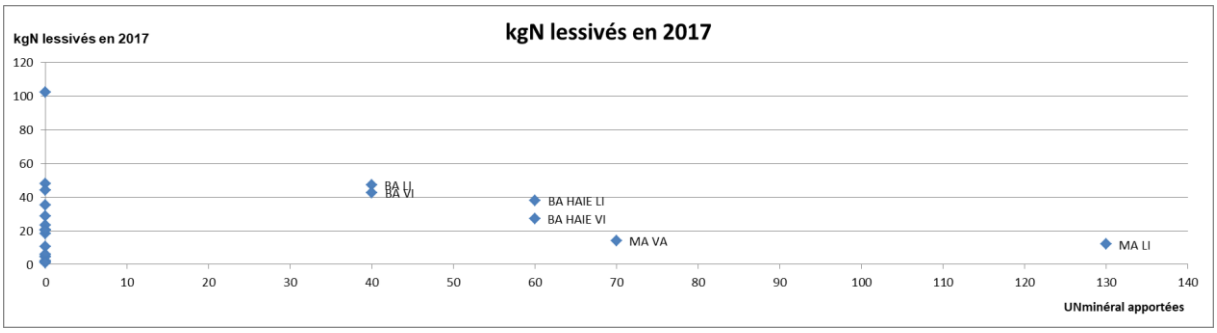


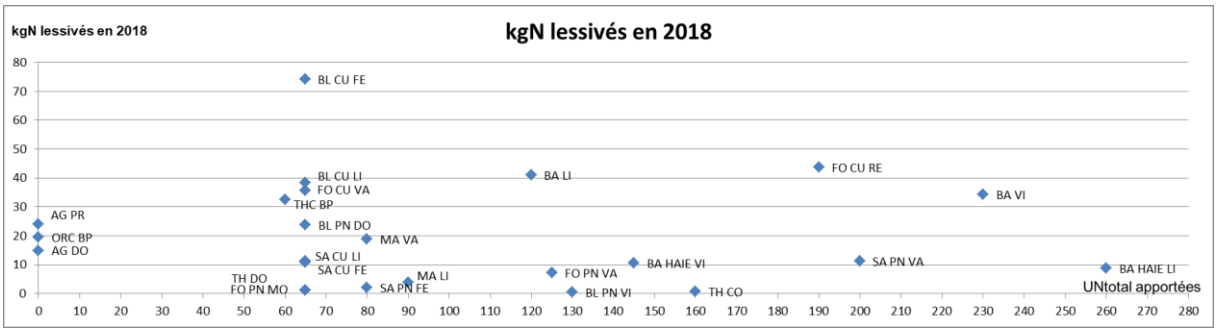


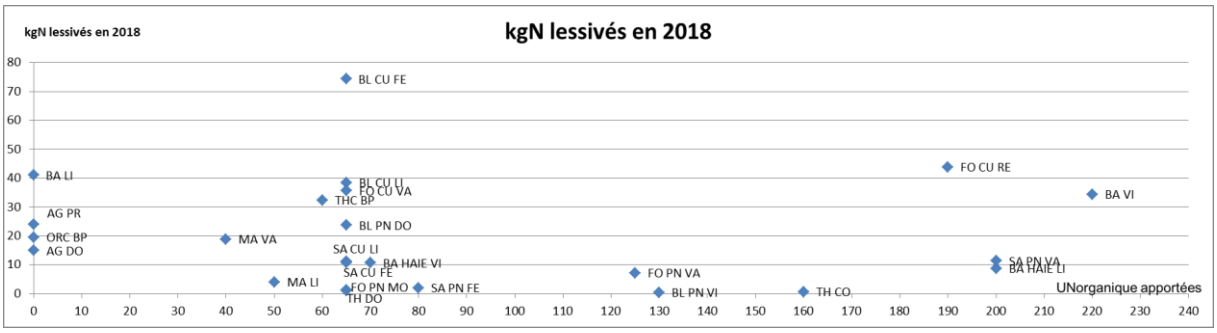


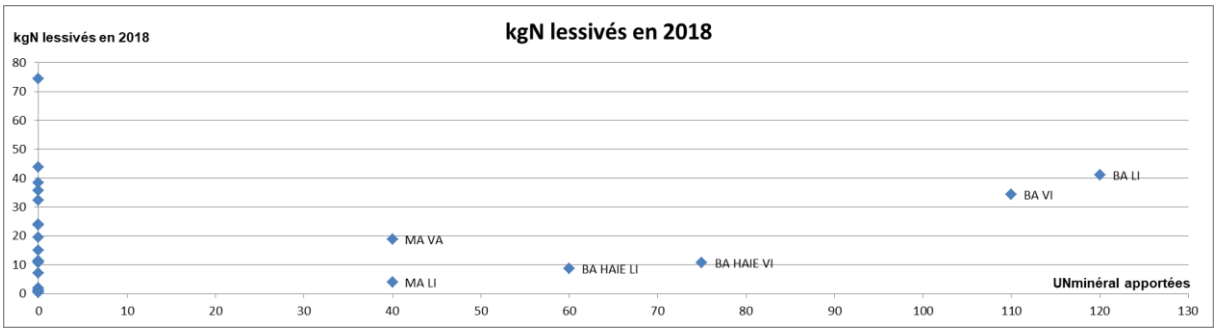

kgN lessivés en 2017
kgN lessivés en 2017
SA CU FE
BA LI
FO CU VA
FO CU RE
BA VI
BA HAIE LI
SA CU LI
SA PN VA
THC BP
BA HAIE VI
ORC BP
BL CU FE
BL CU LI
MA VA
SA PN FE
AG PR
AG DO
BL PN DO
MA LI
FO PN MO
TH DO
FO PN VA
BL PN VI
TH CO
UNtotal apportées


kgN lessivés en 2017
kgN lessivés en 2017
SA CU FE
BA LI
FO CU VA
FO CU RE
BA VI
BA HAIE LI
SA CU LI
BA HAIE VI
THC BP
SA PN VA
MA VA
ORC BP
BL CU FE
BL CU LI
SA PN FE
AG PR
AG DO
MA LI
BL PN DO
FO PN MO
TH DO
FO PN VA
BL PN VI
TH CO
UNorganique apportées


kgN lessivés en 2017
kgN lessivés en 2017
BA LI
BA VI
BA HAIE LI
BA HAIE VI
MA VA
MA LI
UNminéral apportées



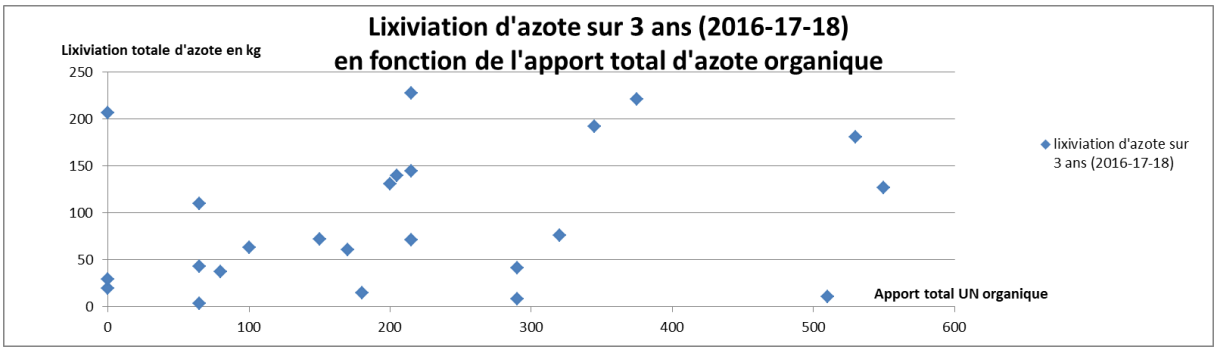




Les courbes de tendance proposées par le logiciel Excel ne montrent aucune corrélation entre les kilogrammes d'azote lessivés et les kilogrammes d'azote apportés, que ce soit au total, en minéral ou en organique. Ainsi, nous montrons qu'intrants et impacts ne sont pas deux paramètres étroitement liés. L'élimination des points semblant les plus aberrants sur chaque courbe ne permet pas non plus de dégager une courbe de tendance.

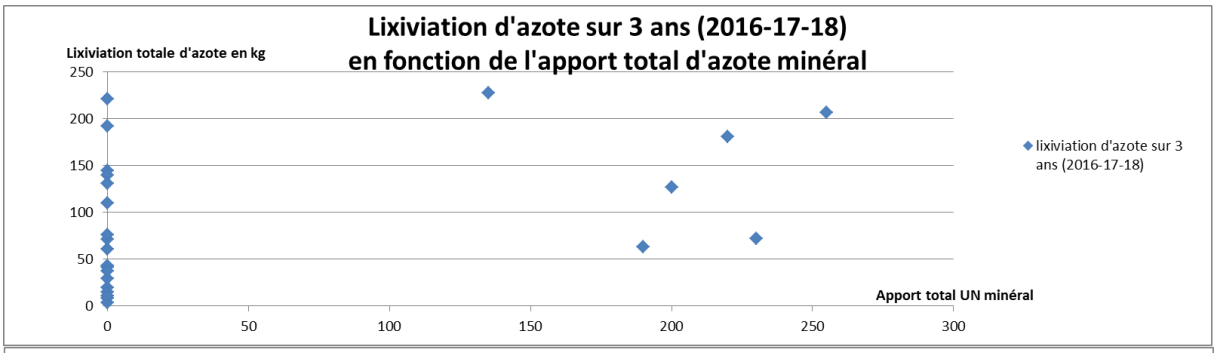
4.4.2- Recherche de lien avec la fertilisation en utilisant l'ensemble des trois campagnes de mesures

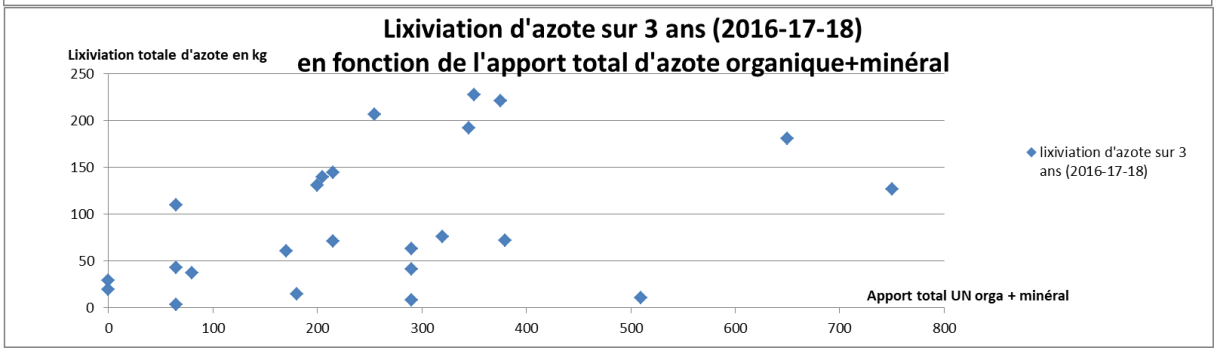
Total de l'azote qui a lixivié en fonction du total d'azote qui a été apporté, organique, minéral ou les deux :



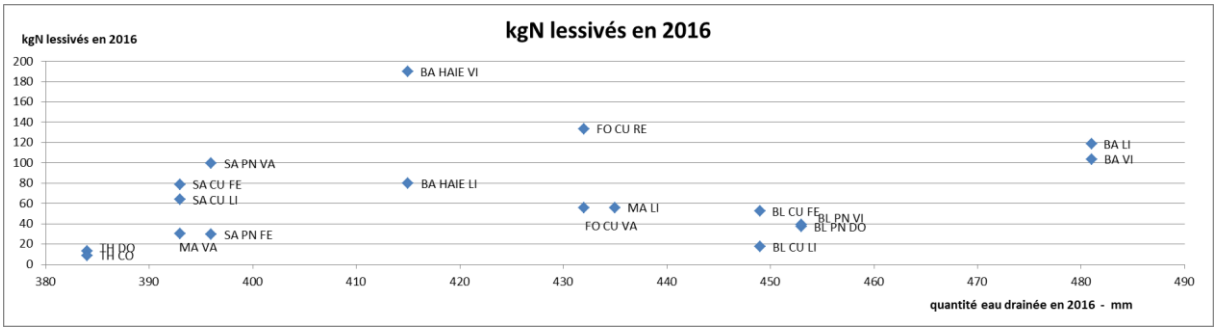
➔ La matière organique ne réagit pas sur le même laps de temps que les fertilisants minéraux, directement assimilables par la plante et dont l'azote est très mobile. Plus la matière organique a des caractéristiques qui se rapprochent du compost, plus la fertilisation se rapproche d'un amendement du sol. Il paraît donc intéressant de mettre en relation la lixiviation totale de l'azote sur un temps plus long qu'une année.
Cependant le graphique ci-dessus ne nous permet pas de dégager une courbe de tendance.

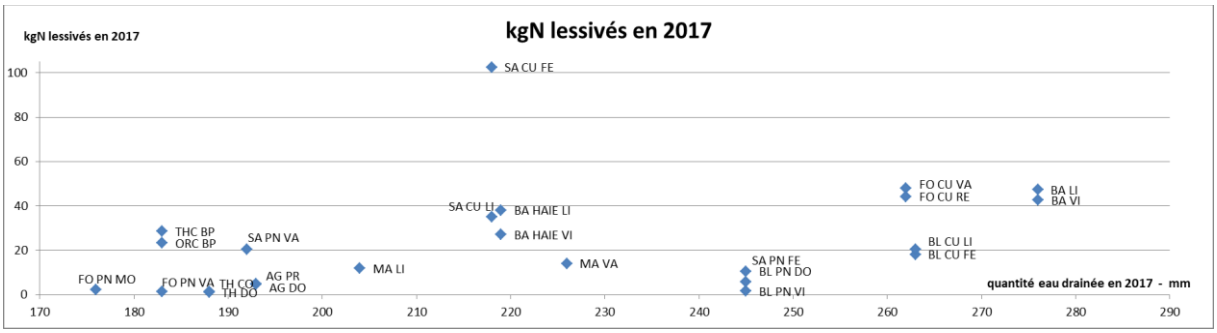
Les courbes ci-dessous réalisées en fonction de l'azote minéral et du total de l'azote apporté sur les trois ans ne permettent pas non plus de dégager une tendance :

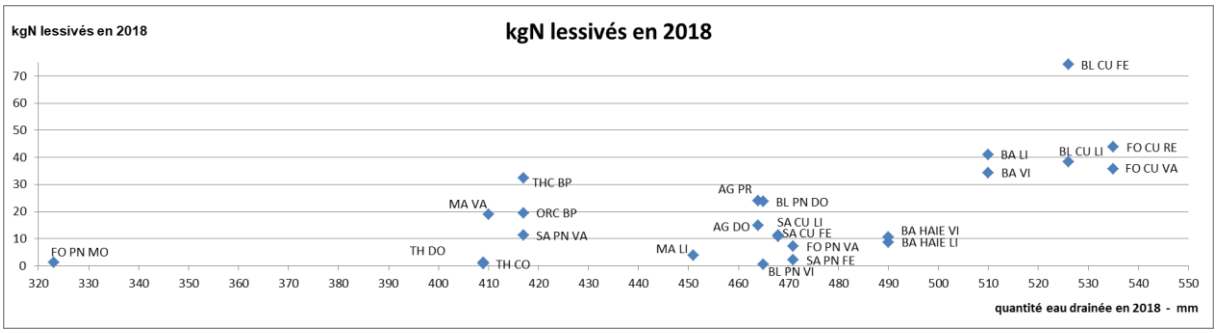




4.4.3- Recherche de lien entre quantité d'eau drainée et la lixiviation d'azote





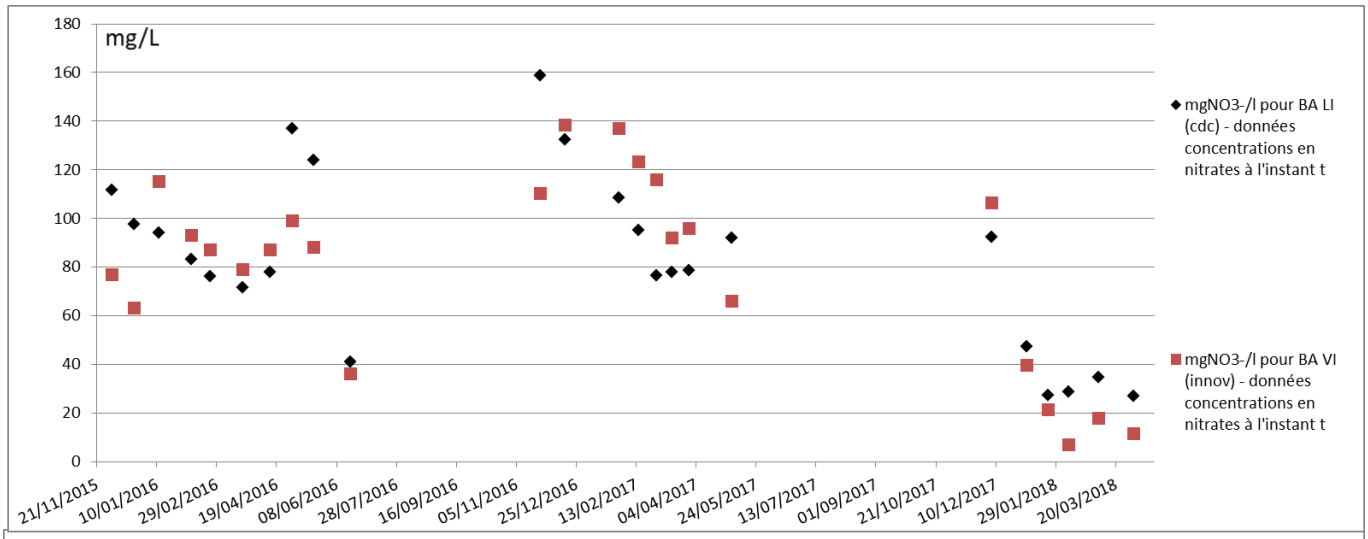


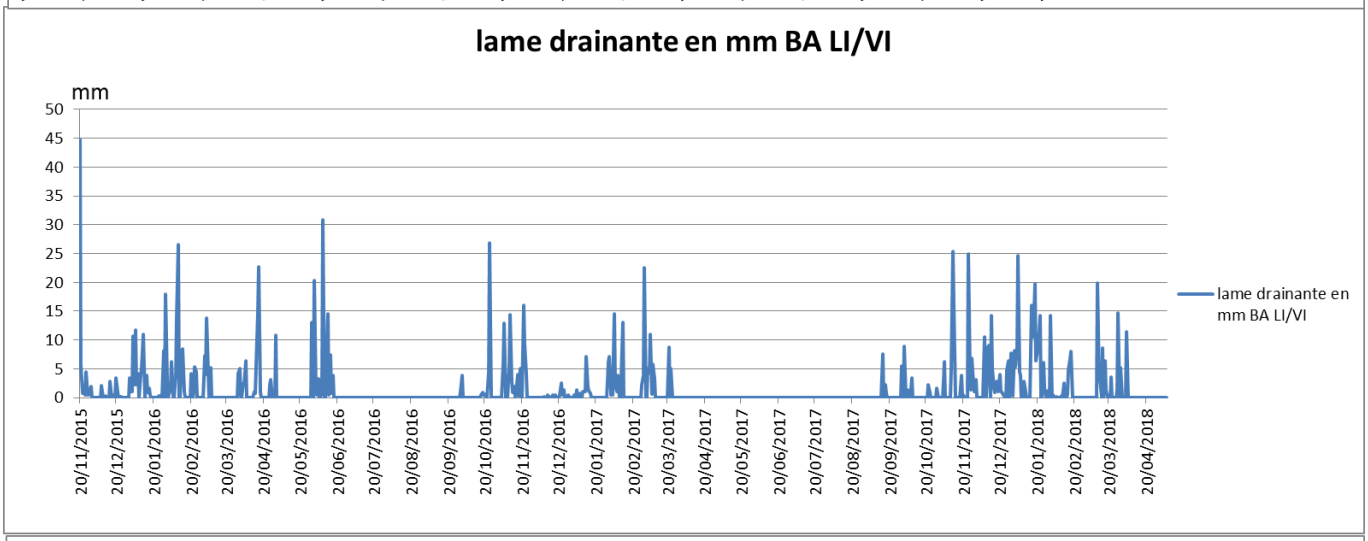
Les courbes de tendance proposées par le logiciel Excel ne montrent aucune corrélation entre les kilogrammes d'azote lessivés et la quantité totale d'eau drainée sous la parcelle, que ce soit pour l'apport d'azote au total, en minéral ou en organique. L'élimination des points semblant les plus aberrants sur chaque courbe ne permet pas non plus de dégager une tendance.

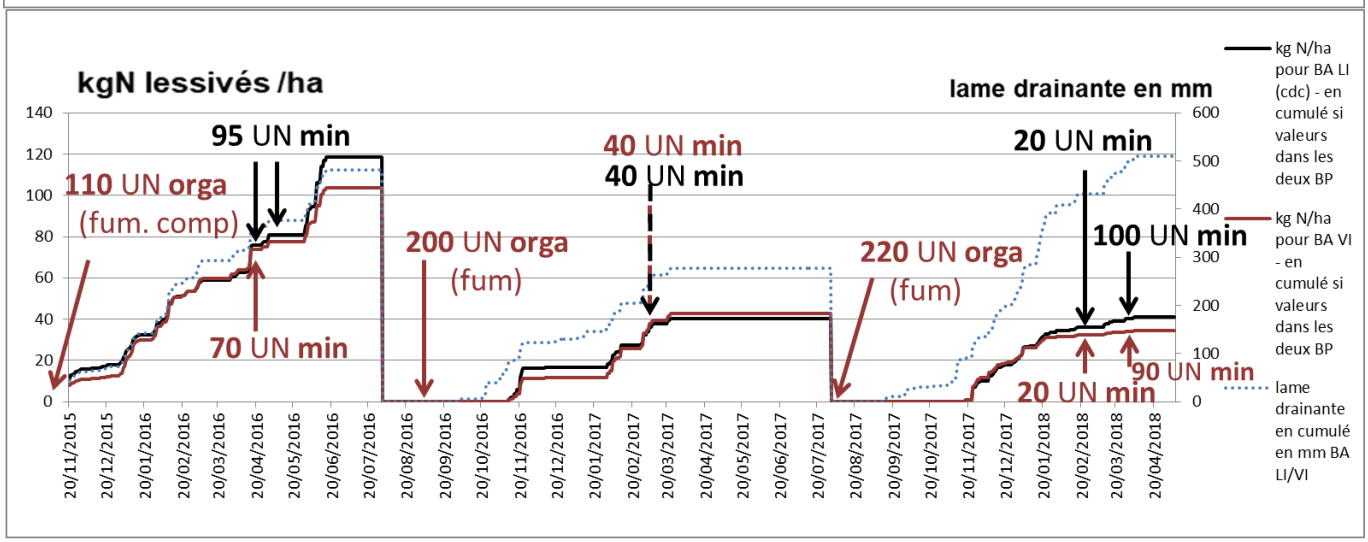
Les graphiques vont être complétés avec les données de la campagne 2019, et une distinction visuelle des points entre données sous prairies et données sous cultures permettra une meilleure interprétation des graphiques. Un traitement différent sera également réalisé entre données sous prairies et sous cultures, qui donneront peut-être de nouvelles informations. Il se pourrait en effet qu'une courbe de tendance puisse être observée avec les données sous cultures.

4.4.4- Graphiques par site

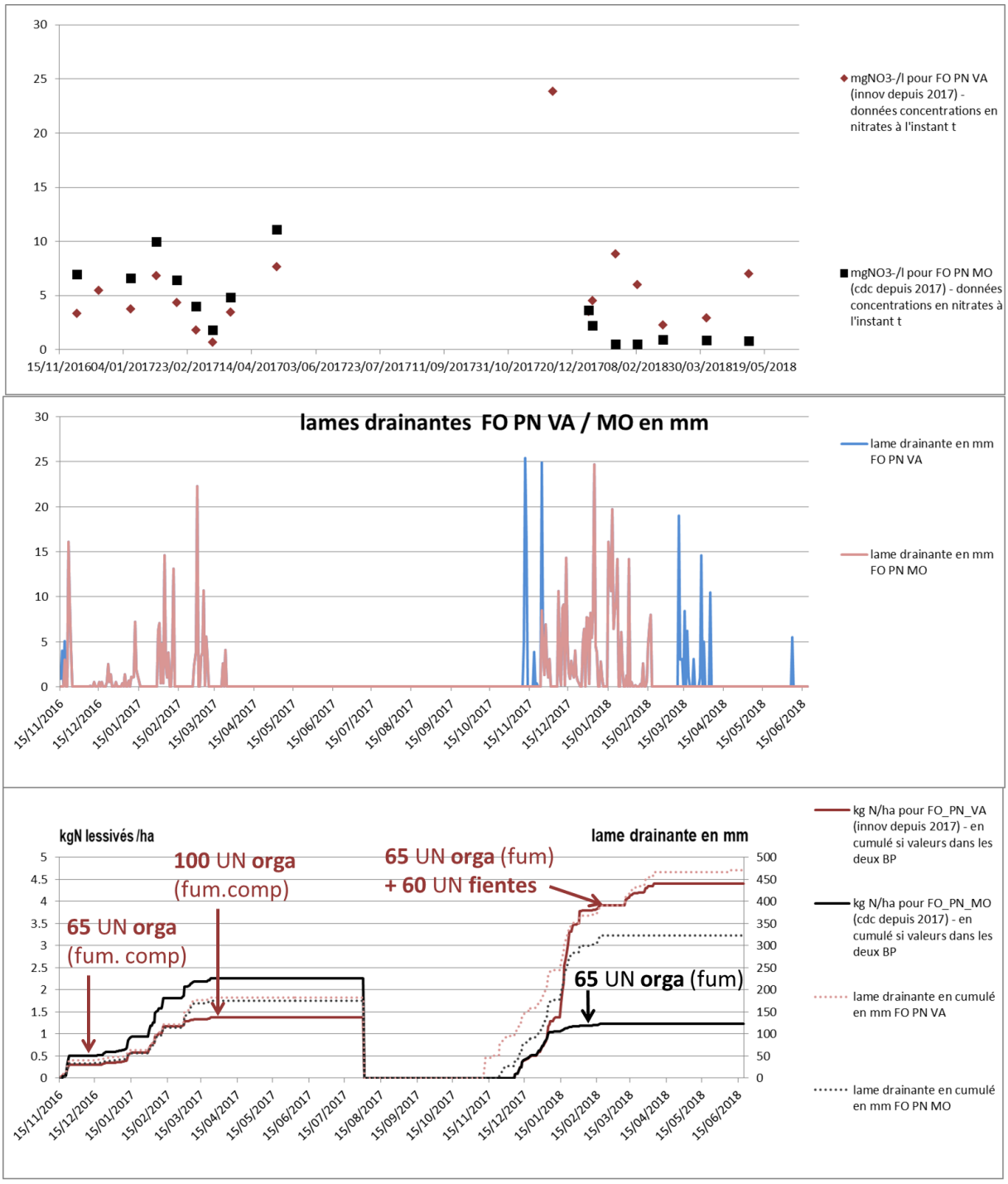
Des graphiques ont été réalisés sur les 12 sites afin d'avoir une base de discussion visuelle des observations. Deux graphiques vous sont présentés ci-dessous pour exemple.







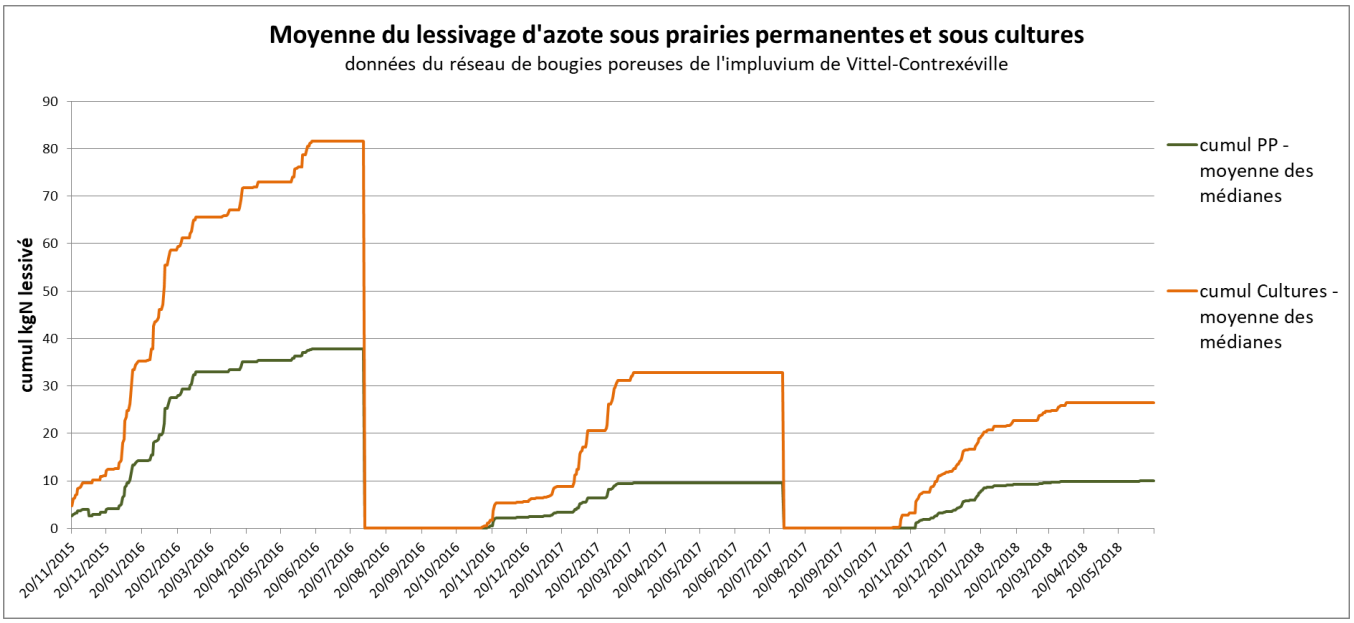
Pois *fourrager* | ***Orge*** *de printemps* | ***MPC*** *Pois, Lupin, Féverole* | ***Blé***



Prairie permanente

Beaucoup d'observations sont contre-intuitives (par exemple : fertilisation très importante mais faible lixiviation des nitrates). Le nombre élevé de biais lié au protocole (à commencer par une non répétition d'expérience) et le nombre de facteurs pouvant impacter les données rend difficile l'interprétation des résultats selon la façon classique des démarches INRA connues par les agriculteurs. Mais ces observations permettent de confirmer les hypothèses qui excluent un lien entre intrants apportés et impacts ; des hypothèses spécifiques restent à étudier de façon plus approfondies par la suite. La réunion du conseil scientifique prévue pour l'automne 2019 nous aidera également à utiliser ces observations à bon escient. L'objectif premier doit rester un dialogue avec les agriculteurs.

4.4.5- Comparaison entre les parcelles en culture et les prairies permanentes



Le total d'azote lixivié par an sous les parcelles équipées BP plus de deux fois plus faible sous prairies permanentes, quel que soit leur mode de gestion, comparé au lessivage sous cultures. Ces données sont cohérentes avec les données bibliographiques concernant l'impact positif des prairies permanentes sur la qualité de l'eau, et confirment l'intérêt de travailler au maintien de ces couverts prairiaux permanents à l'échelle du territoire et confirment l'intérêt de travailler au maintien de ces couverts à l'échelle du territoire.

4.5- Conclusion

Les premiers résultats de l'expérimentation menée depuis 2015 sur la plupart des parcelles à bougies poreuses montrent que le facteur « couvert » est prégnant dans la recherche du maintien d'une bonne qualité de l'eau sur un territoire, le facteur intrants étant secondaire. Les prairies permanentes de Vittel-Contrexéville semblent effectivement permettre une bonne qualité de l'eau quel que soit leur mode de gestion. Ces observations in situ vont donc dans le sens de différentes publications sur le sujet.

En revanche, la quantité d'azote apportée pour la fertilisation, que ce soit en minéral, organique ou au total, ne permet pas dans notre expérimentation de faire un lien avec la qualité de l'eau. La lame drainante ne semble pas non plus jouer un rôle important dans le phénomène de pollution de l'eau par les nitrates. Les prélèvements de la campagne 2019 et des campagnes futures nous offriront peut-être une meilleure opportunité de comprendre les liens entre les pratiques de fertilisation et la lixiviation des nitrates dans les sols. Il conviendra également d'étudier plus en détails les différences, si elles existent, entre les différents types de fertilisants organiques, ainsi que les différents couverts céréaliers.

En conclusion, si les premiers résultats ne nous permettent pas aujourd'hui de dégager des pratiques à la parcelle vertueuses pour l'eau ou au contraire dangereuses, ils confirment l'intérêt de réfléchir la qualité de l'eau à l'échelle d'un territoire, en travaillant au maintien ou à l'augmentation des prairies permanentes et autres couverts protecteurs de l'eau. Le développement de filières agricoles pour valoriser les produits de ces couverts vertueux est un axe prégnant du programme de recherche AGREV3DT [4] et la thématique semble intéresser les agriculteurs du territoire, comme cela a pu être observé lors de la réunion d'échange avec les agriculteurs sur les premiers résultats du dispositif de bougies poreuses.

4.6- Bibliographie

[1] Chambre d'agriculture de Rhônes-Alpes, 2012. ACTU bulletin irrigation juin 2012 V

[2] Wikipedia. Réserve utile en eau d'un sol. [en ligne]. Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9serve_utile_en_eau_d%27un_sol

[3] Cemagref et al. Guide pratique Irrigation. p.26

[4] M. Benoit, C. Klotz. « Développement territorial de la protection des ressources en eau : un projet de design territorial partagé pour l'impluvium de Vittel-Contrexéville ». 2017.

ANNEXES

Annexe 1

2017-2018

DIPLÔME D'INGÉNIEUR AGRONOME DE L'ENSAIA

Spécialité
Agricultures et Développement des Territoires

DÉVELOPPEMENT DE CULTURES ÉNERGÉTIQUES SUR L'IMPLUVIUM DE VITTEL-CONTREXÉVILLE

RENAUD BOULEC

Maîtres de stage :
Marc Benoît, Directeur de recherche INRA SAD-ASTER Mirecourt
Clémentine Frogneux, Ingénieure d'études INRA SAD-ASTER Mirecourt

Tuteur pédagogique :
Frédéric Pierlot, Maître de conférences associé et chargé de mission Expert Chambre d'Agriculture Grand-Est

Unité INRA SAD-ASTER, 662 avenue Louis buffet, 88 500 MIRECOURT

Table des matières

INTRODUCTION **2**

1. L'IMPLUVIUM DE VITTEL-CONTREXEVILLE, UN TERRITOIRE A PROTEGER **4**

1.1. HISTORIQUE 4
1.2. DESCRIPTION DE L'IMPLUVIUM DE VITTEL-CONTREXEVILLE 8

2. IMPACT DES CULTURES A BIOMASSE SUR LA QUALITE DE L'EAU **10**

2.1. PROCEDURE DE REALISATION DE LA SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 10
2.2. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 12
Introduction 12
A. PHYSIOLOGIE DU MISCANTHUS 12
A.1. Une physiologie adaptée au captage de l'azote *12*
A.2. Un recyclage utile pour réduire les besoins en azote *14*
A.3. Phase d'implantation *14*
B. COMPARAISONS AVEC D'AUTRES CULTURES 16
B.1. Une diminution du lessivage de manière générale *16*
B.2. La fertilisation azoté, son utilité et son impact *18*
Conclusion 20
2.3. COMPATIBILITE AVEC LE TERRITOIRE 22

3. ETAT DES LIEUX DES CONNAISSANCES ET DE L'INTERET DES EXPLOITANTS DE L'IMPLUVIUM POUR CES CULTURES A BIOMASSES ET LE DEVELOPPEMENT DE FILIERES. **22**

3.1. ENQUETE 24
3.1.1. Création du questionnaire 24
3.1.2. Les entretiens 26
3.1.3. Traitement des données 28
3.2. RESULTATS 28
3.2.1. Introduction de nouvelles cultures 28
3.2.2. Les opportunités et les risques liés à l'introduction de nouvelles cultures. 30
3.2.3. Les haies 30
3.2.4. Connaissance des trois cultures à biomasse 32
3.2.5. Image et sentiment général des cultures 34
3.2.5.1. Image des cultures à biomasse dans le monde agricole et ressenti propre de la fonction non alimentaire de ces cultures 34
3.2.5.2. Vision de l'impact sur l'eau de ces cultures 34
3.2.5.3. Sentiment vis-à-vis de la durée de vie de la culture 34
3.2.5.4. Sentiment au regard de la charge de travail à fournir 36
3.2.6. Étapes primordiales et freins liés à l'introduction de ces cultures 36
3.2.6.1. Les étapes importantes permettant la réussite de ces cultures 36
3.2.6.2. Freins relatifs à l'introduction de nouvelles cultures 36
3.2.7. Débouchés et filières 36
3.2.7.1. Débouché litière 40
3.2.7.2. Débouché énergie 40
3.2.7.3. Contrat et prix de vente 42
3.2.8. Intérêt de la culture et possibilité d'implantation 42

4. DISCUSSION **44**

5. DEVELOPPEMENT DE FILIERES **54**

5.1. LITIERE ANIMALE 56
5.2. PAILLAGE HORTICOLE 56
5.3. FILIERE ENERGIE 58

CONCLUSION **60**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES **62**

ANNEXES **66**

RESUME **102**

ABSTRACT **102**

POUR CITER CE DOCUMENT **102**

Introduction

Vittel et Contrexéville sont reconnues pour leurs thermes et leurs eaux naturelles minérales. Les eaux naturelles minérales se caractérisent par leur pureté originelle et par une composition en minéraux et oligo-éléments qui restent stable. L'eau minérale naturelle de Contrexéville fut l'une des premières à être reconnue par l'Académie Nationale de Médecine en 1882[1].

Ces eaux doivent donc, pour garder leur appellation d'eaux naturelles minérales, éviter tout type de pollution. Or d'après un rapport du Sénat, il est indiqué que : « … la qualité des eaux souterraines s'est dans l'ensemble beaucoup dégradée. Même si les responsabilités sont partagées, les pollutions d'origine agricole restent les premières responsables de la dégradation récente. »[2]. Il existe donc un risque majeur de pollution du fait du maillage agricole du territoire.

Nestlé Waters® a pris les devants et a créé en 1992, avec l'aide d'experts issus de divers horizons dont l'INRA, Agrivair, dont le rôle est de mettre en pratique les préconisations des chercheurs pour protéger la ressource en eau [3] afin de respecter le seuil de 10 mg/L de nitrates et l'absence de produit phytosanitaire dans les eaux. Aujourd'hui, le troisième programme de recherche AGRiculture Environnement Vittel tourné sur le Développement Territorial (AGREV 3 DT) est en cours, en partenariat avec Agrivair et les agriculteurs du territoire (description du programme en Annexe1).

Ce programme a notamment pour ambition le développement de filières à valeur ajoutée qui participent au maintien d'une eau de qualité sur le territoire. C'est dans ce cadre qu'un travail de recherche-action sur le développement de cultures énergétiques dans l'impluvium de Vittel-Contrexéville a vu le jour. L'utilisation de cultures énergétiques représenterait une réponse au risque de voir se dégrader la qualité des eaux du fait de leur impact à priori bénéfique pour l'eau. La majorité des exploitations agricoles de l'impluvium produisent aujourd'hui du lait, mais le risque existe de voir se réduire le nombre de prairies du fait de la crise qui touche le lait depuis l'arrêt des quotas en 2015. Cela occasionnerait un retournement des prairies, couverts bénéfiques pour l'eau, laissant la place aux cultures de céréales, ce qui augmenterait les risques de pollution. L'objectif est donc de maintenir une surface maximale

[1] Sur la demande d'autorisation d'exploiter, en tant qu'eau minérale naturelle, après transport à distance et après traitement, l'eau du captage « ChâtillonLorraine », situé sur la commune de Suriauville (Vosges), 2004. Académie nationale de médecine | Une institution dans son temps [en ligne]. [Consulté le 16 août 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.academie-medecine.fr/sur-la-demande-dautorisation-dexploiter-en-tant-queau-minerale-naturelle-apres-transport-a-distance-et-apres-traitement-leau-du-captage-chatillonlorraine/RAPPORT

[2] Rapport de l'OPECST n° 215 (2002-2003) de M. Gérard MIQUEL, 2003

[3] Agrivair : 25 ans au service de la protection des sources [sans date]

en prairies et de mettre en place des circuits de valorisation des cultures énergétiques à implanter sur les terres arables.

L'utilisation de cultures énergétiques s'inscrit également dans la volonté de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) qui appelle à décupler la consommation de bioénergie pour atteindre un objectif de 17 % dans la consommation énergétique mondiale en 2060, et tendre ainsi vers l'objectif de l'Accord de Paris [4].

Quel est l'impact de cultures à biomasse sur la qualité de l'eau et quelle place peuvent-elles avoir sur l'impluvium de Vittel-Contrexéville ?

Afin de répondre à cette problématique, il convient d'étudier l'impact des cultures à biomasse sur la qualité de l'eau afin de s'assurer que ces cultures jouent un rôle positif. Trois cultures ont été sélectionnées sur la base de recherches préliminaires des cultures énergétiques les plus intéressantes pour le territoire. Les trois cultures qui ont été sélectionnées sont le switchgrass, le miscanthus et le Taillis Très Courte Rotation (TTCR). Si cette étude d'impact est positive sur la qualité de l'eau et que ces cultures peuvent se développer sur le territoire, alors un état des lieux du territoire est à faire avec un travail d'enquête qui permettra de voir les connaissances des agriculteurs sur ces cultures, ainsi que ce qui pour eux est nécessaire afin de trouver une place pour ces cultures sur le territoire. Enfin, une recherche de développement de filière sera faite.

1. L'impluvium de Vittel-Contrexéville, un territoire à protéger

1.1. Historique

C'est en 1760 que les thermes de Contrexéville voient le jour à la suite de la guérison d'une jeune fille qui souffrait de calculs rénaux. Le médecin du duc de Lorraine Stanislas Leszcynski s'est alors intéressé à ses propriétés et présentera devant la Société Royale des Sciences et des Arts le 10 janvier 1760 son « Mémoire sur les eaux minérales de Contrexéville ». Cela permettra l'essor de cette eau qui attire alors de plus en plus de nobles et bourgeois. Dans les années 1770, la vente annuelle atteint les 2 000 L d'eau [5]. En 1850, un curiste ne trouve pas remède avec l'eau proposée, trop minéralisée pour son affection digestive. Il a écho d'une

[4] AIE, 2017.
[5] A travers les âges - Contrexeville [sans date]

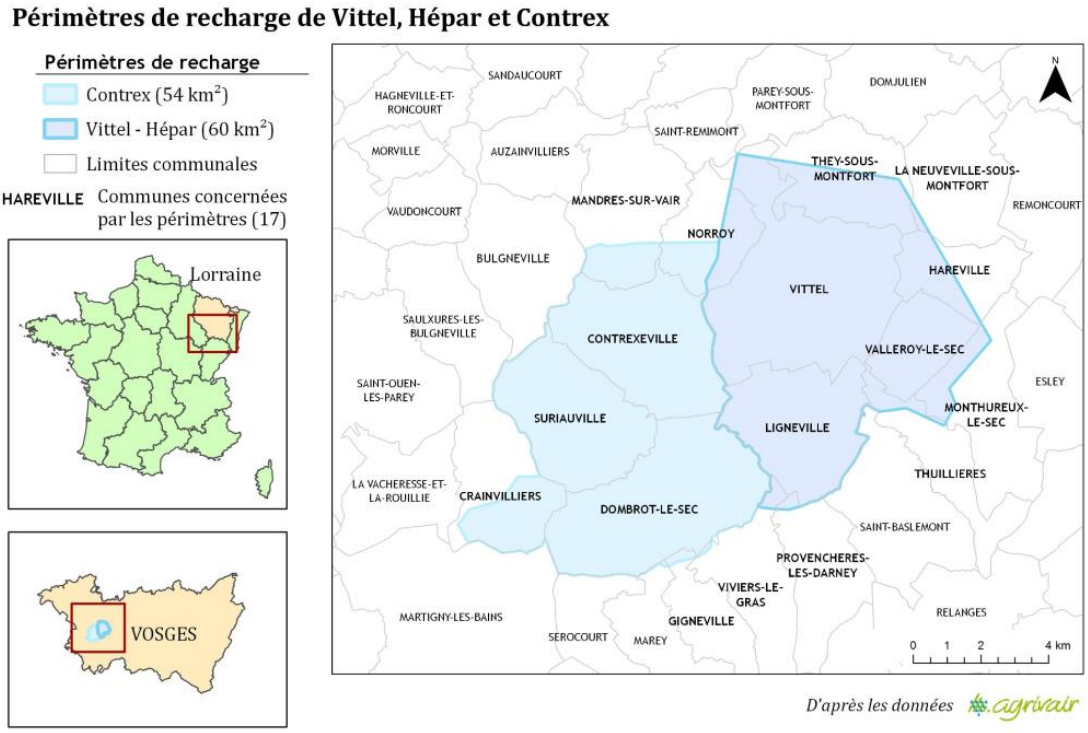


Figure 1 Localisation de l'impluvium de Vittel-Contrex

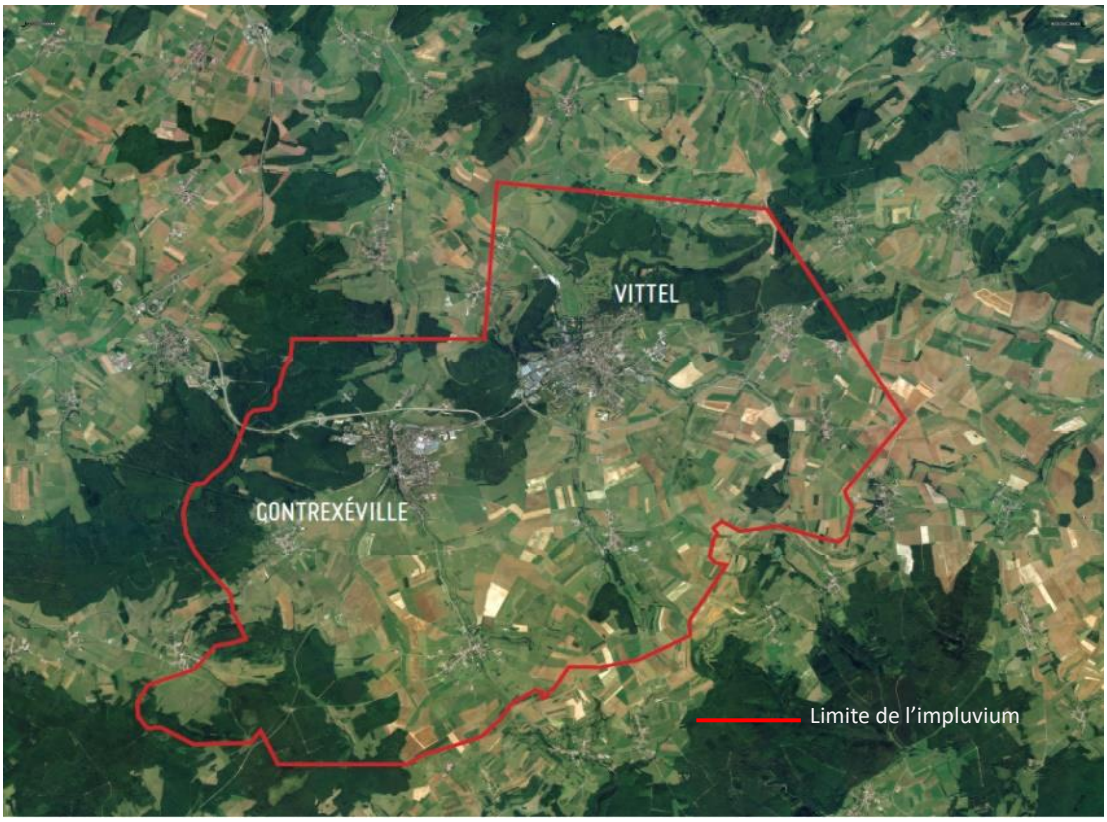


Figure 2 Photo aérienne de l'impluvium de Vittel-Contrex

autre source proche qui possède également des vertus. Cette eau jaillit dans un champ [6] et c'est en 1854 que l'avocat Louis BOULOUMIÉ fait l'acquisition de la fontaine de Gérémoy, et développe les thermes à Vittel [7]. L'eau est d'abord vendue dans des bouteilles en grès (1857) puis en verre (1870) [8] et plus d'un million de bouteilles seront vendues [6]. Avec le temps, la famille Bouloumié fait l'acquisition des différents griffons (points de jaillissement de la source) pour obtenir le monopole de la Grande Source. C'est en 1968, avec la demande d'Air France d'avoir des bouteilles plus pratiques que celles en verres [8] que la première bouteille en plastique d'eau minérale du monde est créée, cette bouteille est toujours fabriquée sur place [6]. En 1969, le groupe Nestlé® entre au capital de la Société Générale des Eaux Minérales de Vittel (SGEMV) qui a été créée en 1882 et qui regroupe les eaux de Vittel® et Hépar®. Puis en 1991, Nestlé® acquiert 96% de la SGEMV et en 1992, il y a acquisition du groupe Perrier qui possède également Contrex®. Le nouveau groupe s'appelle Nestlé Sources International puis changera de nom pour profiter des marques reconnues en s'appelant Perrier Vittel S. A. puis en 2002 se renomme Nestlé Waters S.A.S.® [9].

Dans les années 80, alors que les exploitations agricoles utilisent de plus en plus d'intrants autour des sources de VITTEL®, CONTREX® et HÉPAR®, ce qui représente un risque de pollution pour l'eau, un partenariat avec l'INRA est mis en place. Cela permettra entre autre la création en 1992 d'une filiale au service de l'environnement nommée Agrivair. C'est cette entreprise qui, avec l'appui de l'INRA, travaille sur la problématique de conservation d'une eau de qualité [10]. Ainsi, des programmes de recherche-action se sont créés sous le nom de : AGRiculture-Environnement Vittel (AGREV). C'est toujours en 1992 que le cahier des charges Vittel a vu le jour, à la fin du programme AGREV 1 (1989-1991) qui s'est focalisé sur la redéfinition des systèmes de production, s'inscrivant dans un programme de recherche portant sur les liens entre pratiques agricoles et pollution de l'eau. Le cahier des charges élaboré sur la base des propositions de l'INRA comprend notamment les mentions suivantes : suppression de la culture de maïs, chargement sur les pâtures limité à une vache par hectare, interdiction d'utiliser des produits phytosanitaires, fertilisation azoté raisonnée, assurée d'abord par les déjections animales compostées.

[6] HISTORIQUE de VITTEL [sans date]
[7] Vittel : Eau minérale naturelle - Nestlé Waters France
[8] Bouteille d'eau : son histoire, son évolution - Nestlé Waters [sans date]
[9] L'histoire de Nestlé Waters France [sans date]
[10] AGRIVAIR, la filiale de Nestlé Waters qui préserve l'environnement [sans date]

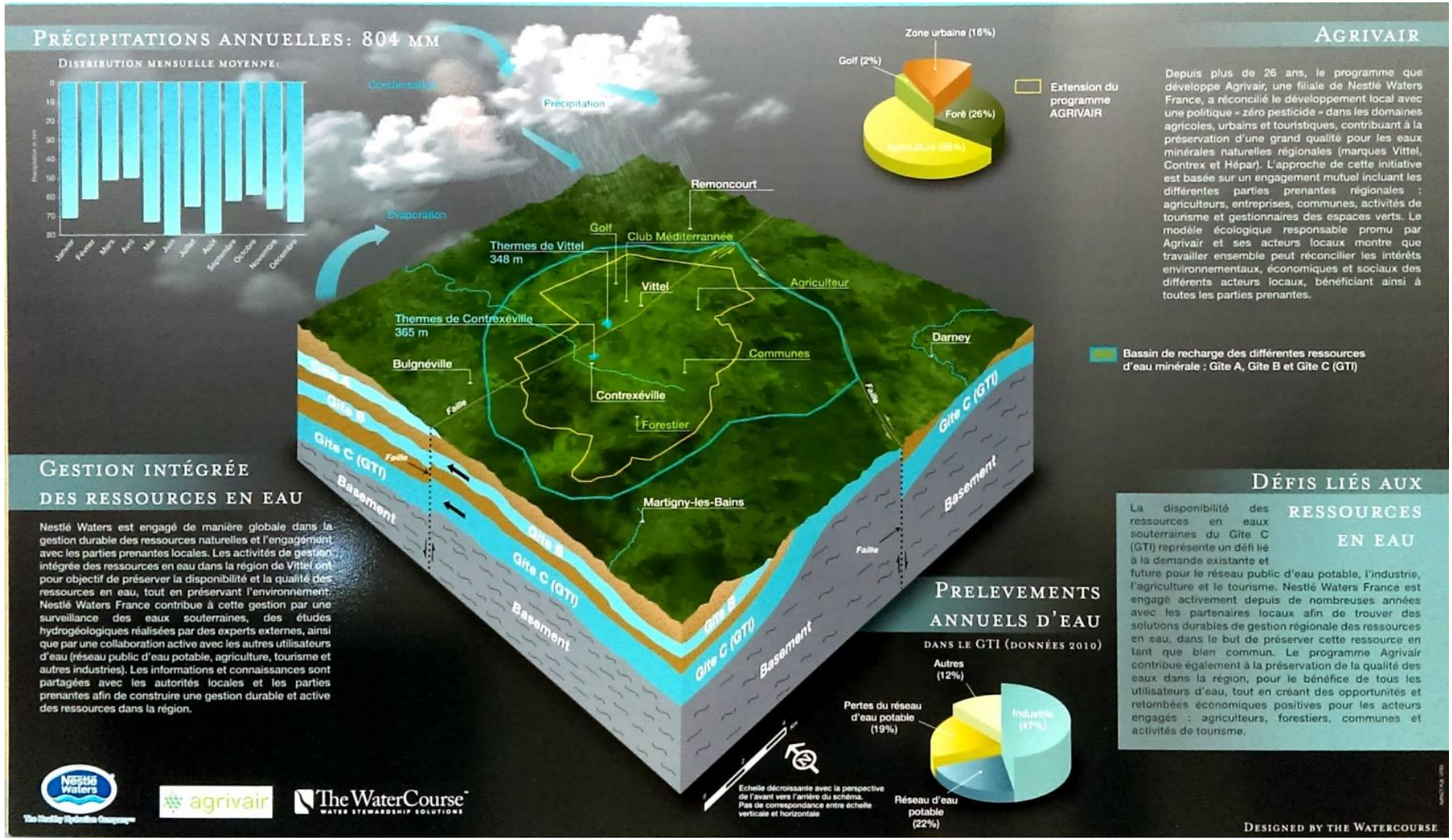


Figure 1 Coupe géologique en 3D de l'impluvium et informations sur la gestion de l'eau par Nestlé Waters®

1.2. Description de l'impluvium de Vittel-Contrexéville

L'impluvium correspond à un territoire défini selon des critères hydrogéologiques, regroupant l'ensemble du bassin versant approvisionnant les sources exploitées des eaux minérales de Vittel® et Contrex® [11].

Les eaux minérales tirent leurs caractéristiques de la géologie environnante. Sur la zone, les affleurements géologiques appartiennent au Muschelkalk supérieur composé de trois couches à savoir une couche de dolomie de Vittel, une couche à Cératites marno-calcaire et une couche à Entroques calcaire. Le pendage des couches est orienté en direction du NW. La faille de Vittel passe par la grande source de Vittel et joue un rôle important dans les flux d'eau souterrains. Trois gîtes d'eau sont présents dans différentes couches. Le principal est le GITE B et est en profondeur. Le GITE A est plus superficiel et plus petit, son eau est commercialisée sous le nom Hépar® [12]. Le GITE C, quant à lui est le plus profond (Figure 3).

La surface totale de l'impluvium représente 11 380 ha, 26 % de cette surface est représentée par les forêts et 10 % par des surfaces urbanisées [12]. Le reste étant des surfaces agricoles composées de prairies et de cultures ce qui représente une Surface Agricole Utile (SAU) de 6 343 ha. Les prairies permanentes représentent 57 % de cette SAU est sont donc majoritaires. Elles participent avec les forêts au maintien de la qualité de l'eau. Reportées à l'ensemble de l'impluvium, les surfaces qui participent à la bonne qualité de l'eau (forêt et prairies) représentent 58 % de l'impluvium.

C'est au sein de cette zone qu'intervient Agrivair. Il existe une 70aine d'exploitations qui possèdent une portion de terre au sein de cet impluvium. Sur toutes ces exploitations, une 30aine est partenaire et suit le cahier des charges proposé par l'INRA. Ces exploitations gèrent 60 % de la SAU.

Il est à noter que sur le territoire, les usines de Contrexéville et de Vittel jouent un rôle économique. En 1975, elles cumulaient 4 000 salariés. Ce chiffre a baissé depuis et atteint 1000 personnes [13]. L'entreprise a donc un rôle important sur le territoire car elle participe à l'emploi du territoire et fournit une ressource économique aux villes où elle est implantée.

[11] Vittel et son environnement [sans date]
[12] Pierre, Agrivair, 2010
[13] Nestlé Waters : la CGT réclame 44 emplois CDI, 2017

2. Impact des cultures à biomasse sur la qualité de l'eau

Afin d'obtenir des informations sur l'impact des cultures énergétiques pérennes sur l'environnement, une synthèse bibliographique a été faite. Elle a pour but dans un premier temps de montrer si ces cultures ont un impact positif sur la ressource en eau au niveau de sa qualité et donc sur leur capacité à réduire les nitrates (Annexe 2). Dans un second temps, d'autres informations ont été collectées pour connaitre leurs impacts au niveau de la quantité d'eau sur le bassin hydrographique (Annexe 3) mais également sur le cycle du carbone et sur la biodiversité (Annexe 2). Il est important de noter que la capacité de ces plantes à réduire les nitrates et les pollutions aquatiques est la condition à son développement dans l'impluvium.

2.1. Procédure de réalisation de la synthèse bibliographique

La réalisation de la synthèse bibliographique s'est orientée dans un premier temps sur l'impact de ces cultures sur la qualité de l'eau. Pour obtenir les différentes informations relatives aux cultures à biomasse, des publications scientifiques ont été utilisées. Afin d'obtenir ces publications, la base de données bibliographiques pluridisciplinaire Web of Science a été utilisée via la connexion apportée par l'Université de Lorraine. Les différents mots-clefs : miscanthus, switchgrass, water quality, short rotation coppice ont été utilisés pour effectuer les recherches. Ces recherches se sont tout de même concentrées sur le miscanthus et le switchgrass du fait de leur richesse de publication mais également pour des raisons de temps disponible.

La sélection d'un article se fait d'abord par la lecture du titre. Si le titre était en lien avec le sujet, son résumé était lu. Après lecture du résumé et des différents mots-clefs qui étaient indiqués, l'article a été lu. Les articles ont été enregistrés à l'aide du logiciel Zotero ce qui a permis par la suite de générer une référence bibliographique quasi-complète, les informations manquantes sur certains articles ont été rajoutées à la main.

Pour chaque article lu, une fiche est réalisée. Cette fiche reprend les différents arguments énoncés par les auteurs de l'article. Différents types d'arguments portant sur la qualité de l'eau mais également sur d'autres aspects comme les gaz à effet de serre et la biodiversité ont été pris en compte. Après l'obtention de plusieurs fiches, les arguments ont été classifiés pour que des mêmes arguments sur des publications différentes soient facilement retrouvables. En parallèle, une carte mentale a été réalisée afin de tirer un plan (Annexe 4). Une fois toutes ces étapes réalisées, la synthèse bibliographique a été rédigée avec insertion des références bibliographique sous la norme ISO 690.

2.2. Synthèse bibliographique

Voici un réarrangement de la synthèse bibliographique s'articulant autour de la qualité de l'eau, la synthèse globale se trouvant en annexe avec toutes les références bibliographiques :

Introduction

Depuis quelques années, des études sont faites sur le développement des cultures à valeur énergétique pérennes. En effet, les cultures à valeur énergétique annuelles comme le maïs, utilisé pour la méthanisation et les carburants de première génération, sont considérées comme rentrant en compétition avec les denrées alimentaires et utilisent de grandes quantités de produits phytosanitaires et de fertilisants qui participent à la pollution de l'eau. Les cultures pérennes à valeur énergétique comme le miscanthus, le switchgrass et les Taillis (Très) Courtes Rotation (T(T)CR) commencent à se développer et leur impact sur l'environnement est étudié. Elles peuvent être une solution pour allier production d'énergie à base de bio-ressource et faible pollution. Ce qui peut également être une des solutions de la transition énergétique.

Les TTCR sont souvent constitués de saule mais peuvent être constitués d'autres essences. Ils sont coupés tous les 3 à 5 ans et sont utilisés comme combustible. Le miscanthus (*Miscanthus x giganteus*) ainsi que le switchgrass (*Panicum virgatum L.*) sont des plantes pérennes en C4 qui représentent un grand intérêt car « elles pourraient permettre d'obtenir une production élevée associée à de faibles impacts sur l'environnement, voire à des impacts positifs » [14]. Il est à noter que les variétés utilisées sont stériles et leurs rhizomes ne sont pas traçant.

A. Physiologie du miscanthus

A.1. Une physiologie adaptée au captage de l'azote

La production dense de racines est couplée à une production profonde de racine pour ces espèces [15], [16], [17], [18], [19], [20]. En effet, les racines du Miscanthus sont présentes en grand nombre jusqu'à 100 cm de profondeur et peuvent atteindre des profondeurs de plus de 250 cm ce qui lui permet d'aller chercher l'eau en profondeur [17], [19], [20]. Ce système racinaire profond, notamment pour le Miscanthus, contribue à une augmentation de la zone de dénitrification [16].

[14] Lesur Claire et al. 2014
[15] Barco, Maucieri, Borin 2018
[16] Ferrarini, Serra, et al. 2017
[17] Joo et al. 2017
[18] McCalmont et al. 2017
[19] Sharma, Chaubey 2017
[20] Lewandowski et al. 2000

Ce système racinaire dense et pérenne participe à l'amélioration de la structure du sol [16], [18], [20]. Sous les cultures énergétiques pérennes, le sol a une meilleure porosité et une moindre compaction du fait d'une présence plus importante de racines qui forment un réseau fibreux et étendu. Cela participe à la réduction des perturbations du sol et à l'amélioration des propriétés hydraulique du sol (infiltration, conductivité hydraulique et réserve en eau) comparé aux cultures annuelles [18]. Il y a donc une augmentation de l'infiltration de l'eau [16], [21].

De plus, du fait du caractère pérenne de la plante, le Miscanthus peut encore capter l'azote minéral en automne, avant que les périodes de lessivage ne commencent [14].

Un autre facteur intervient : l'âge de la plantation. En effet, le lessivage de nitrates sous le Miscanthus décroît avec l'âge de la culture [14]. Des données montrent que les pertes d'azote en première année sous du Miscanthus sont évaluées à 154 kgN/ha en hiver puis atteignent 8 puis 3 kgN/ha lors du deuxième et troisième hiver [22]. En effet, la valeur de 3 kgN/ha se retrouve dans une expérimentation sous un Miscanthus non fertilisé lors de la troisième année, elle atteint les 30 kgN/ha lorsqu'il est fertilisé à 120 kgN/ha et ces valeurs sont proches de ce qui peut être retrouvé sous des prairies extensives entretenues [20].

A.2. Un recyclage utile pour réduire les besoins en azote

Du fait de la présence de rhizomes et de la dégradation de la matière organique par sénescence des feuilles, il y a un recyclage des nutriments qui s'effectue au niveau des cultures pérennes qui est à la fois interne et externe [19], [20], [23], [24]. Ce recyclage permet de réduire les besoins en nutriments mais également les pertes, et plus particulièrement en azote, par la mise en réserve dans les rhizomes en automne des nutriments [19], [24]. De plus, le Miscanthus et le Switchgrass ont une efficience d'utilisation de l'azote élevée [18], [19], [20], [21], [25], [26]. Cela participe à la réduction des nitrates présents dans les eaux [19], [21].

A.3. Phase d'implantation

Pour implanter ces cultures, il est nécessaire de perturber le sol, ce qui occasionne certains désagréments. Préalablement à la perturbation, il peut y avoir un fort taux de nitrate dans le sol ainsi qu'une dénitrification importante [23]. Cette perturbation occasionnée par un labour augmente l'accès des bactéries au dioxygène, ce qui augmente leur activité aérobie et donc la

[21] Chen et al. 2017
[22] Christian et Riche 1998
[23] Whitaker et al. 2018
[24] Recous, Ferchaud, Houot 2016
[25] Escobar et al. 2017
[26] Lesur 2012

minéralisation de l'azote ainsi que la nitrification. Si le labour est effectué à une mauvaise période, cela peut occasionner des pertes en nitrate car les plantes trop jeunes ne vont pas tout capter [19]. Ces différentes pertes varient suivant plusieurs facteurs à savoir le stock d'azote présent dans le sol ainsi que l'humidité du sol avant implantation [23]. Ainsi, si le sol a un faible stock d'azote et donc de nitrate, les pertes vont être réduites [14]. L'année de l'implantation, les pertes de nitrates sous Miscanthus ou Switchgrass peuvent être supérieures à celles enregistrées sous des cultures de maïs ce qui indique que l'établissement des cultures peut occasionner de fortes pertes de nitrates [19]. Une expérimentation à Orihuela (Espagne) montre que la première année de culture est celle qui a l'impact le plus fort, ce qui est expliqué dans cette étude par une forte fertilisation et une grande consommation d'eau, le tout couplé à une faible production de biomasse [25]. Lors de l'implantation du Miscanthus, 80% de l'azote présent dans la plante provient de la minéralisation de la matière organique du sol [18].

B. Comparaisons avec d'autres cultures

B.1. Une diminution du lessivage de manière générale

Les arbres, ainsi que les cultures pérennes, n'utilisent pas ou peu de fertilisation. Ils rendent un service écosystémique de « régulation de l'azote des eaux souterraines » sur le long terme [16]. Le Miscanthus, le Switchgrass ainsi que les T(T)CR, lorsqu'ils ne sont pas fertilisés, réduisent le lessivage de l'azote [14].

Un changement de culture peut donc permettre une baisse des nitrates [27]. En effet, les études suggèrent que les cultures de Miscanthus et de Switchgrass réduisent les pertes en nitrate de manière significative comparé aux cultures de céréales [19]. Il faut tout de même faire attention car les cultures précédentes ainsi que les pratiques qui leur sont associées influencent les pertes d'azote. En effet, une forte fertilisation sur le précédent induit de plus grosses pertes [14]. Dans le cadre d'une expérimentation, il a été observé que la perte de nitrates par ruissellement avec du Switchgrass est de 0,98 kgN/ha/an qui est trois fois plus faible que sous le maïs (perte de 3,22 kgN/ha/an) [19]. Un modèle SWAT « Soil and Water Assessment Tool » appliqué en Caroline du Sud étudiant les pertes d'azote de surface par écoulement sur culture de Switchgrass indique une baisse de 73% des pertes par rapport à la culture de coton [28].

[27] Keerthi, Miller 2017
[28] Sarkar et Miller 2014

Christian et Riche (1998), montrent que le lessivage sous les cultures de maïs-soja entraine 40 kgN/ha/an, la culture de Switchgrasse permet une réduction de 97 % soit un lessivage de 1,4 kgN/ha et le Miscanthus permet une réduction de 93 % soit un lessivage de 3 kgN/ha [21]. Le Switchgrass irrigué peut réduire le lessivage annuel de NO3-N par 99 % comparé à la culture irriguée de coton avec une absorption de 95 % pour le Switchgrass contre 27 % pour le coton (avec une fertilisation de 124 kgN/ha pour le Switchgrass irrigué contre 138 kgN/ha pour le coton irrigué). Des résultats similaires sont observés pour le Miscanthus où la réduction est de 98 % comparée au niveau de référence du coton [21].

Un modèle SWAT montre qu'une modification de l'assolement par introduction de miscanthus sur 10 % des terres permet de réduire la concentration de nitrate-azote des flux d'eau de 6,4 % à la sortie de la rivière Salt Creek (Illinois) [21]. La conversion en Miscanthus, avec une fertilisation de 90 kgN/ha, de 10, 25 ou 50 % des surfaces cultivées en maïs-soja dont uniquement le maïs est fertilisé avec 190 kgN/ha, permet une diminution des nitrates de 6,5 ; 16,5 et 29,5 % [14]. Sous une culture de Miscanthus non fertilisé, l'azote inorganique lessivé est de 1,5 à 6,6 kgN/ha/an contre 34,2 à 45,9 kgN/ha/an sous des rotations de maïs-soja. Ces baisses de lessivage peuvent être expliquées en partie par le couvert du sol procuré par les feuilles [26]. De plus, le Miscanthus peut encore capter l'azote minéral en automne, avant que les périodes de lessivage ne commencent [14]. D'après Sharma & Chaubey (2017), le Switchgrass et le Miscanthus ont neuf fois moins de pertes de nitrate en profondeur que la culture de maïs ou les rotations maïs-soja [19]. Il existe cependant des rapports qui indiquent une perte importante de nitrates sous les cultures de Miscanthus, ce qui laisse supposer que des études sont nécessaires pour aller plus loin sur l'explication des différences de pertes de nitrates [19].

Pour les TTCR, les pertes de nitrates sont plus faibles que celles des cultures arables et on peut observer que 87,5% de nitrates qui proviennent des cultures de T(T)CR étudiées sont dues à une fertilisation azotée [29].

B.2. La fertilisation azoté, son utilité et son impact

Le besoin en fertilisation de ces cultures ne fait pas consensus. Le Miscanthus et le Switchgrass peuvent pousser et garder leur forte productivité sur de longues périodes sans que la fertilisation ne soit nécessaire [19]. Le Miscanthus n'a pas de réponse significative à des apports d'azote en dehors des premières années [20] et il n'a pas de réponse significative à de

[29] Holland et al. 2015

fortes concentrations d'azote [18]. Le rendement maximum est observé lorsqu'il n'y a pas de fertilisation, mais avec tout de même la présence dans le sol d'azote minéral à hauteur de 50 kgN/ha [18]. De plus, l'utilisation d'azote radioactif a permis de montrer que la plus grande part de l'azote trouvé dans la plante ne vient pas de la fertilisation mais de la minéralisation des dépôts du sol [20].

A l'inverse, plusieurs rapports expriment le fait qu'une fertilisation, bien que faible, est recommandée [14], [20], [23], [29]. Pour permettre un bon développement du rhizome, il est conseillé d'apporter de 50 à 60 kgN/ha/an [18], [20], [30]. Les études indiquent que l'utilisation de Miscanthus permet l'observation d'une baisse des nitrates présents dans les systèmes aquatiques lorsqu'il y a une fertilisation allant jusqu'à 80-100 kgN/ha [29].

Certains scientifiques argumentent que les faibles pertes de nitrates sous le Miscanthus et le Switchgrass sont dues simplement aux faibles besoins en fertilisation mais cela ne concorde pas avec les pertes observées sous des cultures de soja sans fertilisation [19]. Le système racinaire joue un rôle important dans la limitation des pertes. Avec un système racinaire étendu couplé à un recyclage des nutriments par la perte des feuilles et la relocalisation dans le rhizome, la fertilisation, si appliquée, peut être minime [19], [20]. Les apports ne doivent pas excéder les quantités exportées lors de la récolte à savoir pour le Miscanthus : 70 kgN/ha, 10 kgP/ha et 105 kgK/ha [26].

Cependant, la fertilisation n'est pas unanimement recommandée les premières années, car elle présente le risque de favoriser la pousse d'adventices [19]. De plus, une forte activité de la nitrogénase la première année au niveau des rhizomes et du sol est observée [18], ce qui doit pouvoir permettre une fourniture sans intervention. Shield et al (2014) expriment le fait que l'état en nutriment du sol dirige l'établissement de la culture et est la clé pour déterminer les besoins en fertilité [18], [31].

Conclusion

Les cultures pérennes à valeur énergétiques représentent un intérêt certain pour la protection de la ressource en eau et plus particulièrement pour la limitation des concentrations en nitrate de l'eau. En effet, ce sont des plantes qui sont pérennes et qui, de ce fait, vont couvrir le sol en continu pour une longue durée. Ces plantes agissent sur le cycle de l'azote en étant des grandes consommatrices d'azote. Du fait d'une fertilisation nulle ou minime, pour combler les exportations de la récolte, il n'y a pas d'apports en excès d'azote sur les cultures.

[30] Goulding et al. 1998
[31] Shield et al. 2014

DIAGRAMME CLIMATIQUE COURCELLES-CHAUSSY

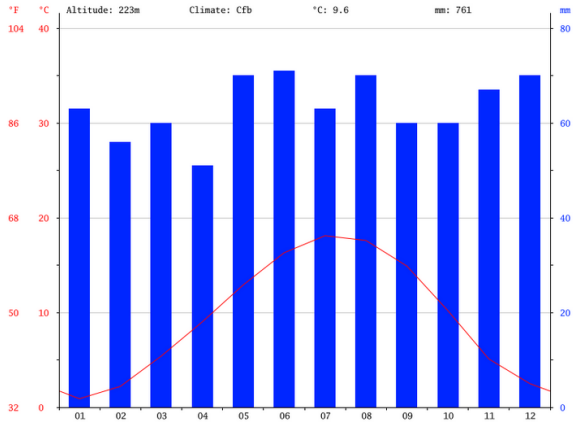


DIAGRAMME CLIMATIQUE VITTEL

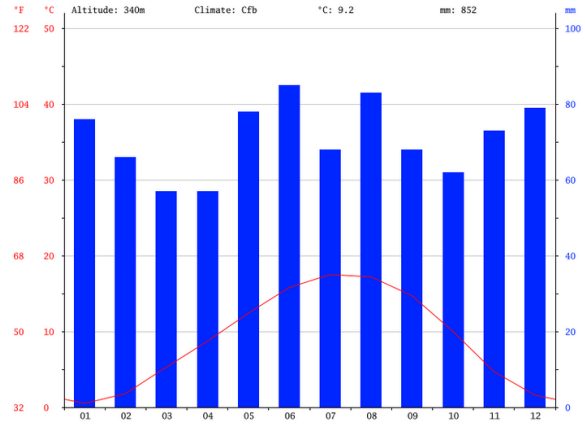


Figure 2 : Diagramme climatique de Courcelles-Chaussy et Vittel [32]

Des pertes d'azote peuvent tout de même avoir lieu, lors de l'implantation où le sol est perturbé, ce qui augmente la minéralisation ainsi que la perte de minéraux par érosion.

2.3. Compatibilité avec le territoire

Cette synthèse bibliographique a permis de voir que les cultures pérennes à valeur énergétique contribuent de manière positive à la protection de la ressource en eau en limitant la présence d'azote. Un point de vigilance est à apporter lors de l'implantation qui peut occasionner des pertes. Mais au regard de la durée de vie et de la non-intervention, ces pertes sont faibles. La question de l'utilisation de produits phytosanitaires devra être abordée pour répondre aux exigences du cahier des charges d'Agrivair. Ces plantes sont donc des candidates intéressantes pour un développement dans l'impluvium.

En comparant les données climatiques de Vittel à celles de Courcelles-Chaussy [32] où des cultures de miscanthus sont présentes, on observe que la variation maximale des précipitations à Courcelles-Chaussy est de 20 mm et elle est de 17,2 °C pour la température. A Vittel, l'écart maximal enregistré est de 28 mm pour les précipitations et de 17°C pour la température. Il fait en moyenne plus chaud à Courcelles-Chaussy qu'à Vittel (9,6°C contre 9,2°C) mais il y a plus de précipitation à Vittel avec 852 mm contre 761mm ce qui est positif au vu des besoins en eau du miscanthus. De plus, on peut voir que les températures sont très proches et que la plus grande différence se fait sur les précipitations. Or, cela ne pose pas de problème pour leur développement.

De ce fait, les cultures sont compatibles avec le territoire et peuvent être implantées. En effet, elles répondent à la condition d'avoir un impact positif sur la réduction des nitrates et le climat est adapté à leur développement. La question est donc de savoir si les agriculteurs ont connaissance de ces cultures à biomasses, comment ils les perçoivent et qu'est ce qui peut contribuer au développement d'une filière ?

3. Etat des lieux des connaissances et de l'intérêt des exploitants de l'impluvium pour ces cultures à biomasses et le développement de filières.

Pour pouvoir obtenir ces informations, un questionnaire a été élaboré (Annexes 5 et 6).

[32] Climat Vittel: Diagramme climatique, Courbe de température, Table climatique pour Vittel - Climate-Data.org [sans date]

3.1.Enquête

3.1.1. Création du questionnaire

Le questionnaire s'articule autour de plusieurs phases. La première phase a pour but d'obtenir des informations sur les motivations à l'implantation de nouvelles cultures. Étant donné que l'ensemble du programme de recherche AGREV3DT se construit avec les agriculteurs de l'impluvium, les enquêtes représentaient l'occasion de faire émerger de nouvelles idées. Les premières questions n'étaient donc pas uniquement centrées sur les cultures à biomasse et les agriculteurs étaient invités à parler de toutes les cultures qui les intéresseraient. Cela peut permettre de voir si les agriculteurs ont des envies communes et de connaitre leur perception des opportunités et freins à l'implantation de toute nouvelle culture.

Dans sa deuxième phase, le questionnaire tourne autour de la ressource en biomasse (existante et potentielle) dans le territoire.

Concernant l'existant :

- Le territoire possède un grand linéaire de haies qui représentent, pour le moment, la plus grosse partie des cultures à biomasse présentes sur les terres agricoles. Concernant le potentielle, le questionnaire a été construit de cette façon :

- Présentation des trois cultures à biomasse en prenant comme support l'itinéraire technique global de chacune des cultures.

- Questions autour des connaissances des agriculteurs vis-à-vis de ces dernières mais également des supports sur lesquels ils ont pu en entendre parler ainsi que de leurs aprioris et questionnements.

- Travail autour des débouchés, des filières qu'il serait possible de créer sur le territoire et des modalités permettant une bonne intégration des agriculteurs. Les filières possibles, identifiées sur le territoire sont : le débouché énergie, le débouché litière équin et le débouché paillage horticole.

- La possibilité d'implanter ces cultures est évoquée ainsi que la zone parcellaire où elles pourraient être implantées avec un regard sur l'impact paysager.

Pour certaines questions, plusieurs critères étaient présentés et les exploitants devaient les positionner sur un axe gradué en fonction de leur degré d'importance. Le but étant d'obtenir leur perception pour chaque critère et de les classer entre eux. D'autres questions demandaient un classement de leur part, sans proposition de réponse fournies. De ce classement, un système de pondération a été attribué. 5 points sont attribués à la réponse de

tête du classement puis 3 et enfin 1. Si une seule réponse est donnée, la pondération est de 5, de même si uniquement deux réponses sont données, 5 et 3 points sont attribués.

Un test a été effectué avec les deux premières exploitations ce qui a permis d'affiner et de modifier certaines questions. Cela explique la différence du nombre d'individus pour certaines questions.

3.1.2. Les entretiens

La cible principale du questionnaire est le chef d'exploitation qui est partenaire d'Agrivair et qui possède des surfaces de cultures de vente dans l'impluvium. Ces exploitants ont tous un atelier de production animale. Par la suite, les agriculteurs non partenaires seront également contactés.

Pour identifier ces exploitants, le logiciel d'information géographique QGIS a été utilisé avec les couches vectorielles d'Agrivair et de l'INRA. Les agriculteurs partenaires donnent les différentes informations PAC à Agrivair ce qui permet de référencer les parcelles obtenues avec le cadastre directement sur le logiciel. Par agriculteur partenaire, une sélection des parcelles en prairie est réalisée pour identifier les exploitations qui possèdent uniquement des prairies et celles qui ont des cultures de vente. Les informations sur l'autoconsommation de ces cultures n'étant pas disponibles, la question a été soulevée lors des rencontres, le but n'étant pas de placer des cultures à biomasse sur des terres valorisées par l'élevage. De plus, des cartes par exploitation ont été réalisées pour permettre aux exploitants d'identifier des parcelles où pourraient être implantées ces nouvelles cultures.

Après identification des exploitations à aller enquêter, des rendez-vous ont été pris. Cela permet de voir leur ressenti et d'être à leur écoute sur leurs questionnements et leurs impressions, ce qui peut amener à d'autres sujets de discution. Lors des enquêtes, les questions ont été posées le plus possible de la même manière pour éviter de créer des biais, surtout au niveau des questions qui ont pour but de mettre une note aux réponses. Des difficultés ont été rencontrées sur certaines questions qui ne seront pas traitées du fait d'un trop faible taux de réponses.

Concernant le nombre d'exploitants enquêtés, 10 exploitations ont été enquêtées sur 18 potentielles. Ce nombre est relativement faible du fait à la fois du nombre d'exploitations partenaires répondant aux critères de sélection, d'une période d'enquête qui s'est déroulée durant les fenaisons et d'un non intérêt pour les cultures à biomasses de la part de certains

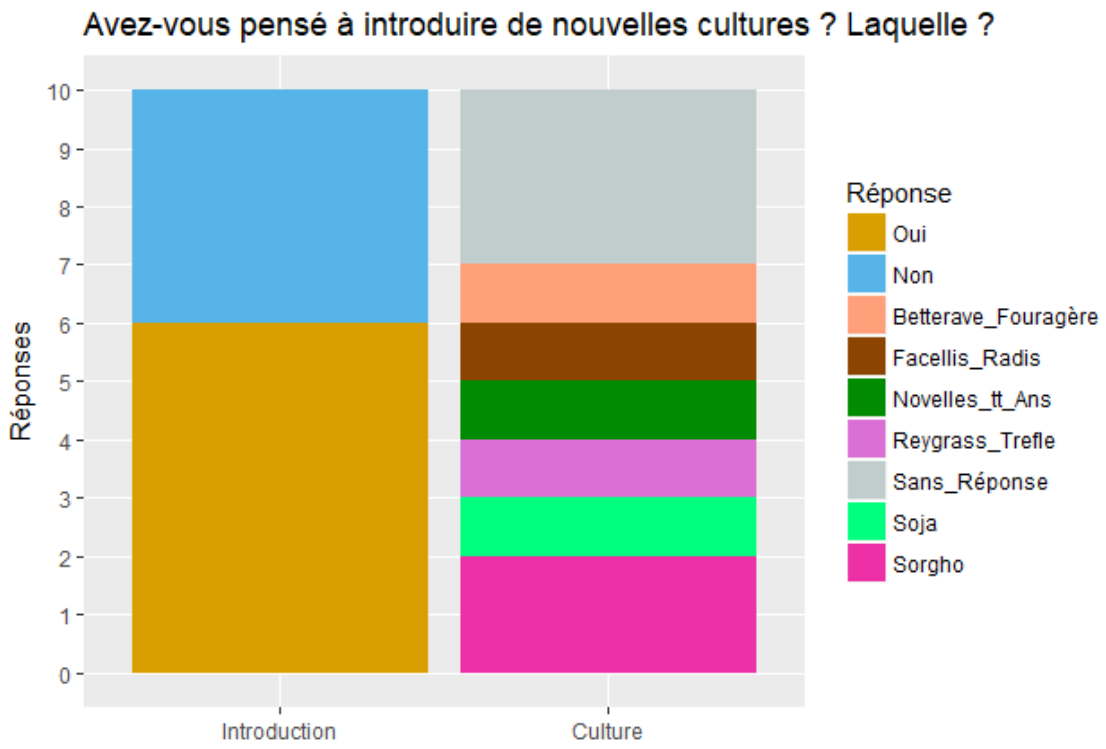


Figure 3 Volonté d'introduire de nouvelles cultures

agriculteurs qui avaient eu vent de mes enquêtes ou qui se doutaient du sujet et qui ne voulaient pas m'accorder du temps. En effet, lors de la prise de rendez-vous, le sujet principal donné pour l'enquête est l'implantation de nouvelles cultures. Il a été choisi de ne pas parler directement des cultures à biomasse pour laisser un maximum de portes ouvertes et parce que les premières questions du questionnaire restent générales sur l'implantation de tout type de culture. De plus, parmi les 10 exploitants enquêtés, un exploitant n'a pas voulu répondre aux questions portant sur les cultures à biomasse pour des motifs de non accord avec ces pratiques. D'autres exploitants n'étaient pas non plus en accord avec ces cultures mais ont tout de même mené à bien le questionnaire.

3.1.3. Traitement des données

Après avoir enquêté un exploitant, les données ont été numérisées pour permettre un traitement informatique. Les informations qui peuvent être représentées sous forme graphique pour une meilleure lisibilité ont été traitées sous le logiciel R. Cela a permis d'obtenir une vision globale à la fois des connaissances des agriculteurs, de leurs envies et des raisons de certaines pratiques mais également de l'importance de certains critères à la fois pour introduire une nouvelle culture dans leur exploitation ou pour se lancer dans une production. Pour les autres informations recueillies, elles seront traitées suivant leur importance avec un traitement spécifique.

3.2.Résultats

3.2.1. Introduction de nouvelles cultures

Lorsque les exploitants ont été interrogés sur leur volonté d'introduire de nouvelles cultures, quelles qu'elles soient, ils répondent à une faible majorité « Oui ». Lorsqu'on leur demande quelles cultures pourraient être introduites, certains répondent des cultures déjà introduites sur leur exploitation, d'autres des cultures qu'ils aimeraient introduire. Les raisons de l'introduction de ces cultures varient. Concernant les exploitants ayant répondu « Oui », l'introduction de nouvelles cultures vise à participer à l'alimentation du bétail pour 3 d'entre eux. Les autres raisons évoquées sont l'aspect économique et écologique. Ceux qui ont répondu « Non » ne voient pas l'intérêt d'introduire de nouvelles cultures, soit parce qu'ils n'en ont pas le besoin ou l'envie ou bien parce qu'ils ont besoin de pâturages plus que de céréales.

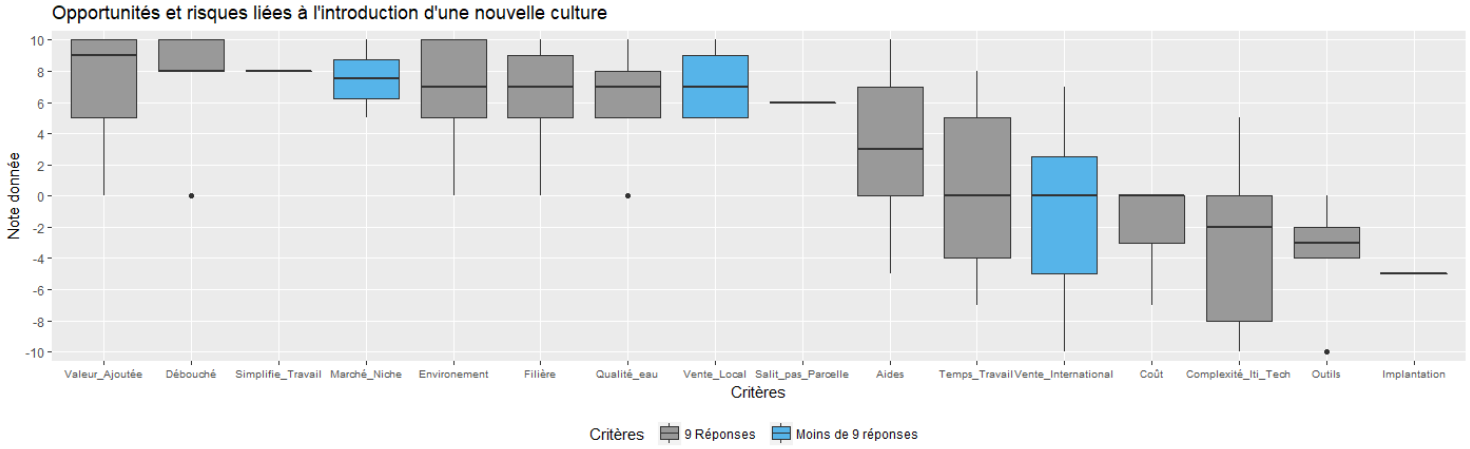


Figure 4 Opportunités et risques liés à l'introduction d'une nouvelle culture

3.2.2. Les opportunités et les risques liés à l'introduction de nouvelles cultures.

Différents critères ont été proposés pour cette question. Les exploitants devaient les classer sur une échelle graduée. Ils avaient également la possibilité de donner d'autres critères qui leur semblaient important. Une fois toutes les données collectées, des boîtes à moustaches ont été réalisées et ordonnées par ordre décroissant de la valeur de la médiane. Cela permet de voir les critères qui sont perçus comme étant opportuns.

La valeur ajoutée et le débouché sont les opportunités les plus grandes d'après eux suivi du marché de niche qui a été mentionné par deux agriculteurs. Un a mentionné comme opportunité la simplification du travail qu'une nouvelle culture peut permettre. Vient ensuite l'aspect environnemental et protection de l'eau qui ont la même médiane que la filière et la possibilité de vendre en local. La répartition par contre varie légèrement. Ainsi, l'environnement et la filière ont eu des réponses plus variables que les critères qualité de l'eau et vente en local dont les étendues de réponses sont plus faibles. Il est à remarquer que les aides ne sont pas considérés comme une opportunité forte. Le temps de travail quant à lui a sa médiane au niveau du 0 mais il est considéré comme une opportunité possible ou comme un risque suivant les exploitations. Cela dépend si ce temps est important ou non. Le reste des critères est considérées comme des risques à savoir le coût, la complexité de l'itinéraire technique et les outils nécessaires. Bien que sa médiane soit à -2, l'itinéraire technique est un critère qui a une répartition plus grande au niveau risque.

Lorsqu'il leur a été demandé s'ils connaissaient des cultures répondant au maximum à ces opportunités, 5 exploitants ont répondu « Oui » et 4 ont répondu « Non ». Les cultures données répondant d'après eux à ces opportunités sont l'avoine, la luzerne, le Ray Grass avec du trèfle, l'épeautre, le pois en mélange et pour un exploitant le miscanthus. Cette exploitation a pour projet de cultiver du miscanthus hors de l'impluvium pour valoriser une parcelle et surtout pour être utilisé dans un méthaniseur. Lorsqu'il leur a été demandé quelles cultures s'orientaient le plus vers les risques, le méteil a été donné car il salit le sol, les céréales comme l'orge d'hiver, le blé d'hiver, le maïs, le colza et le tournesol et enfin la betterave ont également été citées.

3.2.3. Les haies

Le territoire possède un linéaire important de haies de 240 km d'après le recensement d'Agrivair, dans l'impluvium et aux alentours. Les exploitants rencontrés estiment qu'ils possèdent de 0,5 à 10 km de linéaire de haies. Pour certains, ces haies sont jeunes et pour

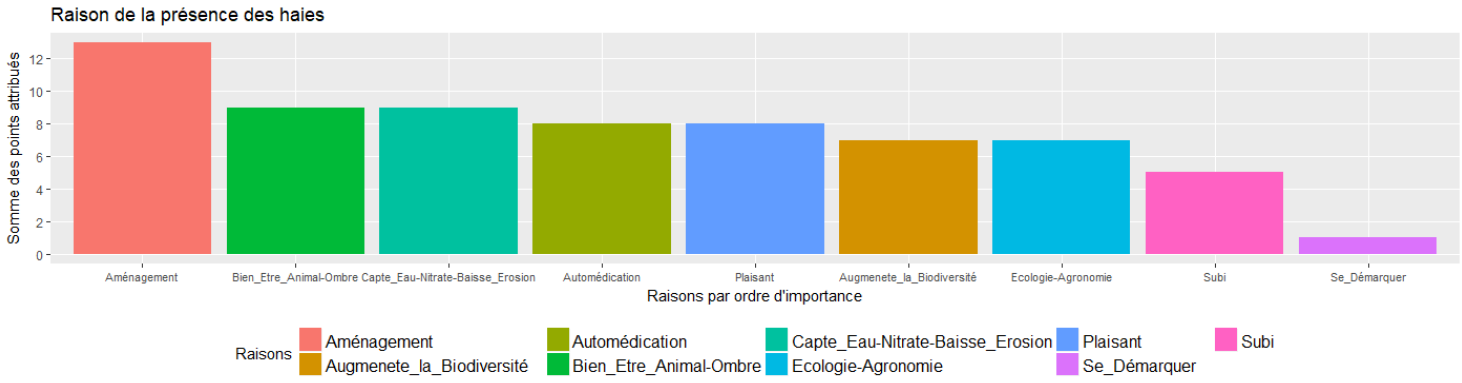


Figure 5 Les raisons de la présence de haies

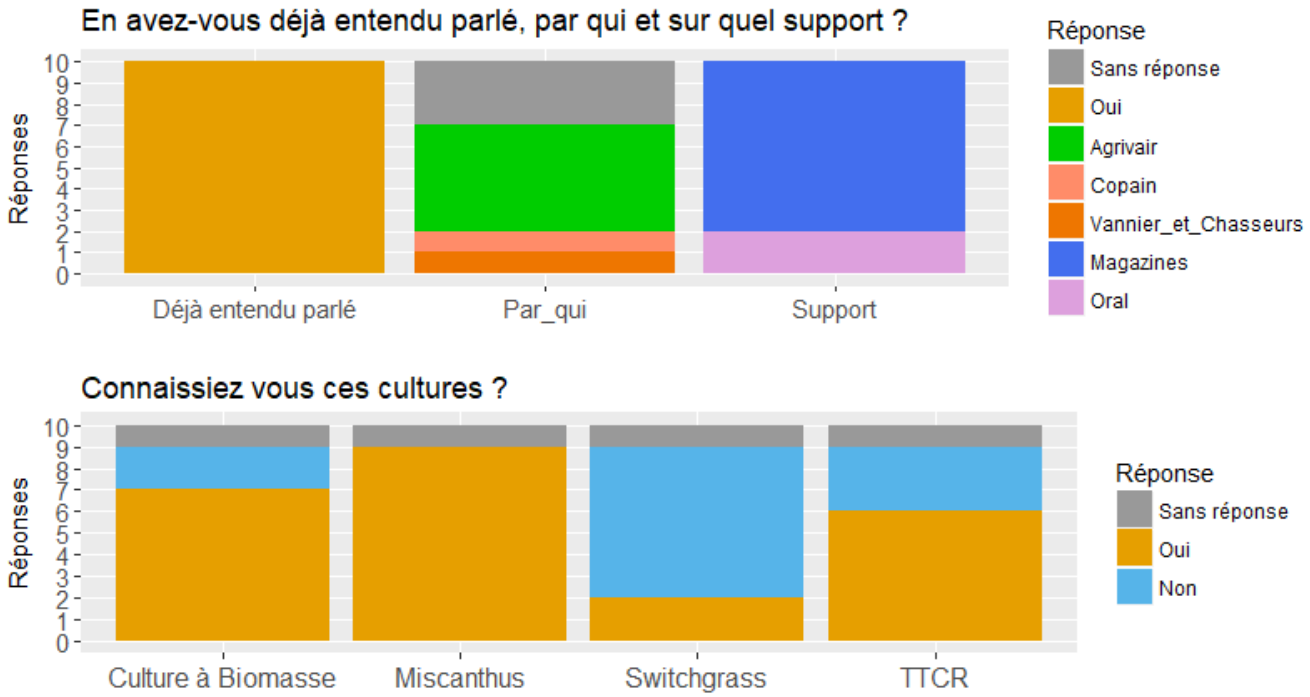


Figure 6 Etat des lieux des connaissances

d'autres, un projet d'augmentation du linéaire est en cours. Concernant leur gestion, elles sont dans l'ensemble gérées par Agrivair et certaines tailles sont réalisées par les exploitants. Les exploitants arrivent pour la plupart à estimer le nombre d'espèces présentes et certains peuvent citer les espèces présentes. Seuls trois exploitants sur les huit n'arrivent pas à estimer ce nombre. Ce dernier varie d'une petite dizaine à plus d'une vingtaine. Concernant la valorisation, 6 exploitants disent qu'il n'y a pas de valorisation, 2 ont des projets de valorisation et 1 en utilise pour se chauffer (cette information a été donnée lors de la discussion sur le développement de la filière biomasse énergie).

Afin de savoir pourquoi il y a des haies, il leur a été demandé de classer la raison de la présence de ces haies. Certains arguments donnés ont été retrouvés chez plusieurs exploitations. De plus, des arguments jugés similaires ont été regroupés afin de produire la figure 6 qui regroupe les arguments ainsi que les points totaux alloués. Les raisons de la présence de ces haies sont diverses. Ainsi, la première raison donnée par les exploitants est l'aménagement du parcellaire qu'elles permettent d'obtenir avec un total de 13 points. Puis viennent le bien-être animal du fait entre autre de l'ombre procurée par les haies et le fait que les haies participent au captage d'eau, des nitrates et que cela limite l'érosion avec un total de 9 points. L'automédication est la quatrième raison exæquo avec l'aspect plaisant au niveau paysager pour un total de 8 points. Puis viennent les critères de biodiversité et d'agronomie et d'écologie. Un exploitant a exprimé le fait que la présence des haies était subie et n'a pas donné d'autre critère. Enfin, le critère de se démarquer des autres a été cité une fois en troisième position.

Après présentation des itinéraires techniques et de photos représentant les cultures à biomasse, l'enquête se concentre sur les connaissances, le ressentis et les perceptions qu'ont les exploitants sur ces cultures.

3.2.4. Connaissance des trois cultures à biomasse

Les différents exploitants interrogés avaient déjà entendu parler de ces cultures, au moins de nom. Cette connaissance provient majoritairement d'Agrivair et de l'INRA qui en parle depuis plusieurs mois voire années. Pour le reste, le support de presse reste le plus grand vecteur de communication où ils ont pu obtenir des informations dessus. En ce qui concerne la connaissance plus précise des cultures, il y a une différence entre les cultures. Le miscanthus est la culture la plus connue et le switchgrass la moins connue. Cette connaissance reste

Quelle est l'image des cultures à biomasses dans le monde agricole ?	Quelle est votre ressenti du fait que ces cultures n'aient pas de valeur alimentaire ?	Maintiennent-elles la qualité de l'eau ?	Pour quoi ?	Quels sentiments pour la durée de vie de ces cultures ?	Quels sentiments pour le temps de travail ?	Demanden t-elles du temps ?
N'est pas spécialement bien perçu (considérées comme « farfelues »).	Cela chagrine.		Pérennes et pas d'apports	C'est un frein	C'est cool	non
Il y a eu une vague pour faire de la méthanisation, cela utilise des surfaces pour ça.	Il y a une gêne.	oui	Retient l'eau en hiver, rien à mettre dessus	Si permet de remplacer quelque chose qui ne produit pas, ce n'est pas une gène	Pas méchant	non
Aucun, cela rentre dans les moeurs.	Aucun ressenti.	oui	Pas de labour, pas d'intrants	Aucun	Bien	Non
	C'est déplacé de faire ça.	oui	Pompe sans apport	Pas de problème, existe prairies de plus de 100 ans	Ne sait pas	Ne sait pas
Pour l'instant pas bien perçue, car il y a pour le moment une vision très productiviste de l'agriculture.	N'est pas intéressé car volonté d'avoir nourriture pour ses bêtes	oui	Rien à apporter	Est-ce rentable au finale	Ça peut aller, il y a quand même du boulot en mars	non
Cela désorganise le marché et utilise des engrais pour des dérobés. Ce n'est pas super mais c'est une opportunité pour ceux qui veulent en faire, cela fait de l'énergie.	N'est pas dérangé, on cultive déjà de l'alimentaire qui n'en est pas.	oui	On ne met rien dessus	C'est bien	Un peu contraignant	non (sauf début)
Pas de présence dans le coin donc n'a pas trop d'avis.	Cela pose problème.	oui	Proposé par Agrivair	Ça parait long	Pas de pb	non
Pas d'image négative pour le moment, la production est dans un système fermé, tout est organisé pour que les agriculteurs touchent le moins.	Pas dérangé, aujourd'hui la méthanisation existe, des projets passent avec de l'utilisation de nourriture animal (maïs). Quelle est la volonté du gouvernement ? Quelle souveraineté alimentaire voulons-nous ? Cela entrainera une pression sur foncier d'ici peu de temps.	oui	On ne fait rien dessus	On va s'ennuyer	pas facile de s'en rendre compte	Il faudrait essayer pour voir
Si cela permet des économies de fuel, ça va, mais il faut voir l'énergie utilisée pour la culture… Quelle gestion est faite des forêts ?	Plus partant pour ces cultures que pour faire maïs pour de la méthanisation. Problème de la surpopulation, comment nourrir tout le monde ? La terre doit servir à nourrir.	oui	Pas d'engrais, pas de traitement	Long	Pas trop de travail, pas chronophage sauf pour l'implantation	non
Cela ne sert à rien, il y a une mauvaise image.	Cela baisse l'offre du marché qui est saturé, il est plus important de valoriser en local.	oui	Sol couvert toute l'année	Bien, ne dérange pas	Pas de soucis	Non

Tableau 1 Réponses données sur l'image, la qualité de l'eau et le temps de travail des cultures à biomasse

sommaire, seule l'exploitation qui a le projet d'en implanter connaissait l'itinéraire technique du miscanthus.

Ce type de culture n'est pas implanté dans l'impluvium. Pour pouvoir implanter ces cultures, il a semblé intéressant d'avoir d'après eux l'image des cultures à biomasses dans le monde agricole ainsi que leur ressenti propre du fait de produire des cultures qui n'ont pas de valeur alimentaire. Cela permet d'obtenir des points à travailler lors de la communication avec eux pour apporter des éléments de réponses.

3.2.5. Image et sentiment général des cultures

3.2.5.1. Image des cultures à biomasse dans le monde agricole et ressenti propre de la fonction non alimentaire de ces cultures

Dans l'ensemble, d'après eux, l'image provenant du monde agricole est plutôt mitigée. On peut voir qu'il y a des craintes mais également des espoirs ou des acceptations par rapport à des contreparties comme l'énergie. Concernant le ressenti, il y a des réfractaires à l'idée d'utiliser des terres pour faire une production qui ne sert pas à nourrir les Hommes. D'autres sont plus résignés du fait que cela existe avec la méthanisation et mettent le doigt sur l'orientation politique qu'il va falloir clarifier. Enfin, certains n'ont pas de ressenti ou ne sont pas dérangés et trouvent que cela peut devenir une opportunité.

3.2.5.2. Vision de l'impact sur l'eau de ces cultures

De manière assez unanime (9 « oui » et 1 « sans réponse »), ils ont répondu que cela n'impactait pas la ressource en eau car ce sont des cultures pérennes qui n'ont pas besoin d'apport, qu'il n'y a rien qui est mis dessus, que ça pompe l'azote du sol, que c'est proposé par Agrivair et que le sol est couvert toute l'année.

3.2.5.3. Sentiment vis-à-vis de la durée de vie de la culture

Le fait que ces cultures soient des cultures avec une durée de vie de plus de 10 ans n'est pas courant dans le monde agricole, ou tout du moins, lorsqu'il s'agit d'une culture de vente. En effet, un exploitant a mentionné le fait que la durée de vie longue n'était pas un problème puisque les prairies naturelles sont déjà des cultures pérennes et que cela ne pose pas de problème. Par contre, pour quatre exploitations, cela représente une durée de vie longue qui peut leur faire peur. Il y a le sentiment qu'ils vont s'ennuyer, d'autres trouvent que cela est un frein car une parcelle est bloquée pour cette culture. Un agriculteur exprime le fait que tant que cela produit et avec un meilleur bénéfice que ce qui était cultivé avant, ce n'est pas un problème. La question de la rentabilité a là aussi été soulevée.

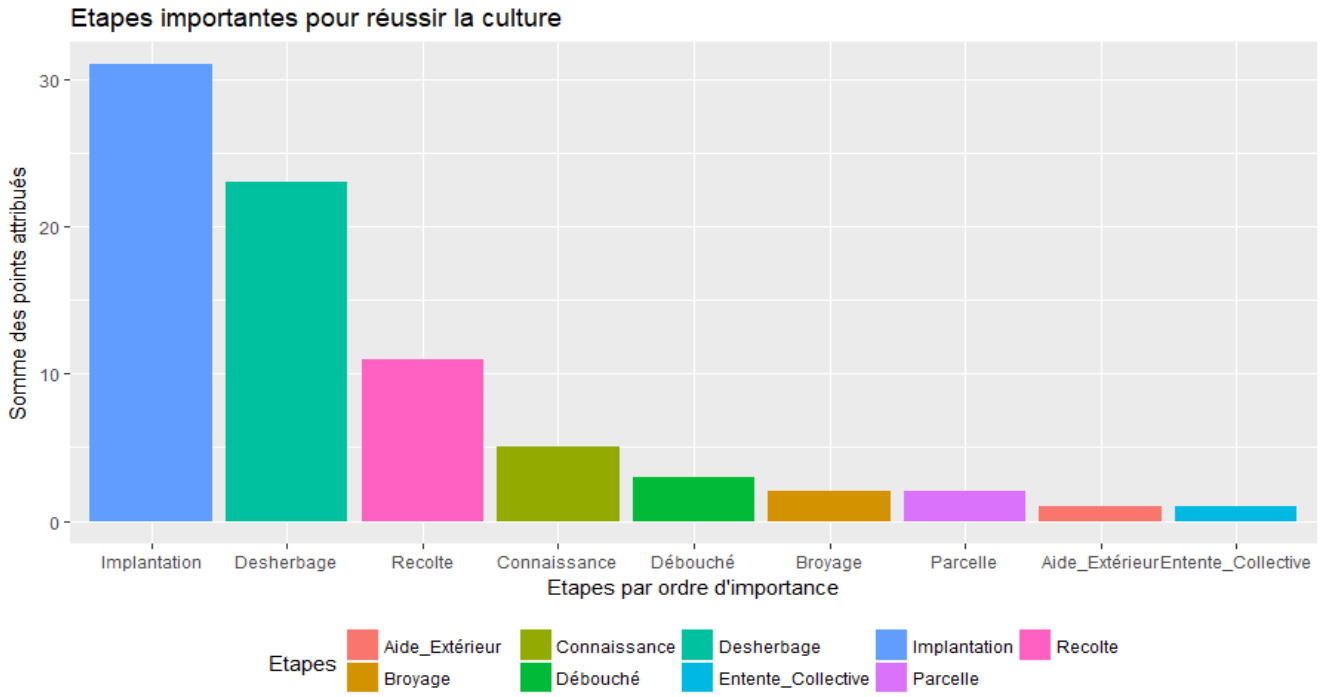


Figure 7 : Les étapes importantes pour réussir la culture

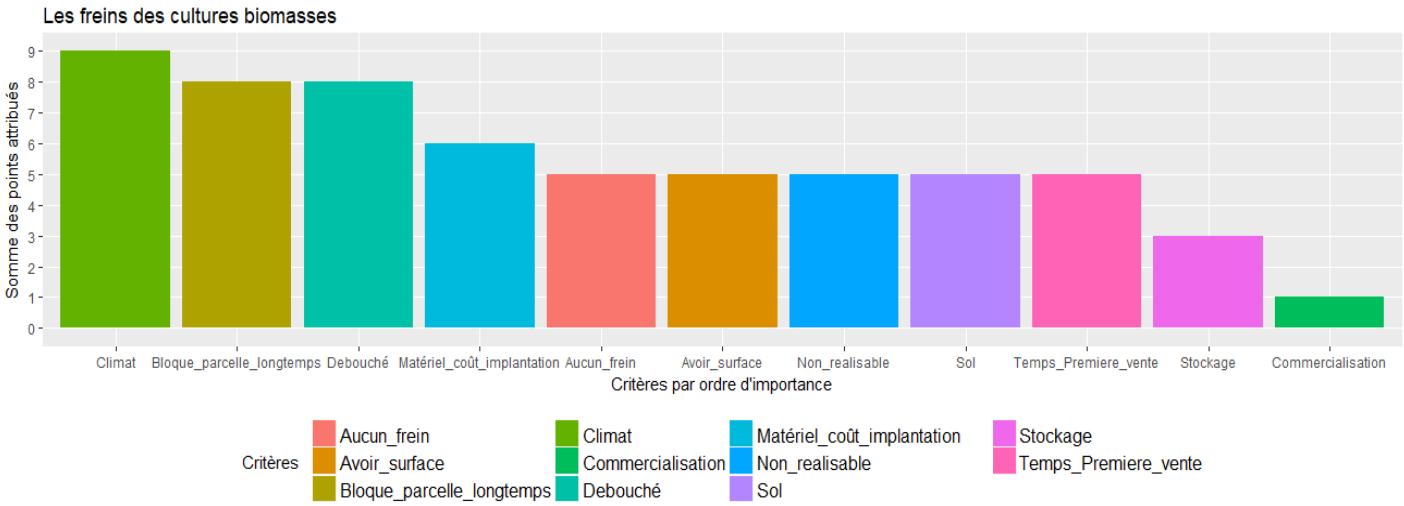


Figure 8 Les freins liés aux cultures

3.2.5.4. Sentiment au regard de la charge de travail à fournir

Dans l'ensemble, ils se sont rendu compte que la charge de travail est minime comparé à la plupart des cultures. L'implantation est la période de travail qui a été pointée du doigt avec la période de récolte. Un seul agriculteur trouve ça difficile de savoir sans avoir testé. Dans l'ensemble, ils s'accordent à dire que ces cultures ne sont pas chronophages.

3.2.6. Étapes primordiales et freins liés à l'introduction de ces cultures

Afin de connaître ce qui pour eux peut représenter des freins au niveau de la conduite de la culture et au niveau général, il a été demandé aux exploitants de classer les étapes qui sont importantes selon eux ainsi que les freins qu'ils ont pu percevoir de la présentation de l'itinéraire technique.

3.2.6.1. Les étapes importantes permettant la réussite de ces cultures

L'étape considérée comme étant la plus importante est l'implantation. Elle cumule 31 points et elle est suivie par le désherbage qui totalise 23 points. La récolte est en troisième position avec 11 points viennent ensuite les connaissances, le débouché, l'étape de broyage, la parcelle, les aides extérieures et enfin l'entente collective. Il s'avère que la réussite de l'implantation et du désherbage les deux premières années conditionnent en grande partie les rendements futurs. De ce fait, on peut dire que l'itinéraire technique a bien été compris par rapport à ces étapes. Les autres « étapes » données font référence à des attitudes ou d'autres critères qui méritent également d'être pris en compte.

3.2.6.2. Freins relatifs à l'introduction de nouvelles cultures

Le frein qui a été donné de façon majoritaire est le climat qui n'est pas adapté d'après leurs dires, il récolte 9 points. Avec 8 points, il y a le fait que cela bloque une parcelle longtemps et le manque de débouché. Puis vient le matériel et le coût pour 6 points. 5 critères ont obtenu 5 points à savoir le fait d'avoir des surfaces, que l'implantation de ces cultures n'est pas réalisable, le sol qui n'est pas adapté, le temps avant la première vente. Un agriculteur considère qu'il n'y a pas de frein, il s'agit de l'exploitation qui veut en implanter. Viennent ensuite le stockage pour 3 points et la commercialisation pour 1 point. Ces résultats montrent qu'il va être nécessaire de travailler sur la communication autour des cultures mais également sur la filière qui pose question pour les agriculteurs.

3.2.7. Débouchés et filières

Après présentation des trois débouchés possibles à savoir l'utilisation des cultures à biomasse pour la création d'énergie, pour la litière d'animaux et la formation de

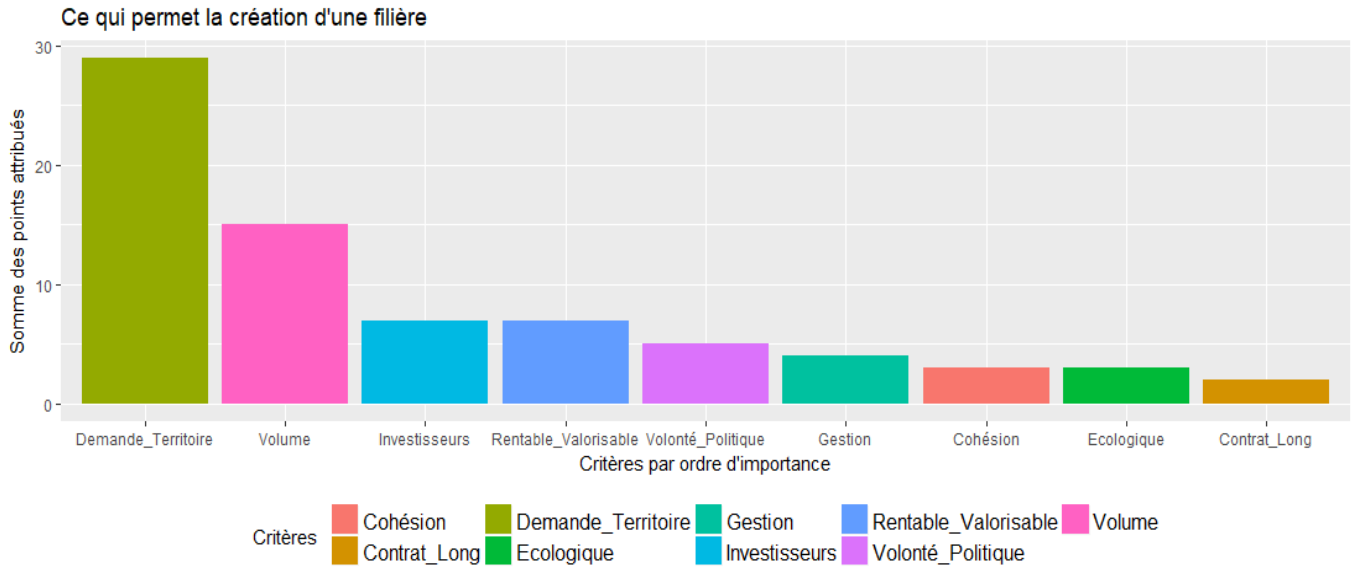


Figure 9 Ce qui permet la création d'une filière sur le territoire

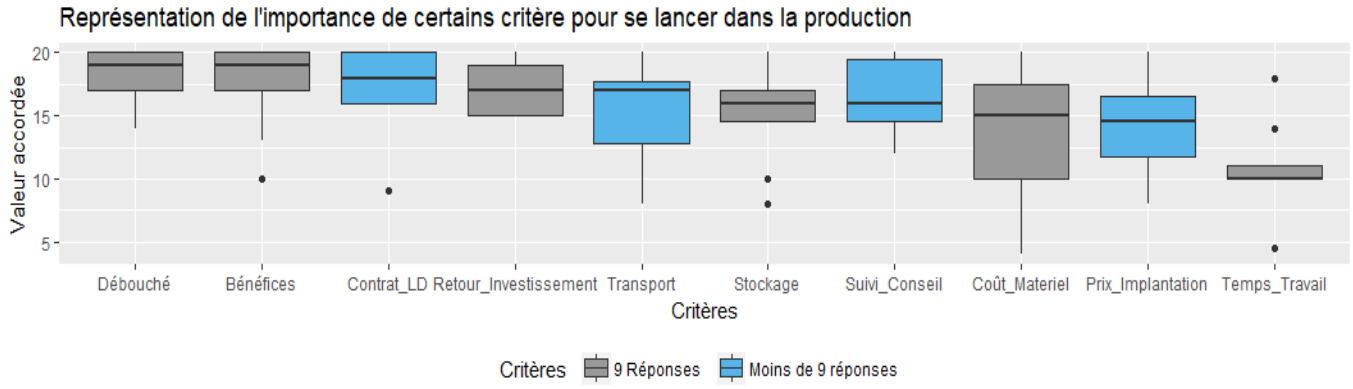


Figure 10 Ce qui est important pour se lancer dans la production des cultures

biomatériaux, il a été répondu à l'unanimité que le débouché énergie était le plus simple à mettre en place sur le territoire. Les raisons évoquées sont la présence de chaudières à biomasse sur le territoire, la facilité d'utilisation de la ressource et le fait que les communes peuvent investir facilement pour des chaudières et pour le stockage. Lorsque l'on parle du stockage, ils soulignent qu'il est plus intéressant de faire un stockage centralisé des récoltes.

En ce qui concerne les critères qui permettraient la création de filières de valorisation sur le territoire, les différents critères suivant sont énoncés :

Avec un poids de 29 points, la demande territoriale est nécessaire pour créer une filière. Puis vient le volume de production pour 15 points et dans une moindre mesure les investisseurs et la rentabilité-valorisation de la culture pour 7 points. Ensuite viennent la volonté politique pour 5 points, la gestion de la filière pour 4 points, la cohésion et l'aspect écologique pour 3 points et le contrat à long terme pour 2 points.

On peut voir qu'il est à leurs yeux important qu'il y ait une forte demande de matière première et que les exploitants puissent apporter un volume important. L'aspect économique arrive ensuite dans l'ordre des priorités.

Ensuite, il leur a été demandé de classer des critères donnés, sur une échelle de 0 à 20, suivant leur importance pour qu'ils se lancent dans la culture de ces plantes. La valeur 20 représentant l'importance la plus forte. Des boîtes à moustaches ont étés réalisées et classées suivant la valeur de leur médiane.

Dans l'ensemble, les critères proposés ont une grande importance pour une majorité d'exploitants car leur médiane est supérieure ou égale à 15/20. Pour qu'ils puissent se lancer dans la production de ces cultures, le débouché et les bénéfices sont les deux premiers critères qui ont le plus d'importance. Viennent ensuite le contrat de longue durée puis le retour sur investissement. Le transport est un critère qui ne fait pas l'unanimité dans les réponses. Cela est moins visible sur le stockage où deux réponses sont en opposition avec le reste. La demande de suivi et de conseils par rapport aux cultures est relativement importante. Le coût du matériel représente le critère qui a le plus de variabilité dans les réponses mais sa médiane est à 15. Le prix de l'implantation est un critère qui ne fait pas non plus l'unanimité. Le temps de travail de la culture est le critère qui a la plus faible médiane.

Ainsi, pour qu'ils puissent se lancer, deux critères sont importants : le débouché et la rentabilité, qui sont des critères liés. Le retour sur investissement ne doit pas être trop long et il doit y avoir une bonne gestion du stockage de la production, liée à une bonne logistique. La

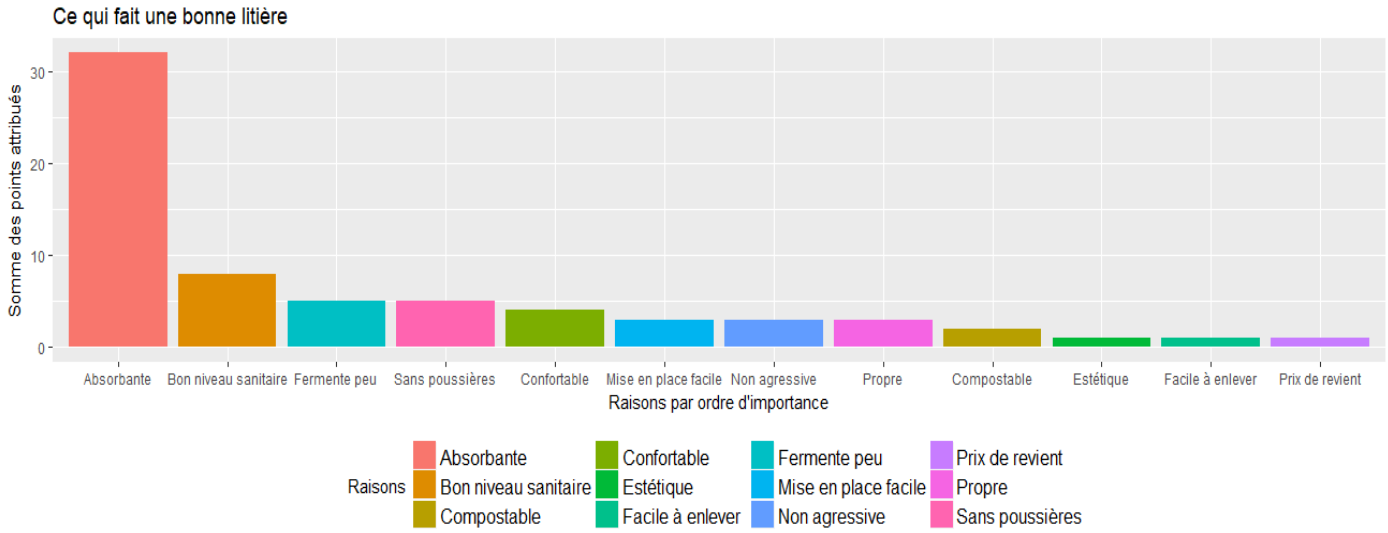


Figure 11 Les caractéristiques d'une bonne litière

forte demande de suivi et de conseil montre que les exploitants doivent être accompagnés pour mener à bien la culture.

3.2.7.1. Débouché litière

Avant de s'intéresser au débouché, un état des lieux est fait sur la litière utilisée dans les exploitations et sur ce qui, d'après eux, fait une bonne litière dans le but d'étudier l'opportunité de développer le débouché litière. Pour cela, un classement leur est demandé sur ce qui fait une bonne litière.

Avec plus de 30 points, le fait qu'elle soit absorbante est le critère numéro un. Vient ensuite le côté sanitaire de la litière avec 8 points. Le fait qu'elle fermente peu et qu'elle ne fasse pas de poussière sont à 5 points puis le confort de l'animal a été donné pour un total de 4 points. Avec 3 points, il y a la mise en place facile, le fait qu'elle ne soit pas agressive et la propreté. Avec 2 points, la compostabilité a été citée. Enfin, avec 1 point l'esthétique, la facilité d'enlèvement et le prix de revient ont été mentionnés.

L'absorbance de la litière est donc le critère numéro 1 supplantant largement les autres propositions. Le niveau sanitaire, la faible fermentation, la poussière et le confort pour les animaux sont également à prendre en compte pour proposer d'autres types de litières.

Concernant la possibilité de changer leur litière, ils sont 5 sur 8 à être prêts à utiliser autre chose que de la paille. Parmi ces 5, un a exprimé le fait que cela devait bien absorber et un autre voudrait utiliser ses haies. Deux ne veulent pas et un ne sait pas vraiment. Parmi les deux exploitants qui ne veulent pas, l'un utilise déjà de la sciure de bois avec de la paille. Concernant l'autosuffisance en paille, 5 exploitations sont autosuffisantes, les 4 autres le sont à 62 %, 60 % et 25 % et une exploitation ne produit pas de paille sur son exploitation. De ce fait, elles doivent en acheter. Les prix d'achat ne sont pas les mêmes et varient de 62 à 80 €/t. Un exploitant fait de temps en temps des échanges pailles-foins.

D'après ces chiffres, il peut y avoir un besoin d'autoproduction de litière pour permettre une autonomie. Il faut mettre en regard les coûts de la culture implantée uniquement pour fournir de la litière par rapport aux coûts d'achat de paille.

3.2.7.2. Débouché énergie

Leur consommation d'énergie leur a été demandée afin de savoir avec quoi ils se chauffaient et il leur a été demandé pour ceux qui n'utilisaient pas de biomasse pour se chauffer, s'ils étaient prêts à changer leur chaudière pour mettre de la biomasse. Un exploitant est

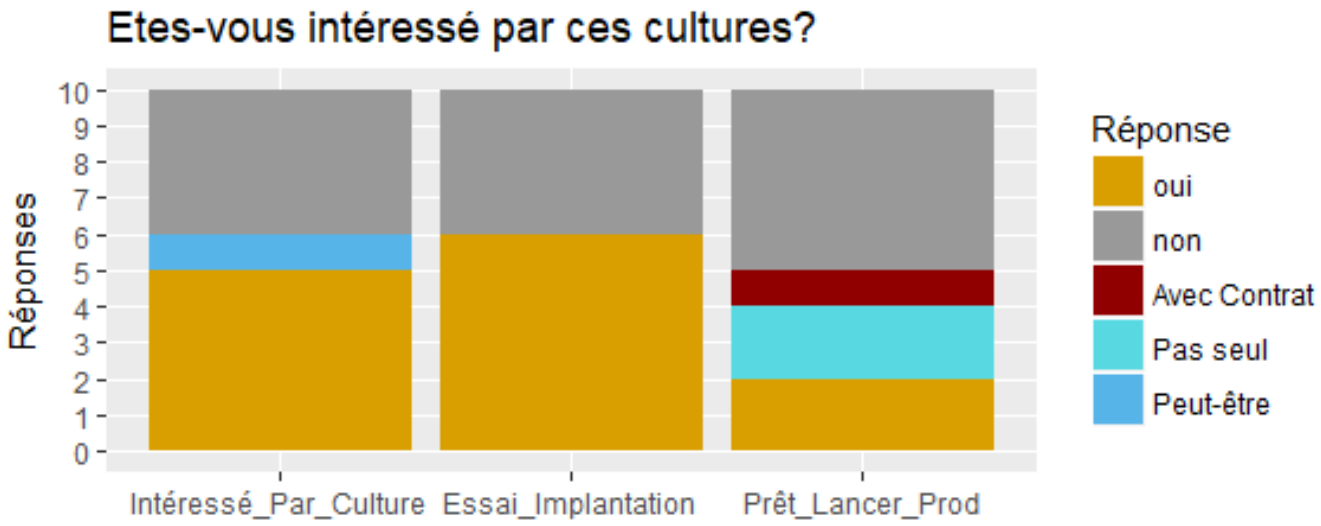


Figure 12 Intérêt pour les cultures

uniquement au fuel et ne veut pas changer. Ils sont 3 à se chauffer avec du fuel (500 à 2 000 L de fuel par an) et du bois. Parmi eux, deux pourraient passer au tout biomasse. Un seul est au gaz de ville et ne veut pas changer. 4 utilisent uniquement de la biomasse pour se chauffer. Ils pourraient changer pour une autre chaudière si le coût est peu élevé ou s'il y a des aides.

Il y a donc des opportunités au niveau des exploitations qui pourraient produire leur propre énergie, à condition que cela soit rentable, avec un retour sur investissement rapide.

3.2.7.3. Contrat et prix de vente

La proposition de réaliser un contrat garantissant un prix mais demandant un minimum à livrer a été suggérée. 3 sont prêts à faire ce type de contrat avec une réserve importante. Pour 1 il faut voir la quantité du minimum qui doit être livré et pour les 5 autres, c'est un non. Les raisons du refus sont la réticence d'avoir un minimum à livrer, que cela peut faire peur et qu'il serait plus intéressant de fixer un prix sur le long terme sans minimum à livrer, voire qu'il y ait un prix à l'hectare. Concernant les prix de vente, il leur a été proposé d'indexer le prix de vente au prix d'une culture. Cela n'a pas été bien accueilli car il y a trop d'incertitude dans les marchés liés aux cultures de vente. Une autre proposition, d'indexer par rapport au prix du fuel les a plus séduite mais des réserves persistent car les cours peuvent également changer brusquement.

3.2.8. Intérêt de la culture et possibilité d'implantation

Après avoir discuté un moment avec les exploitants, les questions de l'intérêt de ces cultures, de la possibilité de faire des essais d'implantation et de se lancer directement dans la production ont été posées.

Ces réponses donnent un aperçu, après avoir discuté autour du miscanthus, du switchgrass et des TTCR, des possibilités d'implanter une de ces cultures.

Sur les 10 exploitants interrogés, la moitié est intéressée par l'implantation de ces cultures. Un exploitant est indécis et les autres ne sont pas intéressés. On retrouve ces résultats dans l'essai d'implantation où ils sont 6 à bien vouloir essayer d'en implanter. Par contre, pour lancer une production de plus grande envergure, ils ne sont plus que 2 à être prêts, 2 à vouloir y aller mais pas seuls et 1 avec un contrat bien fait. Les 5 autres ne sont pas prêts à se lancer directement dans la production.

Il leur a été demandé d'identifier sur les cartes produites les parcelles où il serait possible d'en implanter. Suite à cela, ils devaient caractériser ces parcelles en classant ces caractéristiques.

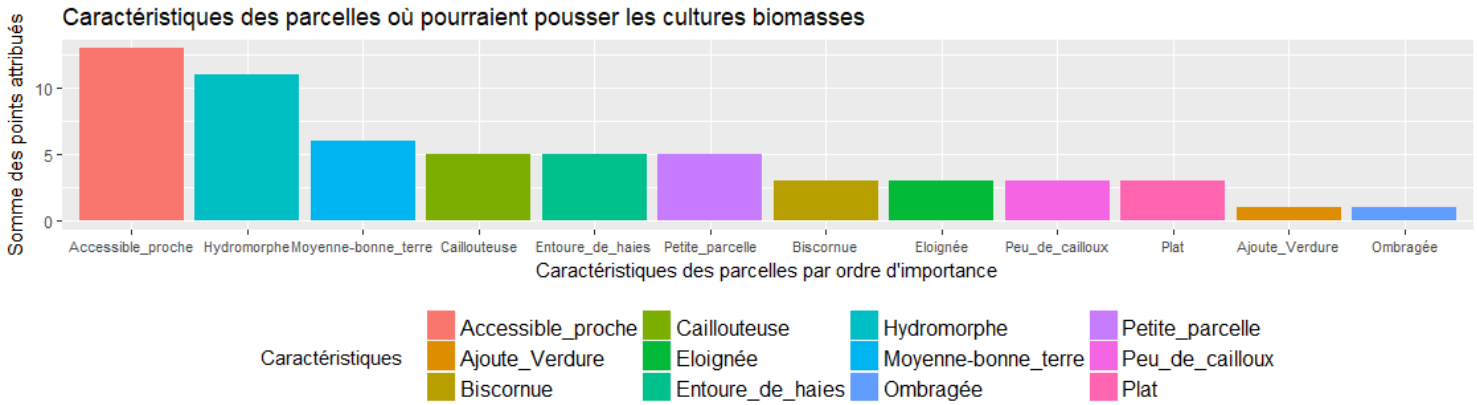


Figure 13 Caractéristiques des parcelles qui accueilleraient les cultures

L'accessibilité de la parcelle est le critère qui domine avec un score de 13 points. Vient ensuite le fait que la parcelle soit hydromorphe avec 11 points, que ce soit une terre moyenne voire bonne pour 6 points, qu'elle soit caillouteuse, entourée de haies ou de petite taille sont ex-aequo avec 5 points. Avec 3 points, les caractéristiques des terres données sont biscornues, éloignées, avec peu de cailloux et plat. Et enfin, pour 1 point il y a les caractéristiques ombragées et ajoute de la verdure. On peut voir que la stratégie n'est pas la même suivant les exploitants et que certains vont donner des terrains qui ne les satisfont pas pour les céréales.

Lorsqu'il leur est demandé sur combien d'hectares ils seraient prêts à en planter, leurs réponses varient de 0,5 à 5 ha.

4. Discussion

Du fait du faible nombre de personnes enquêtées, ces résultats sont à prendre comme une vision partielle du ressenti et de la volonté des exploitants partenaires de l'impluvium possédant des terres en culture. En effet, ces résultats ne sont pas représentatifs de la vision du territoire mais indicatifs. Ils prennent en compte des exploitants qui ont bien voulu répondre à l'enquête. Ces informations permettent tout de même de s'appuyer dessus pour lancer une dynamique et permettre le lancement du développement des cultures à biomasse sur l'impluvium. En effet, il est possible d'envisager une croissance du nombre d'exploitant se lançant dans les essais de production, voire de production à plus grande échelle. De plus, les agriculteurs non partenaires seront enquêtés également pour augmenter les possibilités et permettre une protection plus grande de la ressource en eau.

Il est possible que l'enquête comporte quelques biais du fait de la construction du questionnaire ou de la manière dont l'enquête s'est déroulée. En effet, si l'on regarde les critères donnés pour les opportunités et risques liés à l'introduction d'une nouvelle culture ou liés au développement d'une filière, ils sont orientés sur un côté économique ce qui fait ressortir ces résultats. De plus, le questionnaire avait dans sa forme originelle un but de citer le moins possible le nom des cultures pour éviter d'influencer les réponses. En effet, la présentation des itinéraires techniques, devait se faire sans mention des cultures concernées pour comprendre le ressenti.

D'après les résultats, on peut voir que les exploitants recherchent une culture possédant une valeur ajoutée et ayant un débouché. Le côté environnement entre ensuite en jeux avec l'aspect de filière et de vente locale. Ainsi, ces critères sont à mettre en avant si l'on veut introduire de nouvelles cultures. A la lecture de l'itinéraire technique, les exploitants ont

identifié que ces cultures avaient un impact positif sur la qualité de l'eau. Il peut être intéressant de leur présenter les autres critères environnementaux qui ont été incorporés dans la synthèse bibliographique (Annexe 2).

Il faut que ces cultures puissent apporter de la valeur ajoutée, donc un bénéfice et cela passe par un débouché ou un marché de niche qui, s'il est sur le territoire, serait un plus non négligeable. De plus, axer également sur le bienfait environnemental des nouvelles cultures peut permettre une meilleure acceptation car considéré comme une opportunité. Si on prend en compte ces opportunités énoncées pour tout type de cultures et qu'on les met au regard des cultures à biomasse proposées, on peut voir que toutes les opportunités ne sont pas atteintes. Ainsi, il va être nécessaire de créer une, voire des filières à haute valeur ajoutée.

Les haies ont un rôle fonctionnel et elles participent grandement à la conduite de l'élevage par l'aménagement qu'elles permettent et la fonctionnalité de bien-être animal et d'automédication. La fonctionnalité de l'infrastructure agro écologique est également évoquée par le regroupement de la baisse de l'érosion et du captage de l'eau et des nitrates par la haie. L'impact environnemental des haies, dans son ensemble, est reconnu par les exploitants interrogés. Ce qui implique que ces haies ne sont pas perçues de manière négative. En effet, seulement un exploitant a donné pour raison que cela était subi et il y a une volonté pour certains d'augmenter le linéaire. Par contre, la valorisation de ces haies en matière économique n'est pas présente or cela peut représenter un intérêt au vu du linéaire et de la production possible. Une seule exploitation les utilise pour se chauffer. Il y a donc une grande possibilité de développement en lien avec cette ressource qui occupe une place importante sur le territoire. Agrivair fait des études en lien avec des entreprises pour avoir une meilleure gestion et pour permettre une valorisation.

Les cultures à biomasse présentées étaient connues pour la plupart mais une sensibilisation plus vaste peut être faite. Les moyens de communication les plus utilisés sont le support papier avec les magazines et les discussions avec Agrivair et l'INRA. Des articles dans la presse agricole sur le projet ou faire une synthèse de ce qui est dit dans la presse agricole peut être un moyen supplémentaire de faire de la communication auprès des agriculteurs de l'impluvium. Ce travail de communication devrait pouvoir apporter un autre regard sur le fait de produire autre chose qu'une ressource alimentaire dans les exploitations agricoles. En effet, certains agriculteurs sont très réticents du fait que ces cultures sont non alimentaires. Cela ne pose pas de problème qu'il y ait des réfractaires car le projet dans son développement

devrait se faire de manière croissante ce qui ne nécessite pas la participation de tous les agriculteurs. Il faut prévoir par contre si une demande brusque arrive sur le territoire comme l'installation d'une chaudière à biomasse mais cela peut être amoindri par le fait qu'il est recommandé d'installer des chaudières poly-combustibles permettant d'utiliser plusieurs types de biomasses comme le bois et le miscanthus. Cela peut permettre de trouver un équilibre dans la production.

Les étapes importantes pour un bon développement de la culture ont bien été identifiées par les agriculteurs, il sera nécessaire d'apporter des réponses permettant de les rassurer et de trouver les équipements permettant de conduire au mieux l'implantation et le désherbage des cultures. De plus, les autres informations qui ressortent montrent qu'il y a un besoin de connaissances et d'aides. Des connaissances plus précises sur les étapes clés et sur les besoins de ces plantes, des aides techniques pour mener à bien ces nouvelles cultures et pour créer un débouché. Un exploitant fait ressortir que l'entente collective entre les différents partenaires du projet est importante.

Concernant les freins évoqués, il a été montré que le climat n'est pas un frein. Une discussion avec les agriculteurs devrait les rassurer. Le frein lié au blocage de la parcelle ne prend pas en compte le bénéfice que cette parcelle peut produire. Avec un bénéfice, cette parcelle sera considérée comme utile et productive par l'exploitant. Pour le moment, le vrai frein qui existe est l'absence de débouché. En effet, aucun débouché n'est présent sur le territoire mais des pistes sont en construction et seront détaillées dans la suite du rapport.

Le matériel et le coût d'implantation sont également des freins majeurs pour le moment, son implantation est estimée entre 3 000 et 4 000 €/ha [33], [34], [35], [36], [37]. Il faut aussi prendre en compte le délai de deux ans entre la mise en place de la culture et la première vente possible. Cela doit s'accompagner d'une garantie ou d'une certaine contrepartie. Plusieurs scénarii peuvent être envisagés pour éviter que ce délai de deux ans ne soit un frein trop grand qui empêcherait le développement de la filière sur l'impluvium. L'un d'entre eux serait de lisser les prix d'achat de la récolte sur une période pour atténuer la non production de la première année et les rendements faibles des quelques années qui suivent. Des subventions sont aussi

[33] Pavard et al. 2012
[34] Le miscanthus a la fibre écolo | Journal Paysan Breton 2017
[35] Le miscanthus permet de se chauffer à moindre coût 2018
[36] Rentabilité Se lancer dans la culture de miscanthus 2009
[37] Robinet, 2009

Nombre d'ha implanté par exploitation partante	Ha totaux alloués	% surfaces en cultures	% surface culture interrogé
0,5 ha	3	0,1	0,3
2,75 ha	16,5	0,58	1,8
5 ha	30	1	3,2

Tableau 2 Surfaces qui pourraient être alloués aux cultures à biomasse et représentation en pourcent de ce que cela ferait par rapport aux surfaces de cultures et par rapport aux surfaces en cultures des exploitations enquêtées

à trouver pour soutenir les projets d'implantation et permettre un meilleur accompagnement économique.

La demande territoriale est considérée par les agriculteurs comme étant importante pour créer la filière. Un travail de recherche de débouchés et de création de demande est en cours.

D'après les résultats, un petit groupe d'environ 6 agriculteurs pourrait à ce jour implanter des cultures à biomasse. Ils devraient pouvoir allouer entre 0,5 et 5 ha par exploitation suivant les débouchés et les besoins évalués. Cela représente pour le moment une très faible surface. En effet, dans une hypothèse haute où ces 6 exploitations implantent 5 ha de cultures à biomasses, cela représente 30 ha ce qui fait seulement 1 % des surfaces en culture (2 786 ha soit 44% de la SAU) et 5 % des surfaces en culture de ces 6 exploitations. Cela ne représente pas une surface importante pour à l'échelle de l'impluvium. De ce fait, l'impact de ces cultures sur la qualité de l'eau ne serait pas significatif.

Dans l'hypothèse où chaque exploitation implante 2,5 ha, il pourrait y avoir 15 ha de cultures à biomasses implantées. Avec des rendements avoisinant les 15 tMS/ha, au bout de quatre ans, cela représenterait 225 tMS et cela sans compter les possibles implantations supplémentaires. Or 50 t de miscanthus utilisé comme combustible dans une chaudière de 100 kW permet de remplacer environ 20 000 litres de fuel et de chauffer 1 000 m² de bâtiments [38]. Ces surfaces pourraient approvisionner 4 chaudières de ce type, ce qui représente 4 000 m² chauffé avec de la biomasse cultivée. Il est donc possible de produire du volume avec les agriculteurs qui ont la volonté d'essayer.

Il a été question des investisseurs qui devaient être présents pour permettre la création de la filière. Il est possible que des collectivités ou des particuliers investissent pour permettre la création de filières. Il faut donc identifier les investisseurs potentiels et les intégrer au projet. D'autres financeurs peuvent également aider à l'élaboration des différentes filières.

Les critères d'importance pour se lancer dans la production sont liés en grande partie à l'économie. En effet, pour qu'un agriculteur se lance sur une production de plus de 15 ans, il faut qu'il ait un débouché et que cela génère des bénéfices. La durée du retour sur investissement est également importante. Pour Promis©, société Belge travaillant dans le miscanthus, avec des estimations de rendements à 18 tMS/ha, sur une surface de 4 ha, la marge annuelle est de plus de 900 €/ha/an en moyenne après 10 ans et atteint plus de 1 200

[38] JEANROY [sans date]

Hypothèse	Prix	Marge Brute	Point mort
1	70 €/t	600 €/ha	9 ans
2	80 €/t	750 €/ha	8 ans
3	90 €/t	900 €/ha	7 ans
4	100 €/t	1050 €/ha	6 ans

Tableau 3 Marge brute possible et point mort suivant les hypothèses de prix de vente

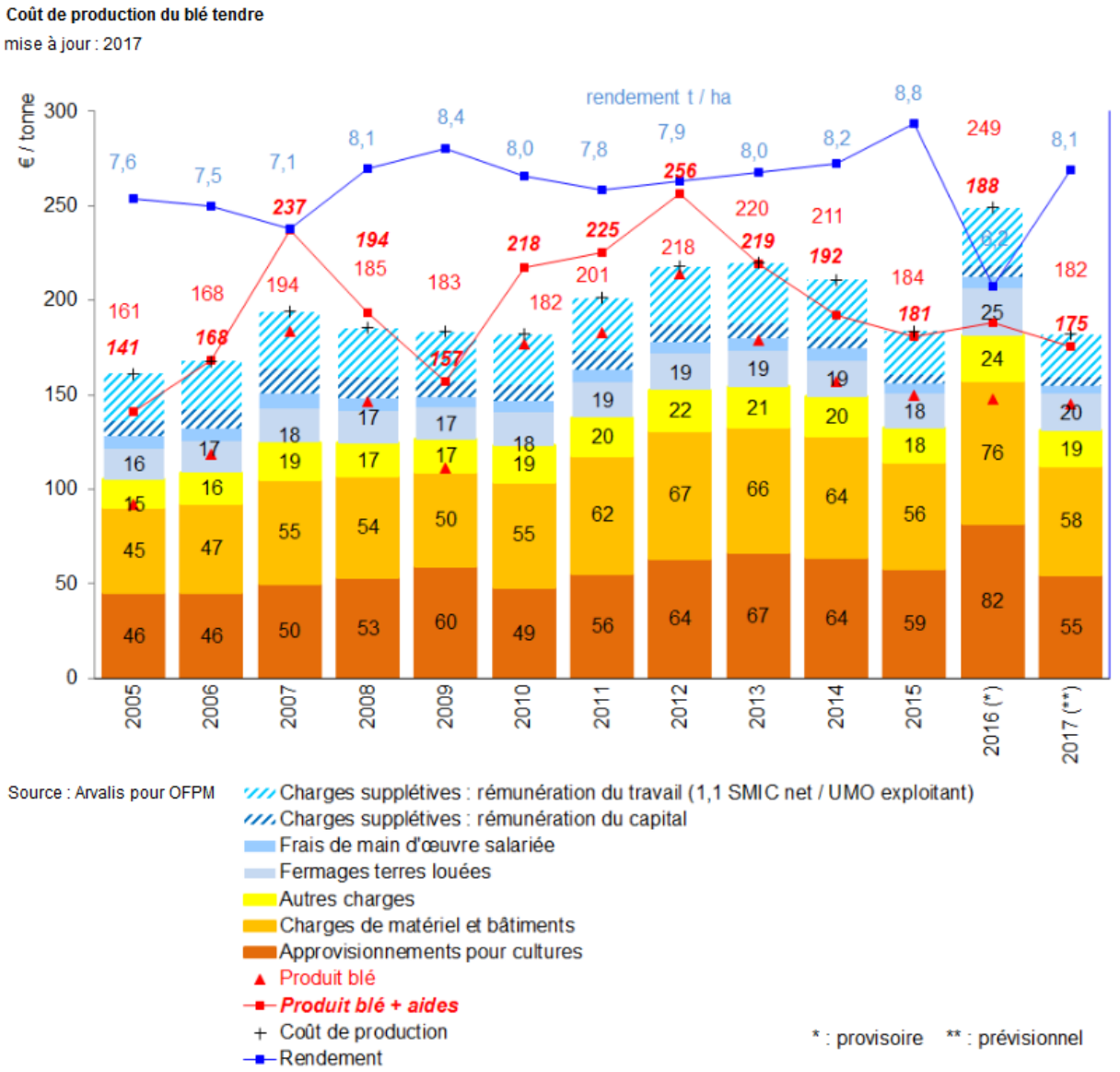


Figure 14 Coût de production du blé tendre de 2005 à 2017 [40]

€/ha/an en moyenne après 15 ans pour un prix initial du miscanthus de 65 €/t départ ferme, indexé sur 10 ans puis fixe pour les 5 années suivantes.

Une étude de ValBiom de 2013 a évalué la rentabilité de la production de miscanthus. Ainsi, les charges prennent en compte les coûts de plantation, d'entretien les deux premières années (il n'y en a plus besoin après), la récolte et le transport jusqu'à la ferme sur 5km. La culture est implantée pour 20 ans et la première vente se déroule lors de la deuxième année. Le prix de revient du miscanthus est alors établi à 614 €/ha soit 41,8 €/t de matière fraîche (MF, soit 85% de MS). Les rendements passent de 0 à 15 tMF/ha de l'année 0 à 4 puis restent à 15 tMF/ha. Quatre hypothèses de prix de vente sont simulées : 70, 80, 90 et 100 €/t (certains producteurs Wallons ont atteint les 100 €/t). Les marges brutes sont prises pour les années de pleine production (4 à 20 ans). Le point mort correspond au temps nécessaire pour atteindre le seuil de rentabilité [39].

Avec ces informations, on peut voir que le miscanthus peut apporter une marge brute plus ou moins élevée suivant le prix de vente et que le temps de retour sur investissement est plus ou moins long également. Il est donc important de prendre en compte la longévité de la culture car la logique ne sera pas la même comparé à une culture de vente annuelle. Ainsi, avec un contrat basé sur plusieurs années, il est possible d'avoir une vision claire, sur un long lapse de temps, sur la rentabilité de la culture et d'éviter d'être soumis aux variations de marché. Cela peut permettre pour l'exploitant d'avoir une entrée d'argent quasi sûre dans le temps et d'obtenir des bénéfices après au moins 9 ans de plus de 600 €/ha. Par contre il est nécessaire d'avoir un rendement permettant de mener à bien le contrat.

D'après l'observatoire de la formation des prix et des marges des produits alimentaires, suivant les années, la vente de blé ne permet pas de rembourser les charges et d'obtenir une rémunération (charges supplétives). Les coûts de production du blé tendre entre 2005 et 2017 varient de 161 €/t (2005) à 249 €/t (2016) et les produits du blé et des aides varient de 141 €/t (2005) à 256 €/t (2012) avec de fortes différences entre des années successives [40]. En effectuant la différence entre les coûts de production et les produits de la vente du blé et des aides, on obtient sur les 13 ans un total de 13 €/t de bénéfice cumulé là où avec le miscanthus vendu à 70 €/t, au bout de 13 ans, il y a un bénéfice cumulé de 2 440 €/ha soit avec un

[39] GAUTHIER Gilles 2013
[40] L'observatoire de la formation des prix et des marges - Resultats par Filieres [sans date]

rendement de 15 t/ha un bénéfice cumulé de 162,67 €/t. Ces valeurs sont à prendre avec un certain recul car les méthodes de calcul ne sont pas détaillées pour le blé.

Concernant la complexité de l'itinéraire technique, il a été compris par l'ensemble des exploitants et n'a soulevé que des questions plus générales sur l'accessibilité de la parcelle, les outils spécifiques nécessaires s'il y en a, la fertilisation du sol et le passage de l'hiver. Cela réduit le risque qui était perçu par les exploitants.

Il est donc important de travailler sur l'aspect filière et débouché pour permettre la valorisation et la rentabilité de la culture au niveau des exploitations. S'il est possible de leur montrer que cela fonctionne et que c'est faisable sur le territoire, la défiance de certains sera réduite et une implantation progressive sera possible.

5. Développement de filières

Concernant le développement de filières, les trois pistes suivies sont l'utilisation de la biomasse pour faire des litières pour animaux ou en horticulture et comme combustible dans des chaudières à biomasse. Pour cela, des rencontres ont été effectuées avec différents acteurs qui rentreraient dans ces filières ainsi que des recherches de financement. C'est dans cette optique, qu'une réponse à un Appel à Manifestation d'Intérêt (AMI) a été rédigée. Les différentes informations réunies dans la synthèse bibliographique et les projets d'Agrivair ont été utiles lors de la rédaction de la réponse à l'AMI « Soutien aux filières favorables à la protection de la ressource en eau » porté par la région Grand Est, des Agences de l'Eau Rhin-Meuse, Seine Normandie et Rhône Méditerranée Corse. En effet, cette réponse à l'AMI, qui s'est montée conjointement avec Agrivair a pour but d'obtenir des financements pour des projets de développement en lien avec la protection de la ressource en eau. Plusieurs axes se sont dégagés à savoir la valorisation des prairies et le développement de filières utilisant les cultures à biomasses. La création de marques utilisées pour la commercialisation du lait, de la viande et du foin utilisant les prairies a été mentionné et travaillé tout comme une valorisation par méthanisation permettant un maintien des prairies sur le territoire. Concernant la création de filières énergies, le but est d'utiliser des cultures à biomasse présentes sur le territoire comme les haies et d'implanter de nouvelles cultures comme le miscanthus, le switchgrass et les TTCR. Le tout répondant à une action de protection de la ressource en eau et de développement du territoire. Dans l'attente d'obtenir des financements, un travail avec les exploitants de l'impluvium est à réaliser afin de préparer le terrain pour un développement possible de ces filières.

5.1.Litière animale

Des centres équestres et des élevages équins ont été rencontrés pour présenter les caractéristiques du miscanthus utilisé dans d'autres régions comme litière. Pour ces rencontres, des documents ont été utilisés pour montrer ce qui se faisait en matière de litière (Annexe 8). L'apport d'échantillons aurait été un plus pour permettre une approche sensorielle. Dans l'ensemble, les acteurs du monde équestre sont intéressés mais ont besoin de tester le produit avant de pouvoir s'engager. Il est donc important de trouver un moyen pour que des tests soient réalisés permettant à ces acteurs de se confronter au produit et à son utilisation. Pour cela, il faut identifier les besoins et la durée pour permettre une vraie comparaison avec la litière de paille ou de copeaux de bois et identifier le financement de la matière première. Il y aurait un vrai intérêt au passage en litière miscanthus car il est trois fois plus absorbant, il réduit les émissions d'ammoniac, il n'est pas ingéré par les chevaux et il dure plus longtemps, ce qui peut être un avantage économique [41], [42]. Certains ont des contraintes particulières comme l'espace de stockage qui nécessiterait un conditionnement particulier. Ils ne peuvent pas stocker en vrac comme il est souvent fait. Il sera nécessaire de prévoir la logistique de la filière : acheminement du miscanthus, stockage et modalités de livraisons pour permettre une bonne gestion de la filière litière. Il est également ressorti des recherches que quelques exploitations bovines utilisent du miscanthus. Les différents arguments utilisés par ces éleveurs quant à l'utilité de cette ressource répondent aux attentes exprimées lors des entretiens. En effet, le miscanthus est plus absorbant que la paille, il aurait tendance à limiter les mammites environnementales, il fermente peu, il fait peu de poussières et il est confortable pour les animaux [43]. Certaines exploitations bovines se mettent au tout miscanthus avec certains avantages comme le gain de temps, l'économie effectuée et l'aspect sanitaire [44] . De plus, le chef d'exploitation du lycée agricole de Courcelles-Chaussy nous a indiqué qu'il avait observé que les vaches se couchaient plus dans les logettes lorsqu' il y avait du miscanthus, que cela faisait un matelas confortable.

5.2.Paillage horticole

A Courcelles Chaussy, le miscanthus produit sur l'exploitation est utilisé comme paillage horticole au sein de la formation horticulture et les résultats sont très encourageants. C'est fort de ce constat qu'il a été envisagé de voir si le développement de la filière paillage

[41] NovaBiom [sans date]
[42] JEANROY [sans date]
[43] Béatrice, Anne-Catherine 2013
[44] Vergonjeanne 2016

horticole pouvait se faire sur le territoire. Les villes de Contrexéville et Vittel sont toutes les deux des villes fleuries à respectivement trois et quatre fleurs. Contrexéville a également reçu le titre de « Terre saine » décerné par le Ministère de l'Environnement et a obtenu trois libellules dans le cadre de l'opération « Commune nature » décernée par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et par la région Grand-Est, ce qui indique que la commune suit une démarche « zéro phyto » dans la gestion de ses espaces verts. A ces titres, il est important de contacter ces communes pour envisager l'utilisation du miscanthus comme litière horticole pour lutter contre la pousse d'adventices. Une première rencontre avec la commune de Contrexéville s'est déjà faite et va conduire à la rencontre des élus pour voir ce qu'il est possible de faire mais surtout pour parler du débouché énergie.

5.3.Filière énergie

Ce débouché peut également se développer sur le territoire. Plusieurs communes ont été intéressées et des rencontres sont prévues pour parler du projet et voir ce qu'il est possible de faire. En effet, l'utilisation de biomasse comme ressource énergétique peut se révéler intéressante pour les communes à la fois au niveau économique comme vu précédemment, au niveau environnemental et au niveau développement territorial en faisant affaire avec les agriculteurs locaux. Ce développement nécessite des investissements pour obtenir des chaudières performantes et utilisant plusieurs types de combustibles car il ne semble pas pertinent d'investir dans des chaudières spécifiques au miscanthus. En effet, il est difficile de connaitre la production de miscanthus qu'il y aura et cette dernière devrait augmenter au fur et à mesure car un développement par étape devrait s'opérer. Il ne sera donc pas possible les premières années de fournir assez de combustible miscanthus. De plus, une valorisation des haies du territoire serait envisageable. Ainsi, investir dans des chaudières poly-combustibles qui permettront dans un premier temps d'utiliser la production du territoire qui pourra être complémentée par du bois semble judicieux. Avec l'augmentation progressive des rendements de la culture au fil des années et probablement des surfaces allouées à la culture sur le territoire, il devrait être possible de valoriser au maximum les ressources végétales du territoire de manière énergétique.

Conclusion

Au regard des différentes publications qui ont été lues, il s'est avéré que les cultures à biomasse étudiées à savoir le switchgrass, le miscanthus et le TTCR sont des cultures qui permettent de protéger la ressource en eau. En effet, leurs très faibles besoins en azote sont dus à la remobilisation des différents nutriments présents dans la plante avant le passage de la saison hivernale. De plus, elles ont une forte efficience d'utilisation de l'azote et arrivent, grâce à leur système racinaire développé, à capter l'azote sur de grandes surfaces. Elles sont donc indiquées pour être implantées dans l'impluvium de Vittel-Contrexéville sur des surfaces utilisées en cultures. De ce fait, dans un but de développement de ces cultures, plusieurs agriculteurs ont été enquêtés sur leur perception des cultures à biomasse et de leurs éventuelles motivations à en implanter. Les agriculteurs partenaires d'Agrivair qui ont bien voulu répondre aux questions ont montré une certaine ouverture sur ces cultures bien qu'ils n'aient pas tous la volonté d'en implanter pour le moment. Les différentes réponses vont permettre d'adapter le discours et d'apporter une argumentation permettant une meilleure connaissance des cultures et de leurs conduites. Le tout en répondant aux attentes des exploitants identifiés comme étant potentiellement d'accord à faire des essais et à se lancer dans une production. Le point majeur qui permettra l'implantation de manière durable de ces cultures est le développement de débouchés entrainant la création de filières. Ainsi, comme vu précédemment, des pistes sont en cours. Il faut réussir à concrétiser ces opportunités en mettant les moyens nécessaires si l'on veut y arriver. Que ce soit au niveau de l'utilisation de la biomasse comme combustible ou paillage horticole où des accompagnements vont devoir être réalisés pour aider les communes qui veulent se lancer ou de son utilisation en litière pour animaux, où les acteurs équins sont demandeurs d'essais, il est nécessaire d'avoir une vision claire sur ce qui va être proposé comme accompagnement. De plus, il est possible que certaines exploitations bovines soient intéressées par l'utilisation de cette ressource comme litière. Une valorisation dans un futur plus lointain peut être la fabrication de biocarburant de seconde génération. En effet, de nombreuses recherches sont effectuées pour utiliser ces cultures à biomasses comme biocarburant.

Ces différents débouchés présents sur le territoire offrent à tous ces acteurs la possibilité de travailler en commun et de permettre le développement de valeur ajoutée sur le territoire. Grâce à cela, les exploitants de l'impluvium auront la triple casquette, producteur de nourriture, producteur d'énergie et gardien de la qualité de l'eau.

Références bibliographiques

[1] Sur la demande d'autorisation d'exploiter, en tant qu'eau minérale naturelle, après transport à distance et après traitement, l'eau du captage « ChâtillonLorraine », situé sur la commune de Suriauville (Vosges), 2004. *Académie nationale de médecine | Une institution dans son temps* [en ligne]. [Consulté le 16 août 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.academie-medecine.fr/sur-la-demande-dautorisation-dexploiter-en-tant-queau-minerale-naturelle-apres-transport-a-distance-et-apres-traitement-leau-du-captage-chatillonlorraine

[2] Rapport de l'OPECST n° 215 (2002-2003) de M. Gérard MIQUEL, 2003

[3] Agrivair : 25 ans au service de la protection des sources, [sans date]. *https://www.nestle-waters.fr* [en ligne]. [Consulté le 16 août 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.nestle-waters.fr/espace-presse/actualites/agrivair-25-ans-au-service-de-la-protection-des-sources

[4]La bioénergie, un rôle clé en vue des « 2°C », 2017. *Connaissance des Énergies* [en ligne]. [Consulté le 16 août 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.connaissancedesenergies.org/la-bioenergie-un-role-cle-en-vue-des-2degc-171127

[5]A travers les âges - Contrexeville, [sans date]. [en ligne]. [Consulté le 1 juin 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.ville-contrexeville.fr/Patrimoine-histoire/Travers-ages.html

[6]HISTORIQUE de VITTEL, [sans date]. . pp. 2.

[7] Vittel : Eau minérale naturelle - Nestlé Waters France, [sans date]. *https://www.nestle-waters.fr* [en ligne]. [Consulté le 1 juin 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.nestle-waters.fr/nous-connaitre/10-marques-sur-le-territoire/vittel

[8] Bouteille d'eau : son histoire, son évolution - Nestlé Waters, [sans date]. *https://www.nestle-waters.fr* [en ligne]. [Consulté le 1 juin 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.nestle-waters.fr/embouteiller-recycler/reinventer-l-emballage/histoire-de-la-bouteille-d-eau

[9] L'histoire de Nestlé Waters France, [sans date]. *https://www.nestle-waters.fr* [en ligne]. [Consulté le 1 juin 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.nestle-waters.fr/nous-connaitre/nestle-waters-france-belgique/histoire

[10] AGRIVAIR, la filiale de Nestlé Waters qui préserve l'environnement, [sans date]. *https://www.nestle-waters.fr* [en ligne]. [Consulté le 1 juin 2018 a]. Disponible à l'adresse : https://www.nestle-waters.fr/preserver-respecter/proteger-les-sources/agrivair

[11] Vittel et son environnement, [sans date]. [en ligne]. [Consulté le 3 juillet 2018]. Disponible à l'adresse : http://www4.ac-nancy-metz.fr/svt/enseign/svt/ressourc/regional/apbg/vittel.html

[12] PIERRE, Philippe et AGRIVAIR, Directeur, 2010. La protection des ressources en eau à Nestlé Waters / Agrivair : une opportunité de croissance verte. . 2010. pp. 18.

[13] Nestlé Waters : la CGT réclame 44 emplois CDI, 2017. [en ligne]. [Consulté le 6 septembre 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.vosgesmatin.fr/edition-de-la-plaine/2017/11/30/nestle-waters-la-cgt-reclame-44-emplois-cdi

[14] LESUR CLAIRE, BAZOT MATHIEU, BIO-BERI FADEL, MARY BRUNO, JEUFFROY MARIE-HÉLÈNE et LOYCE CHANTAL, 2014. Assessing nitrate leaching during the three-first years of Miscanthus × giganteus from on-farm measurements and modeling. GCB Bioenergy. 5 juin 2014. Vol. 6, n° 4, pp. 439-449. DOI 10.1111/gcbb.12066.

[15] BARCO, A., MAUCIERI, C. et BORIN, M., 2018. Root system characterization and water requirements of ten perennial herbaceous species for biomass production managed with high nitrogen and water inputs. Agricultural Water Management. janvier 2018. Vol. 196, pp. 37-47. DOI 10.1016/j.agwat.2017.10.017.

[16] FERRARINI, Andrea, SERRA, Paolo, ALMAGRO, María, TREVISAN, Marco et AMADUCCI, Stefano, 2017. Multiple ecosystem services provision and biomass logistics management in bioenergy buffers: A state-of-the-art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. juin 2017. Vol. 73, pp. 277-290. DOI 10.1016/j.rser.2017.01.052.

[17] JOO, Eva, ZERI, Marcelo, HUSSAIN, Mir Zaman, DELUCIA, Evan H. et BERNACCHI, Carl J., 2017. Enhanced evapotranspiration was observed during extreme drought from Miscanthus, opposite of other crops. GCB Bioenergy. août 2017. Vol. 9, n° 8, pp. 1306-1319. DOI 10.1111/gcbb.12448.

[18] MCCALMONT, Jon P., HASTINGS, Astley, MCNAMARA, Niall P., RICHTER, Goetz M., ROBSON, Paul, DONNISON, Iain S. et CLIFTON-BROWN, John, 2017. Environmental costs and benefits of growing Miscanthus for bioenergy in the UK. GCB Bioenergy. mars 2017. Vol. 9, n° 3, pp. 489-507. DOI 10.1111/gcbb.12294.

[19] SHARMA, Suresh et CHAUBEY, Indrajeet, 2017. Surface and Subsurface Transport of Nitrate Loss from the Selected Bioenergy Crop Fields: Systematic Review, Analysis and Future Directions. Agriculture. 15 mars 2017. Vol. 7, n° 12, pp. 27. DOI 10.3390/agriculture7030027.

[20] LEWANDOWSKI, I., CLIFTON-BROWN, J.C., SCURLOCK, J.M.O. et HUISMAN, W., 2000. Miscanthus: European experience with a novel energy crop. Biomass and Bioenergy. octobre 2000. Vol. 19, n° 4, pp. 209-227. DOI 10.1016/S0961-9534(00)00032-5.

[21] CHEN, Yong, ALE, Srinivasulu, RAJAN, Nithya et MUNSTER, Clyde, 2017. Assessing the hydrologic and water quality impacts of biofuel-induced changes in land use and management. GCB Bioenergy. 1 septembre 2017. Vol. 9, n° 9, pp. 1461-1475. DOI 10.1111/gcbb.12434.

[22] CHRISTIAN, DG., RICHE, AB., 1998. Nitrate leaching losses under Miscanthus grass planted on a silty clay loam. Soil Use and Management 1998;14:131{5.

[23] WHITAKER, Jeanette, FIELD, John L., BERNACCHI, Carl J., CERRI, Carlos E. P., CEULEMANS, Reinhart, DAVIES, Christian A., DELUCIA, Evan H., DONNISON, Iain S., MCCALMONT, Jon P., PAUSTIAN, Keith, ROWE, Rebecca L., SMITH, Pete, THORNLEY, Patricia et MCNAMARA, Niall P., 2018. Consensus, uncertainties and challenges for perennial bioenergy crops and land use. GCB Bioenergy. mars 2018. Vol. 10, n° 3, pp. 150-164. DOI 10.1111/gcbb.12488.

[24] RECOUS, Sylvie, FERCHAUD, Fabien et HOUOT, Sabine, 2016. La valorisation énergétique des biomasses peut-elle changer l'équilibre des cycles biogéochimiques dans les sols cultivés ? Innovations Agronomiques. 2016. Vol. 54, pp. 41-58.

[25] ESCOBAR, Neus, RAMÍREZ-SANZ, Clara, CHUECA, Patricia, MOLTÓ, Enrique et SANJUÁN, Neus, 2017. Multiyear Life Cycle Assessment of switchgrass (Panicum virgatum L.) production in the Mediterranean region of Spain: A comparative case study. Biomass and Bioenergy. décembre 2017. Vol. 107, pp. 74-85. DOI 10.1016/j.biombioe.2017.09.008.

[26] LESUR, Claire, 2012. Cropping Miscanthus x giganteus in commercial fields: from agro-environmental diagnostic to ex ante design and assessment of energy oriented cropping systems. . décembre 2012. pp. 194.

[27] KEERTHI, Shamitha et MILLER, Shelie.A., 2017. Regional differences in impacts to water quality from the bioenergy mandate. Biomass and Bioenergy. novembre 2017. Vol. 106, pp. 115-126. DOI 10.1016/j.biombioe.2017.08.002.

[28] SARKAR S., MILLER, SA., 2014. Water quality impacts of converting intensively-managed agricultural lands to switchgrass. Biomass and Bioenergy, 68, 32–43.

[29] HOLLAND, R.A., EIGENBROD, F., MUGGERIDGE, A., BROWN, G., CLARKE, D. et TAYLOR, G., 2015. A synthesis of the ecosystem services impact of second generation bioenergy crop production. Renewable and Sustainable Energy Reviews. juin 2015. Vol. 46, pp. 30-40. DOI 10.1016/j.rser.2015.02.003.

[30] GOULDING, KWT., BAILEY, NJ., BRADBURY, NJ., et al., 1998. Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes. New Phytologist, 139, 49–58.

[31] SHIELD, IF., BARRACLOUGH, TJP., RICHE, AB., YATES, NE., 2014. The yield and quality response of the energy grass Miscanthus 9 giganteus to fertiliser applications of nitrogen, potassium and sulphur. Biomass and Bioenergy, 68, 185–194.

[32] Climat Vittel: Diagramme climatique, Courbe de température, Table climatique pour Vittel - Climate-Data.org, [sans date]. [en ligne]. [Consulté le 14 août 2018]. Disponible à l'adresse : https://fr.climate-data.org/location/66109/

[33] PAVARD, Lucie, SAMYN Annick, STILMANT, Didier, DELFOSSE, Philippa, BARTHELEMY, Marie, GODIN, Bruno, LECLECH, Nathael, SCHMIT, Thomas, TASIAUX, Bertrand et VANNEROM, Aurélie, 2012. biomasse_dossier_enerbiom_travaux_et_innovations_2012 .pdf. [en ligne]. 2012. [Consulté le 20 août 2018]. Disponible à l'adresse : https://grandest.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Grand-Est/049_Inst-Acal/RUBR-agro-environnement/energie-biomasse/biomasse_dossier_enerbiom_travaux_et_innovations_2012.pdf

[34] Le miscanthus a la fibre écolo | Journal Paysan Breton, 2017. Journal Paysan Breton - Hebdomadaire technique agricole [en ligne]. [Consulté le 14 août 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.paysan-breton.fr/2017/12/le-miscanthus-a-la-fibre-ecolo/

[35] Le miscanthus permet de se chauffer à moindre coût, 2018. ladepeche.fr [en ligne]. [Consulté le 14 août 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.ladepeche.fr/article/2018/01/30/2731989-le-miscanthus-permet-de-se-chauffer-a-moindre-cout.html

[36] Rentabilité Se lancer dans la culture de miscanthus, 2009. Terre-net [en ligne]. [Consulté le 14 août 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturale/appros-phytosanitaire/article/miscanthus-se-lancer-reperes-economiques-culture-energetique-216-54701.html

[37] ROBINET, Delphine, 2009. Calcul de la marge brute de la culture du miscanthus. ValBiom [en ligne]. [Consulté le 14 août 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.valbiom.be/files/library/Docs/Miscanthus/2009_dr_05calculdelamargebrutelieealaculturedumiscanthus1252400811.pdf

[38] JEANROY, Alain, [sans date]. Le miscanthus, une solution de chauffage économique et écologique. . pp. 23.

[39] GAUTHIER, Gilles, 2013. Etude économique de la production et de la densification du miscanthus. . 2013. pp. 24.

[40] L'observatoire de la formation des prix et des marges - Resultats par Filieres, [sans date]. [en ligne]. [Consulté le 6 septembre 2018]. Disponible à l'adresse : https://observatoire-prixmarges.franceagrimer.fr/resultats/Pages/ResultatsFilieres.aspx?idfiliere=20&sousmenuid=379

[41] NOVABIOM, [sans date]. Pour produire ou se procurer cette litière : . pp. 2.

[42] JEANROY, Alain, [sans date]. Le miscanthus, une litière pour animaux performante et durable. . pp. 11.

[43] BÉATRICE, Colleu et ANNE-CATHERINE, Dalcq, 2013. PLM_litiere_miscanthus_en_logettes.pdf. PLM-magazine [en ligne]. 2013. [Consulté le 16 août 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.novabiom.com/downloads/presse/PLM_litiere_miscanthus_en_logettes.pdf

[44] VERGONJEANNE, Robin, 2016. Bâtiment d'élevage innovant 2 000 bottes de paille économisées grâce à la litière en miscanthus. Web-agri [en ligne]. 2016. [Consulté le 16 août 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.web-agri.fr/conduite-elevage/sante-animale/article/nous-avons-economise-2000-bottes-de-paille-grace-a-la-litiere-en-miscanthus-1184-118638.html

Annexes

ANNEXES **66**

Annexe 1 : Développement territorial de la protection des ressources en eau : 66
un projet de design territorial partagé pour l'impluvium de Vittel-Contrexéville 66
Annexe 2 : Synthèse bibliographique de l'impact des cultures à biomasse sur leur environnement. 68
Annexe 3 : Impact du miscanthus et du switchgrass sur l'hydrologie du bassin 86
Annexe 5 : Questionnaire 93
Annexe 6 : Présentation des trois itinéraires techniques 98
Annexe 7 : Document présenté lors de la promotion du miscanthus en litière équine 101

Annexe 1 : Développement territorial de la protection des ressources en eau : un projet de design territorial partagé pour l'impluvium de Vittel-Contrexéville

Par : Marc Benoit, Inra ; Christophe Klotz ; Agrivair
VF, 24/11/2017

Au moment où de nouvelles recompositions territoriales interrogent l'avenir de l'impluvium, le design territorial[45] , par la double démarche d'entrée par les usages (utilisations du territoire agricole) Et protection des ressources en eau) et de co-conception de projet, peut en effet permettre d'identifier les blocages et les leviers chez les divers acteurs pour faire évoluer le développement du territoire de l'impluvium. Deux questions sont alors centrales (voir les Entretiens du Pradel, 2017) :
- Comment penser la conception de projets agricoles permettant de répondre à des objectifs partagés entre les agriculteurs et les autres acteurs de la société co-agissant dans l'impluvium ?
- Quelles sont les conditions pour qu'un projet de design territorial favorise l'engagement durable des acteurs du territoire?

Le design territorial à mettre en œuvre sur l'impluvium de Vittel-Contrexéville implique des améliorations dans la situation de gestion déjà pratiquée, pour parvenir à un dispositif de gestion du territoire encore plus efficace.

Le développement de l'agriculture au sein de l'impluvium devra tenir compte de plusieurs forces motrices à l'œuvre :
- Etre compatibles avec l'adaptation et l'atténuation du changement climatique,
- S'adapter à des fluctuations de marchés de plus en plus marquées,
- S'adapter sur le long terme à une évolution du nombre d'exploitations agricoles présentes sur l'impluvium.

Trois axes sont prioritaires pour le programme AGREV 3 –DT (Développement Territorial):
1- Faire progresser les conduites actuelles avec une amélioration du cahier des propositions revu en 2016,
2- Accroître la surface en prairies permanentes sous diverses formes, grâce à une valorisation continue de ses produits,
3- Insérer dans le territoire de nouveaux couverts permanents comme les cultures à biomasse pérennes.

[45] La notion de design territorial n'a pas de définition stabilisée. Pour appréhender le terme de design, nous prenons en référence l'approche par l'étymologie de S. Vial (2014) : « Ainsi s'éclaire l'étymologie souvent mal comprise du terme design. Du latin de-signare (« marquer d'un signe ») que l'on retrouve aussi bien dans l'italien disegno (schéma) et l'anglais de-sign, le design est à entendre, en tant que projet de conception méthodique, comme une anticipation par les signes (i.e. les dessins). L'invention du projet par Brunelleschi, ce n'est rien d'autre qu'« une méthodologie du disegno, c'est-à-dire une méthodologie de l'anticipation de l'oeuvre à réaliser : il s'agissait, grâce aux lois de la perspective qu'il venait de mettre au point, de pouvoir représenter par le dessin la construction projetée. » (Boutinet, 1993 : 10). Les signes, ici, ce sont les représentations en perspective, c'est-à-dire les images du projet. » (Vial, 2014. « De la spécificité du projet en design : une démonstration », Communication&Organisation 2014/2 (n° 46), p. 17-32.)

1) **Faire progresser les conduites actuelles en améliorant le cahier des propositions revu en 2016 :**

Les suivis des sites à bougies poreuses, tant celles qui instruisent la qualité des eaux sous cahier des charges que les conduites innovantes mises au point par les agriculteurs, permettent d'obtenir des informations sur les améliorations à mettre en œuvre. Le traitement des données se fera en relativisant les résultats de pertes en nitrate sur la base des pertes mesurées sous prairies fauchées, prises ainsi comme le couvert de référence pour les comparaisons de pertes en nitrate. Ainsi, l'objectif sera d'améliorer en continu les conduites des différents systèmes de culture pour se rapprocher de niveau faible des pertes observées sous prairies fauchées, et mesurer les écarts qui séparent ces systèmes de culture du couvert de prairies fauchées, pris comme couvert de référence.

2) **Accroître la surface en prairies permanentes sous diverses formes :**

L'enjeu est ici de valoriser au mieux les productions à base d'herbe dans les filières actuelles, voire dans de nouvelles filières. Si rien n'est fait très rapidement pour valoriser les produits issus des élevages herbagers, le territoire de l'impluvium risque de connaître une évolution semblable à celle du reste du Plateau lorraine : un retournement généralisé des prairies. Les publications nouvelles sur l'intérêt nutritionnel des produits issus d'animaux nourris à l'herbe doivent inciter à développer une reconnaissance de ces produits. Les arguments nombreux développés dans le numéro spécial 7-2 *« Nutrition et agronomie»* de la revue Agronomie-Environnement &Sociétévont dans ce sens et méritent d'être portés à connaissance des agriculteurs pour tenter une valorisation économique de la qualité de ces productions animales à base de prairies.
Une autre voie de valorisation de l'herbe est de mettre au point une filière de foin de qualité, à l'instar du *foin de Crau*, valoriserait les produits de la prairie via un foin à haute valeur ajoutée.
Une discussion généralisée avec les gestionnaires des filières actuelles, mais aussi sur de nouvelles filières sera à impulser.

3) **Insérer dans le territoire de nouveaux couverts permanents : les cultures à biomasse pérennes.**

Les filières agro-alimentaires classiques, lait, viande, céréales ont montré ces dernières années des fluctuations inquiétantes. Ainsi, introduire une diversification centrée sur les filières biomasses nous semble porteur d'avenir : production d'énergie (bâtiments communaux et habitations, PME, usines d'embouteillage de Nestlé Waters, thermes, …), production de paillages (équitation, espaces verts, …) sont déjà deux voies de diversification mises en œuvre dans d'autres régions d'Europe.
Nous proposons un développement de diverses cultures à biomasse dont celles à vocation énergétiques sur le territoire de l'impluvium. En effet, sur le critère « qualité de l'eau », la bibliographie existante nous permet d'orienter l'avenir du territoire vers les cultures à biomasse intéressantes à développer, car elles induisent des flux de carbone importants, et des flux azotés limités. Le miscanthus, les switchgrass, les T(T)CR, la biomasse issue des haies sont des agrosystèmes où les flux de C sont très importants et les flux d'N vers les ressources en eau, très limités .
Ainsi, le développement de nouvelles cultures à biomasse, via leur insertion pertinente dans le territoire de l'impluvium, et la création de valeur ajoutée agricole dans de nouvelles filières, nous semble un enjeu majeur pour l'avenir de la protection des ressources en eau de l'impluvium.

Pour chacun de ces axes de recherche, il sera établi une déclinaison spécifique par exploitation pour instruire sa stratégie innovante à deux pas de temps : une vision partagée à 15 ans, puis des objectifs à atteindre dans 3 ans, via un plan d'actions opérationnel. L'enjeu est de co-concevoir avec les agriculteurs les innovations qui permettront d'atteindre leurs trajectoires d'avenir, entre territoires de leurs exploitations et territoire de l'impluvium.

IMPACT DES CULTURES A BIOMASSE SUR LEUR ENVIRONNEMENT

INTRODUCTION **69**

I. LES TRAITS FONCTIONNELS DES PLANTES A VALEUR ENERGETIQUE INFLUENCE LEUR MILIEU PAR DIFFERENTS FACTEURS. **69**

A. ROLE DU SYSTEME RACINAIRE 69
1. Le système racinaire est dense et pérenne 69
2. Le système racinaire peut agir sur les microorganismes du sol 71
3. Impact des rhizomes pour le miscanthus et le switchgrass 71
B. CARACTERISTIQUE DU SYSTEME AERIEN 71
1. Impact de la forte évapotranspiration des cultures 72
a) Une forte production de biomasse 72
b) Réduction de l'eau présente dans le sol 72
2. Système aérien du Miscanthus 73
C. CONSEQUENCES ET IMPACTS DES TRAITS FONCTIONNELS 73

II. CULTURES ENERGETIQUES PERENNES ET CYCLE DE L'AZOTE. **74**

A. LES FORMES D'AZOTES IMPACTEES SONT MAJORITAIREMENT LE PROTOXYDE D'AZOTE (N_2O) ET LES NITRATES (NO_3^-) 74
1. Impact sur les émissions de N_2O 74
2. Impact sur le lessivage des nitrates 75
B. IMPACT DE L'IMPLANTATION ET QUESTION DE LA FERTILISATION 76
1. Impacts liés à l'implantation 76
2. Question de la fertilisation 77
C. UTILISATION DE ZONES TAMPONS DANS LA REDUCTION DES PERTES D'AZOTE 78

III. AUTRES IMPACTS D'IMPORTANCE DES CULTURES ENERGETIQUES PERENNES **79**

A. IMPACT DES CULTURES PERENNES A VALEUR ENERGETIQUE SUR LE CYCLE DU CARBONE 79
1. Variation du stock de carbone du sol 79
2. Emissions de CO_2 et lien énergétique 80
B. IMPACTS SUR LA BIODIVERSITE, ROLE DU SOL ET IMPLANTATION 80
1. Impact sur la biodiversité 80
2. Rôle du sol 80
3. Entretien particulier 81

CONCLUSION **81**

BIBLIOGRAPHIE **83**

RESUME 85
ABSTRACT 85
REFERENCEMENT : 85

Introduction

La vie est apparue sur Terre grâce à la présence d'eau liquide, tous les organismes vivant ont besoin d'eau pour vivre, que ce soit les végétaux pour réaliser la photosynthèse et produire des sucres et les animaux pour répondre à leur besoins. En 535, le code Justinien définit l'eau comme un bien commun, c'est-à-dire que l'eau appartient à tous et doit être géré par tous. Or l'eau est de plus en plus polluée et des normes de consommation ont été établies pour éviter les problèmes sanitaires. Ainsi, au sein de l'Union Européenne, l'eau peut être fournie à la consommation si sa concentration en nitrate est inférieure à 50 mg/L. Les agriculteurs, de par leurs pratiques, sont pointés du doigt et sont considérés comme étant pollueurs de l'eau.

Depuis quelques années, des études sont faites sur le développement des cultures à valeur énergétique pérennes. En effet, les cultures à valeur énergétique annuelles comme le maïs, utilisé pour la méthanisation, sont considérées comme rentrant en rivalité avec les denrées alimentaires et utilisent de grandes quantités de produits phytosanitaires qui participent à la pollution de l'eau. Les cultures pérennes à valeur énergétique comme le miscanthus, le switchgrass et les Taillis (Très) Courtes Rotation (T(T)CR) commencent à se développer et leur impact sur l'environnement est étudié. Ils peuvent être une solution pour allier production d'énergie à base de bio-ressource et faible pollution. Ce qui peut également être une des solutions de la transition énergétique.

Les TTCR sont des souvent constitués de saule mais peuvent être constitués d'autres essences qui sont coupés tous les 3 à 5 ans et sont utilisés comme combustible. Le miscanthus (*Miscanthus x giganteus*) ainsi que le switchgrass (*Panicum virgatum L.*) sont des plantes pérennes en C4 qui représentent un grand intérêt car « elles pourraient permettre d'obtenir une production élevée associée à de faibles impacts sur l'environnement, voire à des impacts positifs » (Lesur Claire et al. 2014).

I. Les traits fonctionnels des plantes à valeur énergétique influence leur milieu par différents facteurs.

Les cultures énergétiques pérennes restent en place plusieurs années. Qu'elles soient herbacées ou lignocellulosiques, elles développent des organes qui vont impacter le milieu où elles se développent.

A. Rôle du système racinaire

Les différentes espèces étudiées présentent un système racinaire qui, suivant les espèces, va avoir un impact différent sur leur milieu. Leur système racinaire est un système dense et pérenne (Barco, Maucieri, Borin 2018; Holland et al. 2015; Lesur Claire et al. 2014; Lewandowski et al. 2000; Sharma, Chaubey 2017; Whitaker et al. 2018). Ce système racinaire développé agit également sur la microflore du sol (Ferrarini, Fornasier, et al. 2017; Ferrarini, Serra, et al. 2017; McCalmont et al. 2017). Pour passer l'hiver, les cultures comme le Miscanthus et le Switchgrass ont des rhizomes, ce qui permet une remobilisation des nutriments entre la mauvaise et la bonne saison (Barco, Maucieri, Borin 2018; Lewandowski et al. 2000; McCalmont et al. 2017; Recous, Ferchaud, Houot 2016; Sharma, Chaubey 2017).

1. Le système racinaire est dense et pérenne

Les cultures étudiées se caractérisent par une durée de vie longue, pouvant aller jusqu'à 20 ans pour le Miscanthus (Lesur Claire et al. 2014; Lesur 2012). Ces cultures possèdent une forte densité racinaire (Barco, Maucieri, Borin 2018; Lesur Claire et al. 2014), atteignant les 0,1 mgMS/cm^3 (Sharma, Chaubey 2017). Cela forme un tapis dense au bout de deux-trois ans pour le Miscanthus (Lewandowski et al. 2000). Cette densité racinaire agit sur la culture en augmentant la densité de ses tiges, ce qui réduit l'espace entre les plantes (Sharma, Chaubey 2017). De plus, cette densité racinaire agit sur le sol environnant. En effet, ce système racinaire extensif et pérenne participe à la rétention de l'azote (N) du sol. Ainsi, alors que les cultures de soja non fertilisées accusent une perte

de nitrates, les cultures de Miscanthus et de Switchgrass, grâce à leur système extensif et pérenne réduisent les pertes de nitrate (Sharma, Chaubey 2017; Lesur Claire et al. 2014; Lewandowski et al. 2000). Lorsque ces cultures sont utilisées comme zone tampon aux abords des cultures conventionnelles, elles permettent, grâce à leur système racinaire développé, un meilleur prélèvement de l'azote au bord des cultures présent en excès et qui est lessivée en partie, comparé à des espèces spontanées (Ferrarini, Fornasier, et al. 2017). Cette densité de racine permet également une meilleure absorption à la fois des nutriments mais également de l'eau présente dans le sol (Sharma, Chaubey 2017; Barco, Maucieri, Borin 2018; Ferrarini, Serra, et al. 2017). En effet, la densité de racine des plantes influence l'assimilation de l'eau (Barco, Maucieri, Borin 2018). Les cultures à biomasse énergétique peuvent augmenter l'infiltration en eau, prévenir l'érosion du sol et réduire la mobilité des nutriments en surface. Ainsi, lorsque le Switchgrass est planté comme tampon, il est possible d'observer une haute efficience de rétention des sédiments qui arrivent des systèmes de cultures conventionnels. L'efficience de captage des sédiments par le Switchgrass atteint 66 %, 77% et 95 % de l'eau qui ruisselle, pour des tampons de 3, 6 et 7 m respectivement comparé à des cultures conventionnelles. Il est possible d'atteindre une réduction de 25 à 50 % avec un tampon de 1 m de Switchgrass ou de Miscanthus (Ferrarini, Serra, et al. 2017).

La production dense de racine est couplée à une production profonde de racine pour ces espèces (Sharma, Chaubey 2017; Barco, Maucieri, Borin 2018; Joo et al. 2017; Ferrarini, Serra, et al. 2017; Lewandowski et al. 2000; McCalmont et al. 2017). Le réseau racinaire des plantes pérenne peut atteindre les 100 cm de profondeur (Sharma, Chaubey 2017) voir plus. En effet, les racines du Miscanthus peuvent atteindre des profondeurs de plus de 250 cm (Lewandowski et al. 2000). Le Miscanthus peut aller chercher de l'eau en profondeur (Barco, Maucieri, Borin 2018) et il possède une forte présence de racine jusque 100 cm (Joo et al. 2017). Les espèces n'ont pas la même production de biomasse souterraine du fait des différentes capacités d'exploitation du sol mais on retrouve une forte production de biomasse entre 0 et 20 cm de profondeur (Barco, Maucieri, Borin 2018). Ce système racinaire profond, notamment pour le Miscanthus, contribue à une augmentation de la zone de dénitrification (Ferrarini, Serra, et al. 2017).

Ce système racinaire dense et pérenne participe à l'amélioration de la structure du sol (McCalmont et al. 2017; Ferrarini, Serra, et al. 2017; Lewandowski et al. 2000). Sous les cultures énergétiques pérennes, le sol a une meilleure porosité et une moindre compaction du fait d'une présence plus importante de racines qui forment un réseau fibreux et étendu. Cela participe à la réduction des perturbations du sol et à l'amélioration des propriétés hydraulique du sol (infiltration, conductivité hydraulique et réserve en eau) comparé aux cultures annuelles (McCalmont et al. 2017). Il y a donc une augmentation de l'infiltration de l'eau (Ferrarini, Serra, et al. 2017; Chen et al. 2017). L'infiltration, comparé à une culture de coton aux États-Unis d'Amérique, peut augmenter de 60 % avec du Switchgrass irrigué et elle peut être réduite de 73 % avec du Miscanthus non irrigué (Chen et al. 2017). La rétention de l'eau est quant à elle augmentée (Lewandowski et al. 2000; McCalmont et al. 2017). Cette augmentation de la rétention en eau du sol peut être attribuée à l'augmentation de la matière organique présente dans le sol (Recous, Ferchaud, Houot 2016).

La culture de miscanthus reste en place toute l'année, ce qui augmente la durée d'évapotranspiration comparé à des cultures annuelles. En outre, la forte densité de la biomasse aérienne de la plante mène à une plus forte évapotranspiration et réduit ainsi le drainage de l'eau sous les racines. En comparaison avec des cultures de soja et de maïs, le Miscanthus peut réduire la lame drainante de 100 à 120 mm/an (Stephens et al. 2001). Un mauvais calcul de la surface à implanter en culture à biomasse peut donc entrainer une réduction de la recharge des nappes d'eau souterraines. Cependant, ces caractéristiques spécifiques aux cultures à biomasses peuvent se montrer avantageuses sur des sols compactés et peu drainants. En effet, les cultures pérennes augmentent la porosité du sol, ce qui améliore les propriétés hydrauliques du sol (Blanco-Canqui 2010)

(McCalmont et al. 2017)

2. Le système racinaire peut agir sur les microorganismes du sol

Différentes études montrent qu'il existe des liens entre les racines des cultures énergétiques pérennes et les microorganismes du sol (Ferrarini, Fornasier, et al. 2017; Ferrarini, Serra, et al. 2017; McCalmont et al. 2017). L'activité des bactéries fixatrices d'azote au niveau des racines de miscanthus (Sharma, Chaubey 2017) qui peut être considérée comme élevée expliquerait la forte minéralisation de la matière organique particulièrement observée lors de l'année d'implantation du miscanthus (McCalmont et al. 2017). La nitrogénase, enzyme permettant de former de l'ammoniac (NH_3) à partir du diazote (N_2) atmosphérique, a été détectée dans des rhizomes de Miscanthus et dans le sol avec une forte activité la première année (McCalmont et al. 2017). D'après Ferrarini et al (2017), le système racinaire souterrain des cultures énergétiques pérennes permet l'activation de bactéries du sol qui agissent sur la mobilité de l'azote du sol. Les interactions plantes-microorganismes jouent un rôle important dans la réduction de l'émission de protoxyde d'azote (N_2O) du sol et des cultures énergétiques, notamment grâce à l'amélioration de la diversité et à la stabilisation de la communauté d'archées dénitrifiantes (Ferrarini, Serra, et al. 2017).

3. Impact des rhizomes pour le miscanthus et le switchgrass

Le miscanthus et le Switchgrass possèdent des rhizomes (Sharma, Chaubey 2017; Recous, Ferchaud, Houot 2016; Lewandowski et al. 2000). Ces rhizomes se forment majoritairement dans les 20 premiers centimètres (Barco, Maucieri, Borin 2018). Les rhizomes constituent un « réservoir » de nutriments (comprenant de l'azote) pendant l'hiver et ils permettent d'alimenter la plante au printemps. (Recous, Ferchaud, Houot 2016). Les rhizomes jouent un rôle dans l'économie des nutriments avec une forte utilisation de l'azote stocké en fin de croissance et mobilisée au printemps (Lewandowski et al. 2000). Il est estimé que cette relocalisation des racines vers le rhizome correspond à 21-46 % d'azote, 36-50 % de phosphore, 14-30 % de potassium et 27 % de magnésium (Lewandowski et al. 2000). Neukirchen a montré qu'à la fin de l'hiver, les rhizomes de 6 ans en Allemagne contenaient 265 kg d'azote et 235 kg de potassium par hectare. Ce stockage des nutriments dans le rhizome couplé à la sénescence des feuilles réduit de 55 à 60 % la concentration en éléments minéraux des parties aériennes du Miscanthus, comparé à la même biomasse avant le début de la sénescence à l'automne (Recous, Ferchaud, Houot 2016). Au printemps, ces réserves sont mobilisées pour être ramenées dans les nouvelles racines, ce qui rend le développement du Miscanthus indépendant de l'offre de l'azote du sol (Neukirchen 1995). Une expérience utilisant un apport d'azote radioactif ^{15}N de 60 kg^{15}N/ha, montre qu'il y a seulement 38 % des $^{15}NH_4$ et $^{15}NO_3$ qui sont prélevés par la plante et que la moitié est présent dans le rhizome (Lewandowski et al. 2000).

Le système racinaire qui est développé sous ces cultures pérennes, agit sur différents facteurs qui sont à la fois physique et chimique. Physique par l'action des racines qui, du fait de leur densité et de leur longueur, modifient la porosité des sols et agit sur la rétention de l'eau. Elles permettent également une plus grande surface de contact avec le sol ce qui favorise les échanges et les interactions avec les microorganismes. Chimique car elles participent aux cycles des nutriments et plus particulièrement des nutriments azotés.

B. Caractéristique du système aérien

Le système aérien est le plus visible chez les plantes. Pour ces espèces pérennes à valeur énergétique, le système aérien se caractérise par une forte évapotranspiration, particulièrement importante chez le Miscanthus (Sharma, Chaubey 2017; Holland et al. 2015; Gerssen-Gondelach, Wicke, Faaij 2017; Panagopoulos et al. 2017; Joo et al. 2017; McCalmont et al. 2017; Guo et al. 2018). Cela peut s'expliquer en partie par une canopée dense du Miscanthus et des autres cultures (McCalmont et al. 2017)

1. Impact de la forte évapotranspiration des cultures

Les différentes études révèlent que le Miscanthus et le Switchgrass ont une efficience d'utilisation de l'eau élevée (Barco, Maucieri, Borin 2018; Holland et al. 2015; Recous, Ferchaud, Houot 2016; Sharma, Chaubey 2017; Escobar et al. 2017; McCalmont et al. 2017; Whitaker et al. 2018; Lesur 2012; Lesur Claire et al. 2014; Lewandowski et al. 2000). Cette efficience d'utilisation de l'eau est définie comme le rapport entre la production de biomasse et l'évapotranspiration. Ainsi, le Miscanthus a une efficience d'utilisation de l'eau d'environ 4g/L (Barco, Maucieri, Borin 2018). Cette efficacité peut aller jusqu'à la formation de 9,2 $gMS_{(aérienne)}/kgH_2O$ (McCalmont et al. 2017). En moyenne, l'efficience d'utilisation de l'eau du Switchgrass et du Miscanthus est de 2,7 et de 3,9 gMS/L respectivement contre 1,75 gMS/L en moyenne pour des espèces pluriannuelles et annuelles (Recous, Ferchaud, Houot 2016). Mais cette forte efficience implique une sensibilité au manque d'eau (Ferrarini, Fornasier, et al. 2017).

Ces cultures représentent une opportunité dans le développement d'énergie à base de matière organique car elles sont productives. Cette forte production s'accompagne d'un fort besoin en eau. Il est donc nécessaire de peser les pours et les contres entre la production de biomasse et le maintien quantitatif de la ressource en eau.

a) Une forte production de biomasse

Le Miscanthus et le Switchgrass peuvent pousser et maintenir une forte productivité sur le long terme(Sharma, Chaubey 2017; Barco, Maucieri, Borin 2018; Recous, Ferchaud, Houot 2016; Lesur 2012). Du fait de leur longue saison de croissance, qui permet d'optimiser l'interception du rayonnement, les rendements sont plus élevés et peuvent atteindre 20 à 50 tMS/ha/an en récolte précoce et 10 à 30 t MS/ha/an en fin d'hiver (Lesur 2012). En Europe, après deux-trois années d'implantation, le Miscanthus, atteint des rendements de 10 à 25 tMS/ha (Lewandowski et al. 2000). Le Switchgrass quant à lui, peut atteindre sa production maximale au bout de trois ans avec un potentiel de production d'environ 16 t/ha (Escobar et al. 2017). Le rendement du Miscanthus peut augmenter lorsqu'il a de l'eau de façon non limitante (Ferrarini, Fornasier, et al. 2017; Lewandowski et al. 2000).

b) Réduction de l'eau présente dans le sol

L'évapotranspiration élevée participe à la réduction de l'eau dans le sol (Sharma, Chaubey 2017; Joo et al. 2017; Lewandowski et al. 2000). Les cultures de Miscanthus et de Switchgrass impactent le flux d'eau sur le territoire ce qui peut présenter un effet négatif vis-à-vis du stress hydrique du milieu (Holland et al. 2015). Les cultures énergétiques vivaces réduisent marginalement la disponibilité en eau à l'échelle locale (Whitaker et al. 2018). Ainsi, il est important de prendre en considération les modifications qu'il peut y avoir sur l'hydrologie générale du bassin concerné. Par exemple, sur le bassin du Mississippi, des modélisations ont montré que le remplacement de la production de maïs pour l'éthanol en culture cellulosique vivace impacte le débit du fleuve (Whitaker et al. 2018) et peux aller jusqu'à une baisse de 10 % de son débit (Panagopoulos et al. 2017). De même sur le bassin hydrique de l'Indiana, les cultures énergétiques pérennes influencent l'hydrologie en y réduisant également le débit (Guo et al. 2018). En considérant un développement plus restreint, une conversion en Miscanthus de 25 % dans des zones de stress hydrique et de 50 % dans les autres zones, il y aurait un impact sévère sur le cycle hydrologique (Holland et al. 2015). Il n'est pas préconisé de réaliser de vaste monocultures de Miscanthus car le Miscanthus peut contribuer à un risque d'épuisement des nappes, surtout en zone sensible (Gerssen-Gondelach, Wicke, Faaij 2017).

Lors des périodes de sécheresses, le Miscanthus impacte plus le sol car il a la capacité d'aller chercher l'eau en profondeur et il en absorbe beaucoup ce qui influence la recharge en eau du sol (McCalmont et al. 2017; Whitaker et al. 2018).

Ces impacts restent négligeables face à l'augmentation de la qualité de l'eau (Whitaker et al. 2018). Par leur forte évapotranspiration, ces plantes absorbent beaucoup d'eau, ce qui peut agir sur la régulation des inondations (Holland et al. 2015).

Ces cultures agissent sur l'écoulement de l'eau et réduisent les écoulements de surface (Panagopoulos et al. 2017). Cibin et al (2016) ont simulé une réduction de l'écoulement de surface annuel d'environ 12 à 15 % sous du Miscanthus et du Switchgrass par rapport à du maïs ou du soja. Cette baisse des écoulements superficiels annuels peut atteindre 88% lorsque ces cultures sont implantées à la place du coton (Chen et al. 2017). Cela représente un avantage contre les coulées d'eau boueuse. De plus , la forte évaporation avec une forte utilisation de l'eau du sol diminue la quantité d'eau du sol ce qui participe à la réduction des pertes par l'eau (Sharma, Chaubey 2017).

2. Système aérien du Miscanthus

Le miscanthus possède un index de surface foliaire élevé (Holland et al. 2015) ce qui indique une grande surface foliaire. Cette canopée dense intercepte plus de pluie au niveau des feuilles et augmente l'évaporation à ce niveau ce qui participe à la baisse des réserves en eaux sous le miscanthus (McCalmont et al. 2017). Mais cette forte production de matière organique aérienne permet une couverture constante du sol ce qui participe à la réduction des pertes de sédiments (Holland et al. 2015) mais également empêche le développement des adventices (McCalmont et al. 2017) et peut permettre une augmentation de la matière organique des sols (Lewandowski et al. 2000). Ces feuilles participent également à la fertilisation de la culture par recyclage des éléments aériens tombés au sol et dégradés (Recous, Ferchaud, Houot 2016)

Le système aérien de ces cultures est lié à une forte évapotranspiration ce qui agit sur la production de biomasse mais également sur la quantité d'eau qui est utilisée. L'eau évaporée a été captée par les racines ce qui participe d'autant plus à la réduction des quantités d'eau sous ces cultures si elles se trouvent dans des zones sensibles à la sécheresse. L'implantation de ces cultures nécessite donc une étude du lieu d'implantation ainsi que des risques liés à la quantité d'eau. Néanmoins, ces cultures participent à une augmentation de la qualité de l'eau ce qui est un atout considérable.

C. Conséquences et impacts des traits fonctionnels

Ces cultures peuvent servir dans la phytoépuration des boues issues de stations d'épurations. Ces boues peuvent être utilisées pour l'alimentation en eau des cultures, ce qui permet une filtration. (Barco, Maucieri, Borin 2018).

Les cultures pérennes à valeur énergétique impactent également leur environnement par leurs traits fonctionnels. Cela agit sur les différents besoins en nutriments et ces besoins évoluent au cours de leur développement. Comme vu précédemment, le Miscanthus et le Switchgrass ont une forte productivité et sur de longues périodes (Sharma, Chaubey 2017; Holland et al. 2015). Cette croissance se fait en continu même lorsque les réserves d'azote minérales sont élevées, ce qui correspond à l'été et au début de l'automne (Sharma, Chaubey 2017). Le Switchgrass et le Miscanthus ont des besoins élevés en azote les premiers jours de croissance (Sharma, Chaubey 2017) et sont considérés comme étant des espèces avec un faible besoin de nutriment pour la suite de leur développement (Escobar et al. 2017; Sharma, Chaubey 2017). Comme toutes les plantes, ces cultures énergétiques ont des besoins naturels en azote. Il est donc naturel que la production de biomasse passant par la prise d'azote des plantes joue un rôle important dans l'abattement de l'azote au niveau de tampons forestier et herbagés (Ferrarini, Fornasier, et al. 2017). Les premières années, la culture de miscanthus a une faible production de biomasse, il n'est donc pas forcément récolté mais les rendements augmentent avec le temps jusqu'à la cinquième année d'implantation (Lesur 2012). A l'inverse, le peuplier, utilisé dans les T(T)CR, a une croissance rapide, qui permettrait une baisse du chargement en nitrate et en phosphore des sols (Guo et al. 2018). Il est à noter que la croissance des plantes agit sur les nutriments transportés lors du drainage (Guo et al. 2018). Un autre facteur intervient, il s'agit de l'âge de la plantation. En effet, le lessivage de nitrates sous le Miscanthus décroît avec l'âge de la culture (Lesur Claire et al. 2014). Les pertes d'azote en première année sous du Miscanthus sont évaluées à 154 kgN/ha en hiver puis atteignent 8 puis 3 kgN/ha lors du

deuxième et troisième hiver (Christian et Riche 1998). En effet, la valeur de 3 kgN/ha se retrouve sous un Miscanthus non fertilisé lors de la troisième année, elle atteint les 30 kgN/ha lorsqu'il est fertilisé à 120 kgN/ha et ces valeurs sont proches de ce qui peut être retrouvé sous des prairies extensives entretenues (Lewandowski et al. 2000).
Du fait de la présence de rhizomes et de la dégradation de la matière organique par sénescence des feuilles, il y a un recyclage des nutriments qui s'effectue au niveau des cultures pérennes qui est à la fois interne et externe (Sharma, Chaubey 2017; Whitaker et al. 2018; Recous, Ferchaud, Houot 2016; Lewandowski et al. 2000). Ce recyclage permet de réduire les besoins en nutriments mais également les pertes, et plus particulièrement en azote, par la mise en réserve dans les rhizomes en automne des nutriments (Sharma, Chaubey 2017; Recous, Ferchaud, Houot 2016). De plus, le Miscanthus et le Switchgrass ont une efficience d'utilisation de l'azote élevé (Sharma, Chaubey 2017; Chen et al. 2017; Escobar et al. 2017; McCalmont et al. 2017; Lesur 2012; Lewandowski et al. 2000). Cela participe à la réduction des nitrates présent dans les eaux (Sharma, Chaubey 2017; Chen et al. 2017).
La forte croissance de ces espèces énergétiques implique de forts besoins en eau et en nutriments ce qui participe à la réduction des nitrates dans les eaux souterraines et de surface. L'âge de la culture énergétique agit également sur les pertes de nitrates en diminuant ces pertes avec l'âge. La pertes des parties aériennes sur le sol permet de limiter l'impact de la pluie mais également permet un recyclage des nutriments.

La physiologie des cultures pérennes à valeur énergétique impacte l'environnement dans lequel elles sont implantées. Ces impacts sont de natures différentes et varient suivant les organes qui interviennent. Le système racinaire dense et profond participe à la structuration du sol. Il agit sur les microorganismes du sol, impactant la mobilité de l'azote. Les rhizomes servent de réserve et participent au recyclage des nutriments tout comme le système aérien mais dans une moindre mesure. C'est par ce système aérien que l'évapotranspiration s'effectue impactant le milieu par les forts besoins en eau des cultures. Une attention particulière doit être apportée sur l'impact de ces cultures sur le flux d'eau du territoire. Enfin, les traits physiologiques participent à la diminution des pertes d'azote sous ces cultures.

Il peut être intéressant de voir l'impact de ces cultures sur le cycle de l'azote.

II. Cultures énergétiques pérennes et cycle de l'azote.

Il a été montré que les cultures énergétiques pérennes avaient un impact sur l'azote présent dans le sol. Cette deuxième partie détaille les formes d'azotes qui interviennent et le type d'impact qu'ont ces cultures sur l'azote.

A. Les formes d'azotes impactées sont majoritairement le protoxyde d'azote (N_2O) et les nitrates (NO_3^-)

1. Impact sur les émissions de N_2O

Le N_2O possède une potentiel de réchauffement global 298 fois plus grand sur 100 ans que le dioxyde de carbone CO_2 (IPCC, 2007), et l'agriculture est le premier secteur émetteur de ce gaz (McCalmont et al. 2017). Les sols participent à la fois à la production et à la consommation de N_2O du fait de l'activité microbienne. Les deux principaux processus microbiens qui sont à l'origine des flux/échanges sont la nitrification (oxydation biologique de l'ammonium en nitrite puis en nitrate) et la dénitrification (processus respiratoire au cours duquel les formes solubles de l'azote, à savoir nitrate et nitrite, sont réduits en composés gazeux comme l'oxyde nitrique, le protoxyde d'azote et le diazote). Cette dernière réaction se déroule en milieu anaérobie et augmente avec la teneur en azote. La production de N_2O par nitrification est faible car ce gaz est un coproduit de la réaction. Par contre, il est un produit intermédiaire de la dénitrification ce qui implique une forte production si la réaction n'aboutit pas (Viard et al. 2013). Il est important de noter que le flux de N_2O est 5 fois plus

important sous les cultures annuelles que sous les cultures énergétiques pérennes non fertilisées (McCalmont et al. 2017). Une réduction des émissions de N_2O est effectivement observée lorsque des cultures énergétiques pérennes sont cultivées (Ferrarini, Serra, et al. 2017; Whitaker et al. 2018; Lesur 2012). Lors d'expérimentations sur du Miscanthus et du colza, la mesure du flux de N_2O indique une valeur de 0 sous miscanthus contre 300 µgN_2O-N/m²/h pour le colza. 24 heures après fertilisation de 50 kgN/ha, les émissions grimpent et atteignent leur maximum après 36 heures soit 330 µgN_2O-N/m²/h sous Miscanthus et 2350 µgN_2O-N/m²/h sous colza. Les émissions déclinent ensuite et après 8 jours, il n'y a plus de différence observée (McCalmont et al. 2017). D'autres études montrent que les émissions de N_2O par le sol peuvent être réduites de 50 à 90 % avec des cultures énergétiques pérennes comparées à des cultures de rotation maïs-soja (Ferrarini, Serra, et al. 2017). Le Miscanthus participe donc grandement à la réduction de ces émissions de gaz (Lesur Claire et al. 2014). Ainsi, les émissions de N_2O peuvent être 5 fois moins importantes avec du Miscanthus non fertilisé qu'avec des cultures annuelles et peuvent même grimper à 100 fois moins si on les compare au pâturage intensif (McCalmont et al. 2017). Avec du Switchgrass ou du saule, les émissions annuelles de N_2O peuvent être réduites de 11 % (Ferrarini, Serra, et al. 2017). Bien que ces différentes cultures permettent une forte baisse des émissions de N_2O, cela ne se réalise pas dès l'implantation. Le passage de cultures annuelles à des cultures énergétiques permet une baisse de 48 % lors de l'établissement (1-2 ans) et passe à 61 % lorsque les cultures sont établies (plus de 3 ans) (Whitaker et al. 2018). De plus, les émissions de N_2O provenant des cultures vivaces dépendent fortement de l'utilisation antécédente des terres avec un plus grand risque d'une forte émission lors de l'établissement de la culture (Whitaker et al. 2018). De fortes émissions peuvent être enregistrées suivant la culture implantée et ce qu'elle remplace. Par exemple, la conversion de prairies en T(T)CR crée une augmentation des émissions de N_2O de 2,5 MgCO_2eq/ha/an sur l'année d'implantation (Ferrarini, Serra, et al. 2017). De plus, des conditions particulières peuvent être présentes au niveau des cultures pérennes ce qui agit sur les conditions d'émissions. Ainsi, sous culture de Miscanthus, il peut y avoir des conditions particulières : la présence d'une flore microbienne active, l'accroissement de la concentration en carbone et en azote dans la couche superficiel de sol, les risques d'anoxies liées à l'attractivité microbienne et aux conditions hydriques ; qui peuvent accroitre les émissions de N_2O d'un facteur 5 si un apport d'engrais est en plus apporté. Dans un scénario de récolte au printemps, 4,2 kgN_2O-N/ha/an peuvent être émis contre 0,89 en récolte précoce, en raison des conditions plus fréquentes d'anoxie (Recous, Ferchaud, Houot 2016).

2. Impact sur le lessivage des nitrates

Les arbres ainsi que les cultures pérennes n'utilisant pas ou peu de fertilisation, ils ont un impact positif sur le service écosystémique « régulation de l'azote des eaux souterraines » sur le long terme (Ferrarini, Serra, et al. 2017). Le Miscanthus, le Switchgrass ainsi que les T(T)CR, lorsqu'ils ne sont pas fertilisés, évitent le lessivage de l'azote (Lesur Claire et al. 2014).

Les cultures énergétiques pérennes impactent les nitrates en les réduisant dans la majorité des cas. Un changement de culture permet une baisse des nitrates (Keerthi, Miller 2017). En effet, les études suggèrent que les cultures de Miscanthus et de Switchgrass réduisent les pertes en nitrate de manière significatives comparé aux cultures de céréales (Sharma, Chaubey 2017). Il faut tout de même faire attention car les cultures précédentes ainsi que les pratiques qui leur sont associées influencent les pertes d'azote. En effet, une forte fertilisation sur le précédent induit de plus grosses pertes (Lesur Claire et al. 2014). La perte de nitrates par ruissellement avec du Switchgrass est de 0,98 kgN/ha/an qui est trois fois moins que sous le maïs (perte de 3,22 kgN/ha/an) (Sharma, Chaubey 2017). Un modèle SWAT « Soil and Water Assessment Tool » appliqué en Caroline du Sud étudiant les pertes d'azote de surface par écoulement sur culture de Switchgrass indique une baisse de 73% des pertes par rapport à la culture de coton (Sarkar et Miller 2014).

Alors que le lessivage sous les cultures de maïs-soja entraine 40 kgN/ha/an, la culture de Switchgrasse permet une réduction de 97 % soit un lessivage de 1,4 kgN/ha et le Miscanthus permet une réduction de 93 % soit un lessivage de 3 kgN/ha (Chen et al. 2017). Le Switchgrass irrigué peut

réduire le lessivage annuel de NO_3-N par 99 % comparé à la culture irriguée de coton avec une absorption de 95 % pour le Switchgrass contre 27 % pour le coton, le tout avec une fertilisation moindre à savoir 124 kgN/ha pour le Switchgrass irrigué contre 138 kgN/ha pour le coton irrigué. Des résultats similaires sont trouvés pour le Miscanthus où la réduction est de 98 % comparé au niveau de référence du coton (Chen et al. 2017).
Un modèle SWAT montre qu'une modification de l'assolement par introduction de miscanthus sur 10 % des terres permet de réduire le nitrate-azote des flux d'eau de 6,4 % à la sortie de la rivière Salt Creek (Illinois) (Chen et al. 2017). La conversion en Miscanthus, avec une fertilisation de 90 kgN/ha, de 10, 25 ou 50 % des surfaces cultivées en maïs-soja dont uniquement le maïs est fertilisé avec 190 kgN/ha, permet une diminution des nitrates de 6,5 ; 16,5 et 29,5 % (Lesur Claire et al. 2014). Sous une culture de Miscanthus non fertilisé, l'azote inorganique lessivé est de 1,5 à 6,6 kgN/ha/an contre 34,2 à 45,9 kgN/ha/an sous des rotations de maïs-soja. Ces baisses de lessivages peuvent être expliquées en partie par le couvert du sol procuré par les feuilles (Lesur 2012). De plus, le Miscanthus peut encore capter l'azote minéral en automne, avant que les périodes de lessivage ne commencent (Lesur Claire et al. 2014). D'après Sharma & Chaubey (2017), le Switchgrass et le Miscanthus ont neuf fois moins de pertes de nitrate en profondeur que la culture de maïs ou les rotations maïs-soja. Il existe cependant des rapports qui indiquent une perte importante de nitrates sous les cultures de Miscanthus, ce qui laisse supposer que des études sont nécessaires pour aller plus loin sur l'explication des différences de pertes de nitrates (Sharma, Chaubey 2017).
Pour les T(T)CR, les pertes de nitrates sont plus faibles que celles des cultures arables mais on peut observer que 87,5% de nitrates qui proviennent des cultures de T(T)CR étudiées sont dues à une fertilisation azotée (Holland et al. 2015).

Les deux formes d'azotes qui sont principalement touchées par l'implantation de cultures pérennes à valeur énergétiques sont le protoxyde d'azote et les nitrates. L'implantation de ces cultures participe grandement à la réduction des émissions et des pertes de l'azote. Cela permet une réduction des pollutions à la fois atmosphérique mais également aquatique. Ces pertes sont significatives lorsqu'elles sont comparées aux cultures annuelles.

B. Impact de l'implantation et question de la fertilisation

L'implantation des cultures pérennes à valeur énergétique est un moment crucial du fait de leur longévité car une mauvaise implantation peut poser problème sur de longues périodes. De plus, la question de la fertilisation est souvent posée.

1. Impacts liés à l'implantation

Pour implanter ces cultures, il est nécessaire de perturber le sol ce qui occasionne certains désagréments. Préalablement à la perturbation, il peut y avoir un fort taux de nitrate dans le sol ainsi qu'une dénitrification importante (Whitaker et al. 2018). Cette perturbation occasionnée par un labour augmente l'accès des bactéries au dioxygène, ce qui augmente leur activité aérobie et donc la minéralisation de l'azote ainsi que la nitrification. Si le labour est effectué à une mauvaise période, cela peut occasionner des pertes en nitrate car les plantes trop jeunes ne vont pas tout capter (Sharma, Chaubey 2017). Un autre impact lié à cette implantation est l'érosion qui peut toucher les sols. En effet, l'érosion est plus importante durant la période d'implantation car la plante est petite et ne retient pas l'eau qui ruisselle mais à relativiser au regard des cultures annuelles. Ces différentes pertes varient suivant plusieurs facteurs à savoir le stock d'azote présent dans le sol ainsi que l'humidité du sol avant implantation, (Whitaker et al. 2018). Ainsi, si le sol a un faible stock d'azote et donc de nitrate, les pertes vont être réduites (Lesur Claire et al. 2014). C'est pour cela que la conversion de prairies naturelles sur un même bassin versant en cultures pérennes augmente la charge de nitrate de 5% (Lesur Claire et al. 2014). L'année de l'implantation, les pertes de nitrates sous Miscanthus ou Switchgrass peuvent être supérieures à celles enregistrées sous des cultures de maïs ce qui indique que l'établissement des cultures peut occasionner de fortes pertes de nitrates

(Sharma, Chaubey 2017). Une expérimentation à Orihuela (Espagne) montre que la première année de culture est celle qui a l'impact le plus fort, ce qui est expliqué dans cette étude par une forte fertilisation et une grande consommation d'eau, le tout couplé à une faible production de biomasse (Escobar et al. 2017). Lors de l'implantation du Miscanthus, 80% de l'azote présent dans la plante provient de la minéralisation de la matière organique du sol (McCalmont et al. 2017).

2. Question de la fertilisation

Le besoin en fertilisation de ces cultures ne fait pas consensus. Le Miscanthus et le Switchgrass peuvent pousser et garder leur forte productivité sur de longues périodes sans que la fertilisation ne soit nécessaire (Sharma, Chaubey 2017). Le Miscanthus n'a pas de réponse significative à des apports d'azote en dehors des premières années (Lewandowski et al. 2000) et il n'a pas de réponse significative à de fortes concentrations d'azote (McCalmont et al. 2017). Le rendement maximum est observé lorsqu'il n'y a pas de fertilisation mais avec la présence dans le sol d'azote minéral à hauteur de 50 kgN/ha (McCalmont et al. 2017). De plus, l'utilisation d'azote radioactif a permis de montrer que la plus grande part de l'azote trouvé dans la plante ne vient pas de la fertilisation mais de la minéralisation des dépôts du sol (Lewandowski et al. 2000).

A l'inverse, plusieurs rapports expriment le fait qu'une fertilisation, bien que faible, est recommandée (Holland et al. 2015; Whitaker et al. 2018; Lesur Claire et al. 2014; Lewandowski et al. 2000). Un apport de 60 kgN/ha/an permettrait de supporter le développement du rhizome lors de la reprise (Lewandowski et al. 2000). Goulding et al., (1998) suggèrent que le Miscanthus n'a besoin de fertilisation que lors de son établissement sur des sols pauvres en azote. Une fertilisation de 50kgN/ha peut être appliquée lors de l'implantation lorsque le sol est peu fertile (McCalmont et al. 2017; Lewandowski et al. 2000). Les études indiquent que l'utilisation de Miscanthus permet l'observation d'une baisse des nitrates présents dans les systèmes aquatiques lorsqu'il y a une fertilisation de 80-100 kgN/ha (Holland et al. 2015).

Certains scientifiques argumentent que les faibles pertes de nitrates sous le Miscanthus et le Switchgrass sont dues simplement aux faibles besoins en fertilisation mais cela ne concorde pas avec les pertes observées sous des cultures de soja sans fertilisation (Sharma, Chaubey 2017). Le système racinaire joue un rôle important dans la limitation des pertes. Avec un système racinaire extensif couplé à un recyclage des nutriments par la perte des feuilles et la relocalisation dans le rhizome, la fertilisation, si appliquée, est minime (Sharma, Chaubey 2017; Lewandowski et al. 2000). Les apports ne doivent pas excéder les quantités exportées lors de la récoltes à savoir pour le Miscanthus : 70 kgN/ha, 10 kgP/ha et 105 kgK/ha (Lesur 2012)

La fertilisation n'est pas recommandée les premières années pour éviter la pouce d'adventices (Sharma, Chaubey 2017). De plus, une forte activité de la nitrogénase la première année au niveau des rhizomes et du sol est observé (McCalmont et al. 2017), ce qui permet une fourniture sans intervention. Mais pour d'autres auteurs, il est recommandé d'appliquer une fertilisation lors de son établissement (McCalmont et al. 2017). Une application de 100 kgN/ha apporterait un bénéfice sur le rendement sur un sol sablo-limoneux peu fertile. Shield et al (2014) expriment le fait que l'état en nutriment du sol dirige l'établissement de la culture et est la clé pour déterminer les besoins en fertilité (McCalmont et al. 2017).

L'implantation des cultures pérennes à valeur énergétique est la période de culture qui doit être surveillée et préparée. C'est à ce moment que les risques de pertes d'azote sont les plus élevés. A ceci s'ajoute les risques d'érosion qui peuvent toucher les terres lors du changement de culture. La question de la fertilisation ne fait pas l'unanimité. Il serait donc envisagé de faire une fertilisation minimale qui permettrait d'apporter l'azote exporté lors de la récolte.

C. Utilisation de zones tampons dans la réduction des pertes d'azote

Les bandes tampons de cultures énergétiques réduisent la contamination en nitrates (Ferrarini, Serra, et al. 2017). L'implantation de bandes tampons aux abords des champs cultivées modifie le ratio des formes d'azotes entre les champs cultivées et à la sortie de la bande tampon (Ferrarini, Fornasier, et al. 2017). L'azote sous forme de nitrate est le plus réduit par la bande tampon dans les eaux souterraines (Ferrarini, Fornasier, et al. 2017).

L'analyse des concentrations moyennes des formes d'azote présentes dans le champ cultivé et au sein des tampons d'espèce différente au cours de plusieurs saisons montre des différences significatives. En ce qui concerne le NO_3-N, sous Miscanthus en période de croissance, une différence est visible suivant la largeur de la bande tampon. Ainsi, on obtient 0,49 mgNO_3-N/L avec une largeur de 10 m contre 0,58 mgNO_3-N/L avec une largeur de 5m ce qui reste significativement inférieur à la concentration retrouvé sous la culture de soja qui est de 1,49 mgNO_3-N/L. Des concentrations plus faibles sont obtenues lors de la saison de lessivage au niveau des tampons. Pour un tampon de 5 m, on obtient 0,44 mgNO_3-N/L sous Miscanthus et 0,41 mgNO_3-N/L sous saule contre 1,90 mgNO_3-N/L lorsque le champ est nu. Concernant le NO_2-N, les bandes tampons montrent qu'il y a une augmentation de la concentration dans l'eau. En effet, sous Miscanthus et saule avec une bande de 10 m, on obtient 0,21 mgNO_2N-N/L et 0,20 mgNO_2-N/L respectivement, pour la période de croissance contre 0,11 mgNO_2-N/L pour la culture de soja. En période de lessivage, on obtient les mêmes concentrations pour le Miscanthus et le saule et une concentration de 0,12 mgNO_2-N/L pour le sol nu mais ces différences ne sont pas significatives. Concernant le NH_4-N, pour une largeur de 10 m, en saison de croissance, il y a une différence de concentration entre le Miscanthus et le saule une concentration de 0,67 mgNH_4-N/L pour le Miscanthus contre 0,76 mgNH_4-N/L pour le saule. Ces concentrations moyennes sont également significativement différentes à la concentration moyenne sous culture de soja qui est de 1,34 mgNH_4-N/L. Lors de la saison de lessivage, la concentration sous Miscanthus et saule sont identique et atteignent 0,30 mgNH_4-N/L contre 0,53 mgNH_4-N/L sous le sol nu. Cette différence reste significative. (Ferrarini, Fornasier, et al. 2017)

Des expériences ont montré que les tampons de cultures énergétiques peuvent présenter une certaine rentabilité par rapport aux coûts de dépollution de l'eau comparée à des pratiques de conservation (Styles D et al 2016 ; Meehan TD et al 2013 ; Golkoska K et al 2012). Les bandes tampons de 50 m participent également à la réduction des émissions de N_2O qui peuvent être réduite de 50 à 90 %, comparé aux émissions des champs adjacents en rotation maïs-soja, (Ferrarini, Serra, et al. 2017).

Que la bande tampon soit constituée de cultures lignocellulosique, de cultures énergétiques herbacées ou d'espèces spontanées, la réduction de l'azote des eaux souterraines est bien observée. Les premières années, après l'implantation, les cultures énergétiques permettent un taux d'abattement de l'azote similaire bandes constituées d'espèces spontanées (Ferrarini, Fornasier, et al. 2017). Cependant, d'autres études où une comparaison est faite entre des tampons lignocellulosiques et herbacés montrent que les tampons herbacés sont moins efficients dans l'élimination du NO_3-N (70% en moyenne contre 90 % pour les tampons de ligneux) (Ferrarini, Serra, et al. 2017).

Les bandes de cultures énergétiques de 10 mètres sont plus efficaces que les bandes de 5 mètres qui elles-mêmes sont capable d'abattre, dans la plupart des cas, 50 % des nitrates apportés (Ferrarini, Fornasier, et al. 2017).

L'utilisation de zones tampons aux abords des champs cultivés permet de réduire l'impact de ces cultures sur les ressources en eau. Les tampons ont un impact sur la diminution des pertes azotées enregistrées. Cela participe au maintien ou à l'augmentation de la qualité de l'eau aux abords de ces tampons.

L'implantation de cultures énergétiques permet une réduction significative des pertes d'azotes, qu'elles soient sous forme de nitrates ou de protoxydes d'azotes. L'implantation de la

nouvelle culture représente une étape importante car le développement futur et sur une longue période en dépend. De plus, c'est durant ces premières années que les risques de pertes d'azote sont les plus importants. La question de la fertilisation n'est pas totalement tranchée mais ce qu'il en ressort est une minimisation de cette utilisation pour éviter le développement d'adventices les premières années. L'implantation de zones tampons formées de plantes à valeur énergétique participe grandement à la protection de la ressource en eau aux abords des champs cultivés.

III. Autres impacts d'importance des cultures énergétiques pérennes

Ces cultures ont un impact sur le cycle de l'azote. Il a pu être montré que la matière organique intervenait et influençait les besoins en azote. Cette matière organique est également constituée de carbone. Il doit donc y avoir une influence sur le cycle du carbone. De plus, il existe d'autres impacts qui concernent le sol ou la biodiversité.

A. Impact des cultures pérennes à valeur énergétique sur le cycle du carbone

1. Variation du stock de carbone du sol

Différentes études montrent qu'il y a un enrichissement du sol en carbone sous les cultures énergétiques qui passe par l'augmentation de la matière organique du sol (Ferrarini, Fornasier, et al. 2017; Gerssen-Gondelach, Wicke, Faaij 2017; Panagopoulos et al. 2017; Escobar et al. 2017; McCalmont et al. 2017; Ferrarini, Serra, et al. 2017; Lesur 2012; Lewandowski et al. 2000). Le Miscanthus participe à la séquestration du carbone à hauteur de 0,7-2,2 Mg C4-C/ha/an (McCalmont et al. 2017). La valeur de 0,93 ± 0,28 tC/ha/an est également donnée (Recous, Ferchaud, Houot 2016). Ces valeurs peuvent être comparées aux valeurs extraites de diverses études scientifiques par Séguy et al ([sans date]) qui indiquent que le labour utilisé avec une monoculture de blé ou de maïs entraine des pertes de carbone de l'ordre de 0,105 à 0,460 tC/ha/an aux Etats-Unis. Il faut l'introduction du semis direct pour obtenir une augmentation du carbone dans les sols et seule l'agriculture dite « intégrée » apporte un gain de 0,93 tC/ha/an (SÉGUY, BOUZINAC [sans date]). Lors de la conversion des terres cultivées en « tampon énergétique », la communauté bactérienne du sol devient plus active du fait de l'augmentation de la litière de feuille et des racines qui apportent du carbone dans le sol, ce qui favorise la séquestration du carbone (Ferrarini, Serra, et al. 2017). Cette augmentation du carbone a un effet sur le cycle de l'azote. En effet, il y a une relation négative non linéaire entre le carbone organique présent dans le sol et le NO_3-N du sol ce qui implique qu'un enrichissement du sol en carbone permet une réduction en NO_3-N (Ferrarini, Fornasier, et al. 2017). Le ratio Carbone Organique Dissout sur NO_3-N des eaux souterraines décroit sous les zones tampon et il est en dessous de 3 dans 95 % des cas, entre la saison de lessivage et la saison de croissance l'année qui suit (Ferrarini, Fornasier, et al. 2017). L'augmentation de la biomasse résulte en une plus faible CNs et en un plus faible écoulement de surface (Panagopoulos et al. 2017). La production de biomasse et la mobilité de l'azote dans le sol contribuent à la rétention de l'azote dans les zones tampon de cultures énergétiques (Ferrarini, Serra, et al. 2017).
Cependant, lors de l'établissement des nouvelles cultures, deux facteurs peuvent affecter de manière négative la balance de carbone à savoir l'effet d'amorçage de la rhizosphère et l'impact des interactions entre anciennes et nouvelles pratiques agricoles dans la parcelle (Ferrarini, Serra, et al. 2017). De plus, lorsque ce changement d'utilisation s'effectue sur des prairies, il y a un risque important de perte de carbone (Gerssen-Gondelach, Wicke, Faaij 2017; McCalmont et al. 2017). Les prairies avec le risque le plus élevé de perte de carbone sont les zones humides et marécageuses (Gerssen-Gondelach, Wicke, Faaij 2017).

2. Emissions de CO_2 et lien énergétique

Lors de l'établissement de ces cultures, on peut observer une augmentation des émissions de CO_2 et ce les trois premières années (Ferrarini, Serra, et al. 2017). Mais plus globalement, à l'échelle de vie de la culture, comme le Miscanthus, il y a une atténuation des émissions de CO_2 qui atteint les 8,6 tCO_2/ha/an. En effet, la culture de Miscanthus fournit le meilleur compromis entre les besoins réduits en nutriments, une forte atténuation des gaz à effets de serre par unité de biomasse produite et une forte productivité à l'hectare (Recous, Ferchaud, Houot 2016). L'un des intérêts de la culture de Miscanthus est son coût énergétique faible et sa forte capacité à produire de l'énergie. En effet, le Miscanthus a un ratio énergie produite/énergie nécessaire 10 fois plus grand que les cultures annuelles utilisées pour l'énergie comme le maïs. Le ratio énergie produite/énergie utilisé est de 4,7 ± 0,2 pour le colza, de 5,5 ± 0,2 pour le maïs et de 47,3 ± 2,2 pour le Miscanthus (McCalmont et al. 2017). Le coût total de la production de carbone énergétique est de 1,152 gCO_2-Ceq/MJ ce qui est 20 à 30 fois inférieur aux énergies fossiles (McCalmont et al. 2017). D'après Lewandowski et al (1995), pour un rendement de 20 tMS/ha, l'énergie nécessaire est estimée à 1251 MJ/tMS et les émissions à 112 $kgCO_2$/tMS, le tout en prenant en compte la production, la récolte, le transport sur 72 km et le broyage de la biomasse ce qui représente 5 à 7 % de l'énergie produite par la culture (Lewandowski et al. 2000). Avec une fertilisation annuelle de 100 kg N/ha, 23 % des émissions de CO_2 (374MJ/t) sont dues à l'apport de fertilisation et 17 % des émissions de CO_2 (324 MJ/t) sont dépensés dans les carburants (Lewandowski et al. 2000).

Le cycle du carbone est lui aussi touché par la culture de ces plantes pérennes. Il y a un enrichissement du carbone du sol et une réduction du CO_2 émis du fait de la forte capacité énergétique du Miscanthus. Cet impact sur le carbone a des répercussions sur l'azote du fait de la corrélation non linéaire négative entre la quantité de carbone dans le sol et les nitrates présents.

B. Impacts sur la biodiversité, rôle du sol et implantation

1. Impact sur la biodiversité

L'implantation de cultures comme du Miscanthus sur des terres arables a un impact positif sur l'abondance des espèces (Gerssen-Gondelach, Wicke, Faaij 2017; McCalmont et al. 2017; Lesur 2012). Ceci s'explique par une moindre perturbation du sol sous les cultures qui permet l'augmentation entre autre de la population de vers de terre (McCalmont et al. 2017) mais également par la faible voire inexistante utilisation de pesticides (Lewandowski et al. 2000; McCalmont et al. 2017). La comparaison du Miscanthus avec le reed canary grass et le Switchgrass montre que le Miscanthus contient le plus fort taux de diversité comparé aux autres plantes énergétiques et ce, surtout au niveau des populations de scarabées, de mouches et d'oiseaux (McCalmont et al. 2017). La biodiversité de microorganisme augmente également et est plus complexe et plus résiliente que sous les cultures annuelles, ce qui affecte les processus géochimique comme la décomposition de la litière et le cycle des nutriments, la séquestration du carbone et le cycle de l'azote (Ferrarini, Serra, et al. 2017). Mais les gains en biodiversité restent inférieurs à la biodiversité que l'on peut rencontrer sur des prairies (McCalmont et al. 2017), le passage de prairie en cultures énergétiques type Miscanthus risque de provoquer une perte de biodiversité (Gerssen-Gondelach, Wicke, Faaij 2017).

2. Rôle du sol

Le sol est impacté par l'implantation de cultures pérennes à valeur énergétique. En effet, l'implantation de ces cultures agit sur la régulation de l'érosion (Holland et al. 2015; McCalmont et al. 2017; Guo et al. 2018; Gu, Wylie 2018), des pertes de sédiments (Holland et al. 2015; Panagopoulos et al. 2017; Guo et al. 2018) et des inondations (Holland et al. 2015). Ainsi, le remplacement d'une

culture annuelle par une culture de Miscanthus ou de Switchgrass permet une réduction de 50 % des pertes de sédiments, attribuées à l'accumulation de biomasse dans le sol (Panagopoulos et al. 2017). Utilisées en zone tampon, les cultures énergétiques agissent à la réduction des écoulements d'eau et au captage des sédiments qui arrivent des cultures conventionnels ou de prairies adjacentes. Les tampons de Switchgrass enregistrent une efficience de captage des sédiments de 66 %, 77 % et 95 % pour des tampons de 3, 6 et 7 m respectivement. La réduction est de 25 à 50 % lorsque le tampon est de 1 mètre avec une culture de Miscanthus ou de Switchgrass (Ferrarini, Serra, et al. 2017).
La lixiviation diminue avec la profondeur du sol et dépend également de la pluviométrie hivernale qui, modérée, permet une diminution de la lixiviation (Recous, Ferchaud, Houot 2016). A l'inverse, des études en Allemagne montrent que la moyenne d'azote lessivé est de 16 kgN/ha pour un sol grossier et de 63 kgN/ha pour un sol à texture plus fine. Le sol avec le plus faible lessivage d'azote correspond à un sol profond argileux-glaiseux (Lesur Claire et al. 2014), bien que sur sol argileux on puisse noter un risque de lessivage plus élevé (Lesur 2012). Il est à noter que les risques de lessivages sont plus importants lorsque : les champs ont des sols peux profonds et/ou sableux (et quand l'établissement de la culture échoue). En effet, ces sols ont moins d'eau et la probabilité d'échec est plus élevée, de plus, une forte proportion de sable dans le sol peut causer un fort drainage (Lesur Claire et al. 2014). Les sols alluviaux et les sols argilo-calcaires lessivent plus les nitrates, selon les modèles ils devraient avoir le plus fort taux de minéralisation (Lesur Claire et al. 2014).

3. Entretien particulier

L'implantation de ces cultures nécessite une attention particulière la première année. En effet, c'est la première année qui est concernée par la majorité des opérations agronomiques à savoir le labour du sol pour l'implantation, la transplantation des rhizomes, la fertilisation potentielle et le contrôle des mauvaises herbes (Barco, Maucieri, Borin 2018). L'utilisation d'herbicide se fait en première année car il y a une forte concurrence des adventices avec les cultures implantées (Escobar et al. 2017; McCalmont et al. 2017; Whitaker et al. 2018; Lesur 2012; Lewandowski et al. 2000). Une fois que la culture est bien implantée, après deux ans, ils n'est plus nécessaire d'utiliser d'herbicide à la fois parce que la culture fait de l'ombre (McCalmont et al. 2017) mais également par la formation d'un mulch, ce qui participe à la limitation du développement des adventices (Lesur 2012). Le miscanthus n'a pas pour le moment de maladie connue qui pourrait ravager la culture mais il reste sensible au *Fusarium,* Nanisme jaune de l'orge et à la rouille (*Leptosphaeria* sp.) (Lewandowski et al. 2000).

La biodiversité est donc supérieure avec des cultures pérennes qu'avec des cultures annuelles. Cela est dû en partie à la non intervention que ce soit au niveau du sol et des interventions chimiques qui favorisent l'implantation d'espèces animales variées. Le sol agit fortement sur les pertes d'azote et suivant sa texture et sa composition, les pertes ne seront pas les mêmes. L'implantation de ces cultures est la période qui nécessite le plus d'attention, la réussite de l'implantation permet d'obtenir une culture de bonne qualité.

Conclusion

Les cultures pérennes à valeur énergétiques représentent un intérêt certain pour la protection de la ressource en eau et plus particulièrement pour la limitation des concentrations en nitrate de l'eau. En effet, ce sont des plantes qui sont pérennes et qui de ce fait vont être présentes pour une durée longue comparée aux cultures annuelles. Elles peuvent développer un large réseau de racines qui participent à la réduction de la concentration en azote du sol. Cela passe par la stimulation de l'activité des microorganismes mais également par la présence de rhizome qui permettent à ces plantes de remobiliser les nutriments ce qui limite par la même occasion les besoins en nutriments.

Une attention doit être apportée aux besoins en eau de ces plantes qui ont une forte croissance et un fort coefficient d'utilisation de l'eau. En effet, le miscanthus et le switchgrass consomment de grandes quantités d'eau ce qui peut affecter les bassins versant en réduisant les débits de leurs rivières s'ils sont implantés en excès. De plus, le miscanthus a la capacité d'aller chercher l'eau dont il a besoin profondément dans le sol ce qui peut en cas de sécheresse participer à la réduction du niveau des nappes et allonger le temps nécessaire pour son remplissage ultérieur.
Ces plantes agissent sur le cycle de l'azote en étant des grandes consommatrices d'azote. Elles ont une grande efficience d'utilisation de l'azote et elles agissent sur la baisse des nitrates dans l'eau. En plus d'être bénéfiques pour l'eau, elles participent à la réduction des gaz à effet de serre comme le protoxyde d'azote. En effet, il y a une diminution des émissions de ce gaz comparé aux cultures annuelles. Du fait d'une fertilisation nulle ou minime, pour combler les exportations de la récolte, ces cultures limitent le lessivage des nitrates car elles les utilisent pour leur développement. Ainsi, il n'y a pas d'apports en excès d'azote sur les cultures. Ces cultures peuvent être utilisées comme zone tampon pour limiter l'impact des cultures annuelles où de forts apports d'azote sont effectués. Ces tampons permettent une forte réduction des lessivages de nitrate. Des pertes d'azote peuvent tout de même avoir lieu, lors de l'implantation où le sol est perturbé ce qui augmente la minéralisation ainsi que la perte de minéraux par érosion. Ces pertes dépendent également du stock d'azote qui était présent avant l'implantation et de l'humidité du sol. Le sol joue donc un rôle sur les pertes d'azote. En effet, sa texture et sa composition agissent sur les flux d'azote, les sols profonds et limoneux subissent moins la minéralisation ce qui réduit le risque de lessivage
Le cycle du carbone est également impacté par ces cultures. En effet, un enrichissement du sol en carbone est observé dans les sites où ces plantes énergétiques sont implantées. Cette accumulation de biomasse agit sur la rétention de l'azote. De plus, ce sont de bonnes candidates pour la fourniture énergétique car elles produisent plus d'énergie que les cultures annuelles qui sont utilisées dans l'alimentation et ont un coût inférieur en carbone vis-à-vis des énergies fossiles. Les émissions de dioxyde de carbone sont également réduites. La période d'implantation de ces cultures, là encore peut contribuer à des pertes de carbone. Il faut tout de même noter que ces cultures, comparé aux cultures annuelles, participent à une augmentation de la biodiversité. Comme il n'y a pas de perturbation du sol, la présence de vers de terre augmente. De plus, la non utilisation de produits phytosanitaires permet l'accueil d'animaux variés. Un des avantages de ces cultures est la faible intervention. En effet, seulement les premières années demandent une vigilance particulière à la fois pour une bonne implantation et pour limiter l'impact des adventices. Ensuite, il faut laisser faire la nature et récolter lorsque la culture est prête.
Ainsi, les cultures pérennes à valeur énergétique contribuent de manière positive à la protection de la ressource en eau en limitant la présence d'azote. De plus, la faible intervention humaine sur ces cultures limite la présence de composées chimiques qui peuvent être issues des cultures annuelles. Un point de vigilance est à apporter lors de l'implantation qui peut occasionner des pertes. Mais au regard de la durée de vie et de la non-intervention, ces pertes sont faibles.

Bibliographie

BARCO, A., MAUCIERI, C. et BORIN, M., 2018. Root system characterization and water requirements of ten perennial herbaceous species for biomass production managed with high nitrogen and water inputs. Agricultural Water Management. janvier 2018. Vol. 196, pp. 37-47. DOI 10.1016/j.agwat.2017.10.017.

Blanco-Canqui H (2010) Energy crops and their implications on soil and environment. Agronomy Journal, 102, 403–419.

CHEN, Yong, ALE, Srinivasulu, RAJAN, Nithya et MUNSTER, Clyde, 2017. Assessing the hydrologic and water quality impacts of biofuel-induced changes in land use and management. GCB Bioenergy. 1 septembre 2017. Vol. 9, n° 9, pp. 1461-1475. DOI 10.1111/gcbb.12434.

CHRISTIAN, DG., RICHE, AB., 1998. Nitrate leaching losses under Miscanthus grass planted on a silty clay loam. Soil Use and Management 1998;14:131{5.

CIBIN, R., TRYBULA, E., CHAUBEY, I., BROUDER, S., VOLENEC, JJ., 2016. Watershed scale impacts of bioenergy crops on hydrology and water quality using improved SWAT model. Global Change Biology Bioenergy, 8, 837–848.

ESCOBAR, Neus, RAMÍREZ-SANZ, Clara, CHUECA, Patricia, MOLTÓ, Enrique et SANJUÁN, Neus, 2017. Multiyear Life Cycle Assessment of switchgrass (Panicum virgatum L.) production in the Mediterranean region of Spain: A comparative case study. Biomass and Bioenergy. décembre 2017. Vol. 107, pp. 74-85. DOI 10.1016/j.biombioe.2017.09.008.

FERRARINI, Andrea, FORNASIER, Flavio, SERRA, Paolo, FERRARI, Federico, TREVISAN, Marco et AMADUCCI, Stefano, 2017. Impacts of willow and miscanthus bioenergy buffers on biogeochemical N removal processes along the soil-groundwater continuum. GCB Bioenergy. janvier 2017. Vol. 9, n° 1, pp. 246-261. DOI 10.1111/gcbb.12340.

FERRARINI, Andrea, SERRA, Paolo, ALMAGRO, María, TREVISAN, Marco et AMADUCCI, Stefano, 2017. Multiple ecosystem services provision and biomass logistics management in bioenergy buffers: A state-of-the-art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. juin 2017. Vol. 73, pp. 277-290. DOI 10.1016/j.rser.2017.01.052.

GERSSEN-GONDELACH, Sarah J., WICKE, Birka et FAAIJ, Andre P. C., 2017. GHG emissions and other environmental impacts of indirect land use change mitigation. GCB Bioenergy. avril 2017. Vol. 9, n° 4, pp. 725-742. DOI 10.1111/gcbb.12394.

GOLKOWSKA, K., RUGANI, B., KOSTER, D., VAN OERS, C., 2016. Environmental and economic assessment of biomass sourcing from extensively cultivated buffer strips along water bodies. Environ Sci Policy 2016;57:31–9.

GOULDING, KWT., BAILEY, NJ., BRADBURY, NJ., et al., 1998. Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes. New Phytologist, 139, 49–58.

GUO, Tian, CIBIN, Raj, CHAUBEY, Indrajeet, GITAU, Margaret, ARNOLD, Jeffrey G., SRINIVASAN, Raghavan, KINIRY, James R. et ENGEL, Bernard A., 2018. Evaluation of bioenergy crop growth and the impacts of bioenergy crops on streamflow, tile drain flow and nutrient losses in an extensively tile-drained watershed using SWAT. Science of The Total Environment. février 2018. Vol. 613-614, pp. 724-735. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.09.148.

HOLLAND, R.A., EIGENBROD, F., MUGGERIDGE, A., BROWN, G., CLARKE, D. et TAYLOR, G., 2015. A synthesis of the ecosystem services impact of second generation bioenergy crop production. Renewable and Sustainable Energy Reviews. juin 2015. Vol. 46, pp. 30-40. DOI 10.1016/j.rser.2015.02.003.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the IPCC Chapter 2 (eds Solomon S, Qin D, Manning M et al.), pp. 1–996. Cambridge University Press, Cambridge.

JOO, Eva, ZERI, Marcelo, HUSSAIN, Mir Zaman, DELUCIA, Evan H. et BERNACCHI, Carl J., 2017. Enhanced evapotranspiration was observed during extreme drought from Miscanthus, opposite of other crops. GCB Bioenergy. août 2017. Vol. 9, n° 8, pp. 1306-1319. DOI 10.1111/gcbb.12448.

KEERTHI, Shamitha et MILLER, Shelie.A., 2017. Regional differences in impacts to water quality from the bioenergy mandate. Biomass and Bioenergy. novembre 2017. Vol. 106, pp. 115-126. DOI 10.1016/j.biombioe.2017.08.002.

LESUR CLAIRE, BAZOT MATHIEU, BIO-BERI FADEL, MARY BRUNO, JEUFFROY MARIE-HÉLÈNE et LOYCE CHANTAL, 2014. Assessing nitrate leaching during the three-first years of Miscanthus × giganteus from on-farm measurements and modeling. GCB Bioenergy. 5 juin 2014. Vol. 6, n° 4, pp. 439-449. DOI 10.1111/gcbb.12066.

LESUR, Claire, JEUFFROY, Marie-Hélène, MAKOWSKI, David, RICHE, Andrew B., SHIELD, Ian, YATES, Nicola, FRITZ, Maendy, FORMOWITZ, Beate,

GRUNERT, Michael, JORGENSEN, Uffe, LAERKE, Poul Erik et LOYCE, Chantal, 2013. Modeling long-term yield trends of Miscanthus×giganteus using experimental data from across Europe. Field Crops Research. 1 août 2013. Vol. 149, pp. 252-260. DOI 10.1016/j.fcr.2013.05.004.

LESUR, Claire, 2012. Cropping Miscanthus x giganteus in commercial fields: from agro-environmental diagnostic to ex ante design and assessment of energy oriented cropping systems. . décembre 2012. pp. 194.

LEWANDOWSKI, I., CLIFTON-BROWN, J.C., SCURLOCK, J.M.O. et HUISMAN, W., 2000. Miscanthus: European experience with a novel energy crop. Biomass and Bioenergy. octobre 2000. Vol. 19, n° 4, pp. 209-227. DOI 10.1016/S0961-9534(00)00032-5.

MCCALMONT, Jon P., HASTINGS, Astley, MCNAMARA, Niall P., RICHTER, Goetz M., ROBSON, Paul, DONNISON, Iain S. et CLIFTON-BROWN, John, 2017. Environmental costs and benefits of growing Miscanthus for bioenergy in the UK. GCB Bioenergy. mars 2017. Vol. 9, n° 3, pp. 489-507. DOI 10.1111/gcbb.12294.

MEEHAN, TD., GRATTON, C., DIEHL, E., HUNT, ND., MOONEY, DF., VENTURA, SJ., et al., 2013. Ecosystem-service tradeoffs associated with switching from annual to perennial energy crops in riparian zones of the US Midwest. PLoS One 2013;8:e80093.

NEUKIRCHEN, D., 1995. Nährstoffrückverlagerung in Rhizom und Wurzel sowie Nährstoffverluste über Herbst und Winter bei Miscanthus x giganteus. Diplomarbeit, Ruhr-Universität, Bochum, Germany.

PANAGOPOULOS, Yiannis, GASSMAN, Philip W., KLING, Catherine L., CIBIN, Raj et CHAUBEY, Indrajeet, 2017. Water Quality Assessment of Large-scale Bioenergy Cropping Scenarios for the Upper Mississippi and Ohio-Tennessee River Basins. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. décembre 2017. Vol. 53, n° 6, pp. 1355-1367. DOI 10.1111/1752-1688.12594.

RECOUS, Sylvie, FERCHAUD, Fabien et HOUOT, Sabine, 2016. La valorisation énergétique des biomasses peut-elle changer l'équilibre des cycles biogéochimiques dans les sols cultivés ? Innovations Agronomiques. 2016. Vol. 54, pp. 41-58.

SARKAR S., MILLER, SA., 2014. Water quality impacts of converting intensively-managed agricultural lands to switchgrass. Biomass and Bioenergy, 68, 32–43.

SÉGUY, L et BOUZINAC, S, [sans date]. DOSSIER SÉQUESTRATION CARBONE. . pp. 74.

SHARMA, Suresh et CHAUBEY, Indrajeet, 2017. Surface and Subsurface Transport of Nitrate Loss from the Selected Bioenergy Crop Fields: Systematic Review, Analysis and Future Directions. Agriculture. 15 mars 2017. Vol. 7, n° 12, pp. 27. DOI 10.3390/agriculture7030027.

SHIELD, IF., BARRACLOUGH, TJP., RICHE, AB., YATES, NE., 2014. The yield and quality response of the energy grass Miscanthus 9 giganteus to fertiliser applications of nitrogen, potassium and sulphur. Biomass and Bioenergy, 68, 185–194.

Stephens W, Hess TM, Knox JW (2001).Review of the effects of energy crops on hydrology. NF0416, Cranfield University MAFF.

STYLES, D., BÖRJESSON, P., D'HERTEFELDT, T., BIRKHOFER, K., DAUBER, J., ADAMS, P., et al., 2016. Climate regulation, energy provisioning and water purification: quantifying ecosystem service delivery of bioenergy willow grown on riparian buffer zones using life cycle assessment. Ambio 2016;45:872–84.

VIARD, Amélie, HÉNAULT, Catherine, ROCHETTE, Philippe, KUIKMAN, Peter, FLÉNET, Francis et CELLIER, Pierre, 2013. Le protoxyde d'azote (N_2O), puissant gaz à effet de serre émis par les sols agricoles : méthodes d'inventaire et leviers de réduction. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*. mars 2013. Vol. 20, n° 2, pp. 108-118. DOI 10.1051/ocl.2013.0501.

WHITAKER, Jeanette, FIELD, John L., BERNACCHI, Carl J., CERRI, Carlos E. P., CEULEMANS, Reinhart, DAVIES, Christian A., DELUCIA, Evan H., DONNISON, Iain S., MCCALMONT, Jon P., PAUSTIAN, Keith, ROWE, Rebecca L., SMITH, Pete, THORNLEY, Patricia et MCNAMARA, Niall P., 2018. Consensus, uncertainties and challenges for perennial bioenergy crops and land use. GCB Bioenergy. mars 2018. Vol. 10, n° 3, pp. 150-164. DOI 10.1111/gcbb.12488.

Résumé

Cette synthèse bibliographique a pour but de montrer l'impact de l'implantation de cultures à valeur énergétique type miscanthus, switchgrass et T(T)CR. Elle montre que la physiologie de ces plantes participe grandement à la réduction du lessivage de l'azote sous ces cultures. En effet, des quantités de 3 kgN/ha peuvent être retrouvées sous des cultures de miscanthus ce qui est faible et participe au maintien de la qualité de l'eau. Les pertes de nitrate ne sont pas les seules à être limitées. En effet, les pertes de protoxyde d'azote sont également réduites grâce à l'utilisation de ces cultures. Ces baisses peuvent atteindre 61 % comparé aux émissions enregistrées dans des champs de cultures annuelles. Ces cultures sont en plus de faibles consommatrices d'intrants ce qui participe à la sauvegarde de la qualité de l'eau. Un des points d'attention est la forte utilisation de l'eau qui peut avoir des répercussions sur la recharge des nappes. En ce qui concerne le cycle du carbone, ces plantes participent à un enrichissement en matière organique du sol. Les émissions de dioxyde de carbone sont également réduites et le coût total de production de carbone énergétique est 20 à 30 fois inférieur aux énergies fossiles. Ces cultures participent également à l'augmentation de la biodiversité comparé aux cultures annuelles et agissent sur la structure du sol qui lui-même a un impact sur les pertes d'azotes.

1.1 Abstract

This literature review will show the impact of the development of energetic crop like the miscanthus, the swithgrass and the SRC. It shows that plants physiology has an high part of nitrogen leaching reduce below the fields. A low quantity of nitrogen can be found. Indeed, 3 kgN/ha has been found under a miscanthus field. That is a low quantity and this is important to maintain a good water quality. The nitrate lost are not only limited. Indeed, the nitrous oxyde are reduced with the use of these cultures. The decreases can reach 61 % relatively to emissions obtain in annual crop fields. The cultures have a low input consumption, which participes to the quality water conservation. A focal point is the high use of water which can have some impact about the underground water recharge. Concerning the carbon cycle, these plants permit an increase of organic matter in soil. The carbon dioxide emissions are reduced too and the total cost of energetic carbon production is 20 to 30 times lower than fossil fuels. These cultures have an effect on the biodiversity comparatively to annual crop and modify soil texture which has an impact too in nitrogen lost.

1.2 Référencement :

BOULEC, Renaud, 2018. Impact des plantes à valeur énergétiques sur leur milieu. 19 pages.

Mots clés : Cultures énergétiques, miscanthus, switchgrass, nitrate, qualité de l'eau.
Key words: Energetic crop, miscanthus, switchgrass, nitrate, water quality.

IMPACT DU MISCANTHUS ET DU SWITCHGRASS SUR L'HYDROLOGIE DU BASSIN

INTRODUCTION 86

I. L'EVAPOTRANSPIRATION ET L'EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU (WUE) AGISSENT SUR LA REDUCTION DES FLUX D'EAU A L'ECHELLE DU BASSIN. 87

II. L'IMPACT PEUT ETRE MODULE SUIVANT LA PROPORTION DES SURFACES ALLOUEES AUX CULTURES ENERGETIQUES 89

III. IL EST NECESSAIRE D'OPTIMISER LES MODELES POUR OBTENIR DES RESULTATS PLUS FIABLES. 90

CONCLUSION 91

REFERENCES 92

Introduction

De manière historique, les changements à grande échelle de l'utilisation des terres que ce soit les prairies permanentes ou les forêts en culture annuelle ont abouti à une réduction de l'évapotranspiration (ET) et une augmentation du ruissellement et du débit des cours d'eau à l'échelle du bassin versant où se ce changement à lieu (Whitaker et al. 2018). La transition d'un système de cultures annuelles en cultures pérennes sur de grandes surfaces, à des fins de production d'énergie, peut de nouveau occasionner des perturbations vis-à-vis du cycle hydrologique (Guo et al. 2018; Whitaker et al. 2018). Les bénéfices liées à la réduction des émissions de carbone par l'utilisation des bioénergies provenant de cultures pérennes ont besoin d'être évalués par rapport à l'impact quelles peuvent causer sur le cycle hydrologique et sur la qualité de l'eau, en lien avec le cycle de l'azote. Le miscanthus et le switchgrass fixent plus de carbone atmosphérique tout en utilisant la même quantité, voire légèrement plus d'eau que les cultures habituellement cultivées. En dépit de l'augmentation de l'ET, associé à une transition d'une culture annuelle à une culture pérenne, l'augmentation de l'utilisation de l'eau est presque systématiquement accompagnée d'une augmentation de la consommation de carbone, conduisant à une augmentation de l'efficience d'utilisation de l'eau (WUE) (Whitaker et al. 2018). Les études menées dans le sud du Midwest suggèrent que le développement du miscanthus et du switchgrass à la place de cultures de maïs ou de soja pourrait augmenter la WUE, réduire l'azote lessivé et réduire la charge en nitrate dans les rivières mais pourrait augmenter la consommation d'eau (Song et al. 2016).

Les précipitations qui traversent les USA ont augmentées en moyenne de 5 à 10 % durant les 50 dernières années. Cela affectera le débit des cours d'eau au fils des saisons avec des changements très élevés du débit, du temps de recharge des nappes, du transport des sédiments et des nutriments. Ces modifications viendront des variations des précipitations et de leur intensité, des modifications des fréquences d'apparition des inondations et des sécheresses, de la fonte plus précoce de la neige et de la glace, ce qui participera à l'augmentation de l'évaporation et modifiera l'humidité du sol (Deb et al. 2015). De plus, une augmentation du taux des précipitations peut augmenter les écoulements de surfaces et/ou la recharge de la nappe mais participe également à un meilleure développement des plantes énergétiques. Cette forte croissance est due à une augmentation de l'ET, ce qui entraine une baisse des écoulements de surface et de la recharge des nappes par la plus forte consommation d'eau. Cependant, la croissance des racines des plantes bioénergétiques peut changer les propriétés structurelles du sol et augmenter l'infiltration des précipitations vers les couches profondes du sol et augmenter la recharge de la nappe. Ces changements temporels de l'ET, des écoulements de surface, et de la recharge/décharge de la nappe modifient les conditions de stress hydrique et par conséquences les flux d'eau dans le temps l'eau.

Les changements dans les précipitations impactent également le taux de chargement de l'eau du sol, de l'ET et de la recharge/décharge des nappes dans le temps (Song et al. 2016).

I. L'évapotranspiration et l'efficience d'utilisation de l'eau (WUE) agissent sur la réduction des flux d'eau à l'échelle du bassin.

Les cultures pérennes à valeur énergétique impactent la disponibilité en eau à l'échelle du territoire mais augmentent la qualité de l'eau par la réduction des nitrates (Whitaker et al. 2018). L'utilisation de modèle SWAT sur le bassin du Mississippi et de l'Ohio-Tennessee montre que le miscanthus et le switchgrass causent une réduction du débit de la rivière qui peut atteindre les 10 %. La plus grande réduction de débit (10 %) est obtenue lorsque le miscanthus est établie sur toute la surface cultivée. Si c'est du Switchgrass, on obtient 6 % de réduction du débit annuel de la rivière par rapport à la moyenne. Pour les deux cultures pérennes, la réduction du débit est proportionnelle à l'extension spatiale de la culture suivant le scénario, ainsi la conversion de grandes surfaces en miscanthus ou en switchgrass devrait améliorer la qualité de l'eau au niveau des pollutions liées aux nitrates mais réduire la disponibilité de l'eau en surface jusqu'à réduire localement le débit des rivières (Guo et al. 2018; Panagopoulos et al. 2017; Song et al. 2016). D'après des simulations faites pour différentes part de surface converties en switchgrass ou en miscanthus, le débit du Mississippi varie. Lorsque le switchgrass occupe toutes les terres cultivables, soit 331 000 km², le débit passe de 10,734 dm^3/s à 10,110 dm^3/s soit une baisse de 624 dm^3/s. Lorsqu'il occupe uniquement les terres de faibles qualités, avec des caractéristiques défavorables, soit 47 200 km², le débit est réduit de 98 dm^3/s. Enfin, s'il n'occupe que les terres de bonne qualité, ce qui représente 283 000 km², le débit est réduit de 528 dm^3/s. Lorsque le miscanthus est utilisé, la réduction du débit est plus forte. En effet, lorsqu'il occupe toutes les terres cultivé, le débit est réduit de 1,030 m^3/s, lorsqu'il est sur les terres à faible valeur, le débit est réduit de 156 dm^3/s, enfin, lorsqu'il occupe que les terres de bonnes qualité, le débit est réduit de 876 dm^3/s. Le tableau 3 permet de voir les différentes données (Panagopoulos et al. 2017).

Ainsi, ces simulations indiquent qu'un changement d'utilisation des terres à grande échelle pour mettre du switchgrass ou du miscanthus modifie le débit du Mississippi en le réduisant. Cette réduction n'est pas du même ordre suivant la proportion de terre qui est modifiée et suivant la culture qui est installée. On peut voir que le miscanthus est plus impactant que le switchgrass.

TABLE 3. Mean Annual (1981-2000) SWAT Estimates of Water, Sediments, N, and P Constituents Entering the Mississippi River from the Corn Belt Region under the Implementation of Baseline and Ten Biofuel Scenarios (Table 2).

Scenario		m^3/s	1,000 t/yr				
		Flow	Sediments	NO_3-N	orgN	TN	TP
Baseline		10,734	75,260	682	227	910	79
1	Stover 20% all cropland	10,728	75,470	681	228	909	80
2	Stover 50% all cropland	10,705	77,310	673	231	904	82
3	Stover 20% nonmarginal	10,729	75,410	681	228	909	80
4	Stover 50% nonmarginal	10,710	76,790	673	230	903	82
5	Switchgrass all cropland	10,110	32,422	393	56	449	33
6	*Miscanthus* all cropland	9,704	32,237	314	56	370	33
7	Switchgrass marginal	10,636	64,200	667	187	855	68
8	*Miscanthus* marginal	10,578	64,170	663	187	850	68
9	Switchgrass nonmarginal	10,206	43,800	407	96	503	44
10	*Miscanthus* nonmarginal	9,858	43,640	333	96	429	44

(Panagopoulos et al. 2017)

Le miscanthus, grâce à ses racines, a la capacité de puiser profondément dans le sol l'eau lors d'une sécheresse, ralentissant potentiellement la vitesse de recharge (Whitaker et al. 2018; Vanloocke, Bernacchi, Twine 2010). Avec un système racinaire bien développé et une meilleur couverture du sol, ce qui peut être obtenu également avec du switchgrass, le sol voit sa quantité d'eau augmenter de janvier à avril et de août à octobre comparé au coton irrigué. Par contre, plusieurs études du

Midwest reportent qu'il y a une réduction de la quantité d'eau dans le sol sous des cultures de miscanthus comparé à des cultures de maïs (Chen et al. 2017).

La réduction de l'écoulement fluvial et du ruissellement sous les scénarios de surfaces implantées en cultures bioénergétiques, se produisent du fait de la plus grande infiltration, percolation et évapotranspiration et de la plus faible humidité du sol sous ces cultures (Guo et al. 2018). L'augmentation de l'ET provient de l'indice foliaire élevé, ce qui participe à la réduction de la réserve du sol (Chen et al. 2017). Le miscanthus et le switchgrass ont une ET plus élevé en moyenne que la rotation de maïs/soja soit ~650 mm/an pour le switchgrass et ~700 mm/an pour le miscanthus contre ~600 mm/an pour le maïs/soja (Panagopoulos et al. 2017). Par contre, l'ET mensuelle sous switchgrass irrigué est significativement inférieure à l'ET moyen du coton pour les mois de janvier à avril, d'août à octobre et en décembre, alors qu'il est supérieur pour les autres mois. Cela est essentiellement dû à la stimulation de la repousse qui est précoce chez le switchgrass dès les premiers beaux jours d'avril et de sa récolte tardive à la mi-novembre comparé au coton. Ce dernier est planté à la mi-mai et récolté fin octobre. Cependant, la teneur en eau du sol est réduite de manière significative d'avril à juillet sous le scénario de miscanthus sans irrigation, comparé au scénario de coton sans irrigation (Chen et al. 2017). Le miscanthus a une ET plus importante lors des périodes de croissances que le maïs (Vanloocke, Bernacchi, Twine 2010). Dans la situation habituelle, l'ET des cultures en rotation et des terres pâturées est supérieure aux précipitations dans la période d'avril à septembre. Concernant le miscanthus, son ET est supérieur aux ET des pâtures et des cultures de mai à septembre. Par conséquence, il y a une augmentation de la carence durant ces quelques mois. Comme les précipitations sont supérieures à l'ET durant les autres mois, les manques d'eaux sont éventuellement renfloués. Cependant, les manques d'eau temporaires durant l'été peuvent causer des dommages sur la production agricole ou sur les zones naturelles. Les changements d'utilisation des terres pour des cultures énergétiques pourraient causer une plus grande consommation d'eau en été (van der Hilst et al. 2012). Cela peut être attribué à la fois à une plus forte évaporation due à un indice de surface foliaire plus grand durant la saison de croissance et à l'augmentation de l'évaporation de l'eau du sol lors de la saison de non croissance (Wu, Liu 2012). De plus, le sol, lorsqu'il n'est pas couvert par la végétation, voit sa transpiration augmenter (Guo et al. 2018; Wu, Liu 2012). Le remplacement de prairies naturelles par des cultures énergétiques peut réduire la disponibilité en eau des cours d'eau (Wu, Liu 2012)

L'indice foliaire ne serait pas le seul facteur influençant l'ET. Ainsi, en plus des variabilités spatiales de la consommation d'eau dans le Midwest, les études suggèrent que l'ET dépend également des précipitations. Par exemple, des études montrent une plus forte ET pour le switchgrass que pour le maïs lors d'une année sèches dans l'Illinois mais presque la même magnitude d'ET pour les deux cultures lors d'une année avec des précipitations dans la moyenne (Song et al. 2016).

Les écoulements de surface sont également modifiés lorsque les cultures pérennes sont implantées. Il y a une réduction des écoulements de surfaces produit directement par le modèle SWAT du fait de certains paramètres (Panagopoulos et al. 2017). Les études de De La Torre Ugarte et al., Secchi et al. et Wu et al. sur le switchgrass et les céréales concluent que le switchgrass réduit les pertes de potassium et de phosphore et que les pertes d'azote restent inchangés (Deb et al. 2015). D'après les recherches effectuées par Ferchaud & Mary (2016), sous une culture de miscanthus fertilisé ou non, il y a moins de drainage que sous du switchgrass fertilisé ou non mais la biomasse produite par le miscanthus est supérieure. Les simulations montrent également que le miscanthus utilise plus d'eau que les autres écosystèmes de l'étude qu'il remplace (Vanloocke, Bernacchi, Twine 2010). En effet, le miscanthus a tendance à consommer plus d'eau en moyenne que le maïs ce qui réduit la restitution d'eau dans le bassin hydrique (Wu, Liu 2012). Cela renvoie à l'efficience d'utilisation de l'eau où plusieurs études indiquent que les plantes en C4 comme le miscanthus et la maïs ont une WUE supérieure aux plantes en C3. Cependant, dans l'étude de van der Hilst et al. de 2012 menée aux Pays-Bas, il a été démontré que la WUE du miscanthus (2,23g/kg d'eau) était inférieur à celui de

la betterave sucrière (3,87 g/kg d'eau). Cela peut être expliqué par le fait que les avantages compétitifs de la photosynthèse des plantes en C4 baissent significativement plus la plante s'éloigne de l'équateur. De plus, comme les conditions climatiques et la gestion de l'agriculture sont optimales pour la betterave sucrière, cela explique la haute WUE. La WUE pour le miscanthus est conforme avec les 2,1 g/kg exprimées par Clifton Brown (van der Hilst et al. 2012). Or des études sur le Midwest nord suggèrent que le miscanthus et le switchgrass ont une plus forte WUE que les cultures cultivées en rang ce qui impacterait de manière négligeable la ressource en eau (Song et al. 2016).

II. L'impact peut être modulé suivant la proportion des surfaces allouées aux cultures énergétiques.

La figure 3 montre les moyennes annuelles de restitution d'eau du bassin hydrographique de la rivière Iowa (qui fait partie du bassin hydrographique du Mississippi), basé sur une simulation d'une période de 18 ans (1991-2008) selon 8 scénarios. Une plus faible restitution d'eau dans le bassin est estimée lorsqu'un taux faible de cannes de maïs est laissé sur le sol. Mais les modifications sont très minimes avec une diminution de la restitution de l'eau de 1,2 %, 2,6 % et 3,2 % pour des proportions de maïs retirées de 40%, 80% et 100 % (scénarios B, C et D). La figure 4 montre la comparaison de l'ET entre le scénario A (avec toutes les cannes de maïs laissé au sol) et le scénario D. La figure suggère que l'ET effectif lors de la saison de non croissance (septembre à mars) du scénario D est clairement plus grand que celui du scénario A, alors qu'aucun changement substantiel ne peut être trouvé durant la saison de croissance. La figure 3 montre également que la restitution moyenne d'eau augmente faiblement (environ 1,7 %) quand 10 % du champ de maïs est converti en switchgrass (scénario E) du fait qu'il y a une plus faible production de biomasse comparé au maïs. Par contre, aucun changement n'est visible lorsque le champ est remplacé par du miscanthus (scénario F) (Wu, Liu 2012).

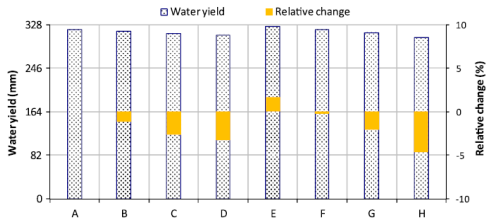


Fig. 3 – Annual average water yield at the watershed scale under the eight scenarios (i.e., four corn stover removal rates and four land cover changes) during an 18-year simulation period (1991–2008). Relative change refers to the change relative to Scenario A.

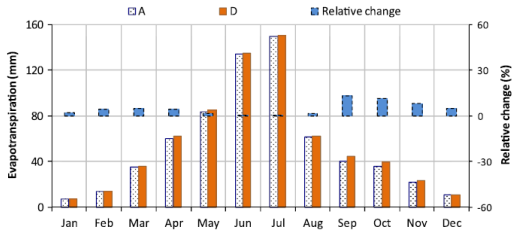


Fig. 4 – Comparison of monthly average evapotranspiration from cornfield between Scenario A (with all corn stover left on the ground) and Scenario D (with no corn stover left on the ground) during an 18-year simulation period (1991–2008). Relative change refers to the change relative to Scenario A.

Table 1 – Definition of scenarios with different corn stover removal rates and land cover changes.

Scenario	Description	% of the basin area[a]
A	Reference scenario (0% of corn stover removal rate)	–
B	40% of corn stover removal rate on all cornfields	40
C	80% of corn stover removal rate on all cornfields	40
D	100% of corn stover removal rate on all cornfields	40
E	10% of cornfields changed to switchgrass	4
F	10% of cornfields changed to miscanthus	4
G	100% of native grass changed to switchgrass	5.7
H	100% of native grass changed to miscanthus	5.7

a The last column of the table refers to the percentage of the area involved in each scenario implementation accounted for in the entire basin area.

(Wu, Liu 2012)

On peut donc observer que le miscanthus restitue autant d'eau que le maïs et que le switchgrass en restitue plus. Le miscanthus produit une grande quantité de biomasse qui est supérieur à la production du switchgrass. Cette forte production s'accompagne d'une plus forte consommation d'eau et de nutriments par rapport au switchgrass. Cela pourrait indiquer que le switchgrass serait un bon candidat pour les zones sèches (Wu, Liu 2012).

La conversion de 25% des surfaces de maïs/soja en switchgrass (scénario A3) n'impacte pas de manière significative la restitution en eau et la consommation en eau du fait de la réduction de la restitution en eau du bassin de 1,5 %, de l'augmentation de l'ET de 0,6% et de la réduction de la restitution en eau souterraine de 3 %. Mais remplacer 50, 75 et 100 % des surfaces par du switchgrass (scénario A4, A5 et A6) résulte à une augmentation de 10 % de la restitution en eau et à une baisse de 5 % de la consommation par l'ET. Il y a une petite réduction de la restitution en eau en surface de 0,8 % mais une augmentation de la restitution d'eau souterraine de près de 20 %. Par ailleurs, la conversion de 25 à 100 % des cultures de maïs/soja en switchgrass résulte à une amélioration significative de la qualité de l'eau dans le bassin avec une baisse de 95 % de l'érosion des sédiments et une baisse de 70 % de la charge en azote totale.Un changement de 100 % des terres cultivées en switchgrass n'est pas souhaitable et remplacer jusqu'à 25 % des terres cultivées n'engendre pas de modifications de manière significative(Deb et al. 2015).

Table 3. Percent changes in Water Yield, ET, Sediment Yield and Total Nitrogen Load under different scenarios.

Scenarios	% Change from Baseline						
	Precipitation	ET	Water Yield	Surface Water Yield	Groundwater Yield	Sediment Load	Total Nitrogen Load
Baseline	0	0	0	0	0	0	0
A1	0	0.2	−0.5	0	−1	1.6	−1.5
A2	0	0.2	−0.5	0	−1	1.6	−1.5
A3	0	0.7	−1.4	0	−2.9	7.6	−10.1
A4	0	−5.2	9.4	−0.8	20.6	−96.1	−69
A5	0	−5.2	9.4	−0.8	20.6	−96.1	−69
A6	0	−4.8	10.2	−0.1	21.6	−95.6	−70.4
B1	0	2.8	−6.4	0	−13.5	−3.1	−9.1
B2	0	3.7	−8.2	0	−17.3	5.9	−13.5
B3	0	4.4	−9.8	0	−20.6	26.5	−5.6
B4	0	−0.2	0.4	0	0.9	−2.6	−2.1
B5	0	2.6	−6	0	−12.5	−5.5	−12.5
B6	0	3.5	−6	0	−16.6	3.2	−12.5
B7	0	3.5	−7.9	0	−16.6	3.2	−19.6
C1	−10	−2.1	−31.9	−41.2	−21.5	−42.3	−37.5
C2	−10	1.2	−41.6	−57.1	−24.6	−50.3	−48.4

Table 1. Scenarios for biofuel expansion.

Scenarios	Description	Crop Rotation	Stover Harvest Rate (%)	Management Practices	Cropland Replaced with Switchgrass (%)
Baseline		Corn-Soybean	0	Conventional Till	0
(A) Changes in Landuse or Cropping Conditions					
A1	(i) Yield Comparison	Regular Continuous Corn	0		0
A2		High yielding Continuous Corn	0		0
A3	(ii) Landuse Change for Biofuel Expansion	Corn-Soybean	0		25
A4		Corn-Soybean	0		50
A5		Corn-Soybean	0		75
A6		Corn-Soybean	0		100
(B) Changes in Management Practices					
B1	(i) Residue Removal Rates	Continuous Corn	25		0
B2		Continuous Corn	50		0
B3		Continuous Corn	75		0
B4	(ii)Sustainable corn-soybean management	Continuous Corn	0	No-Till	0
B5		Continuous Corn	25	No-Till	0
B6		Continuous Corn	50	No-Till	0
B7		Continuous Corn	75	No-Till	0
(C) Climate Variability					
C1	Precipitation increased by 10%	Corn-Soybean	0		0
C2	Temperature increased by 2 °C and precipitation decreased by 10%	Corn-Soybean	0		0

(Deb et al. 2015)

Il peut être intéressant pour le cas de l'impluvium de Vittel-Contrex d'essayer de chiffrer à partir de quelle proportion convertie, des modifications hydrographiques peuvent être visibles.

Le changement d'utilisation des terres d'une culture fortement consommatrice d'eau et d'azote comme le coton, à des cultures pérennes avec une efficience d'utilisation de l'eau et de l'azote supérieure comme le switchgrass et le miscanthus pourrait bénéficier à la région où se fait la modification en gardant des eaux souterraines disponibles et en augmentant sa qualité (Chen et al. 2017).

D'après une approche GIS-based, Rao & Yang (2010) on prédit que l'augmentation des étendues de prairies pourrait augmenter de manière significative la recharge des eaux souterraines et ainsi diminuer la vitesse de la baisse du niveau des nappes, surtout dans les environnements sensibles comme la région des grandes plaines du Texas (Chen et al. 2017).

III. Il est nécessaire d'optimiser les modèles pour obtenir des résultats plus fiables.

Différents modèles de scénarios, où des terres actuellement présentes dans le bassin du Mississippi sont modifiées pour recevoir en proportions variés du switchgrass et du miscanthus, montrent que l'impact sur les débits des rivières est petit par rapport à l'augmentation de la qualité de l'eau (Whitaker et al. 2018). Des résultats de simulation de modèle de climat régional pour des cultures énergétique montrent que la plupart de l'augmentation de l'ET provenant des deux cultures (miscanthus et switchgrass) sont récupérés par le bassin du Mississippi sous forme de précipitation sans changement significatif de l'application de l'irrigation (Harding et al. 2016). Le débit est

légèrement réduit sous les scénarios de cultures bioénergétiques par rapport à la moyenne. La variation va de 0,05 % avec le scénario hybride de peuplier sur les surfaces les plus érodables à 0,76% pour le scénario miscanthus sur les surfaces les plus érodables et les terres pauvres (Guo et al. 2018). Cependant, les mesures varient suivant la localisation et la part de couverture. Bien qu'il soit possible de quantifier les changements hydrologiques pour des fractions de couvertures différentes, les conséquences sur le long terme des ressources en eau et la productivité dans le Midwest restent incertaines (Vanloocke, Bernacchi, Twine, 2010). Tandis que les résultats concernant la quantité d'eau varient radicalement entre les différentes études aux USA du fait d'une temporalité et d'une spatialisation différentes des modèles de rendement en biomasse, la productivité en éthanol est influencée par la quantité en eau du sol (Song et al. 2016). Certains résultats indiquent l'importance de la mise en œuvre d'un model structurant, valide et explicite pour simuler les variations de l'alimentation de l'hydrologie dans d'autres localisations appropriées à la production de matière première bioénergétique (Whitaker et al. 2018).Le déficit cumulé d'eau est évalué à partir des précipitations spatio-temporelles et du niveau de l'ET. Il néglige néanmoins le niveau des eaux souterraines, l'écoulement des eaux du bassin et le système de régulation des nappes. Par conséquence, la variation spatiale de l'eau fournit trop peu d'information pour prévoir où auront lieu les déficits ou les excès d'eau. Afin de prévoir les effets effectif sur les nappes, il est recommandé d'appliquer des modèles hydrologiques plus élaborés (van der Hilst et al. 2012)

Conclusion

L'implantation de cultures type miscanthus ou switchgrass impactent les cycles hydrologiques régionaux. Ils peuvent avoir des magnitudes, des durées et des perturbations spatiales dont les effets ne sont pas encore connus (Vanloocke, Bernacchi, Twine 2010). Ainsi, il faut développer ces culture de manière réfléchie est y aller au fur et à mesure. Les études qui montrent une modification complète des surfaces en passant par le « tout culture énergétique » indiquent que les impacts peuvent être lourds sur l'hydrologie du bassin versant. La combinaison des perturbations spatiales de l'impact environnemental et des performances économiques de la betterave sucrière et du miscanthus prévu dans l' étude de Van der Hilst et al. montre que les zones avec la meilleure performance environnementale sont aussi les zones avec le moindre coût de production. En considérant la grande quantité d'impacts négatifs sur les zones utilisées pour la pâture, il peut être recommandé d'exclure ces zones au développement de cultures énergétiques (van der Hilst et al. 2012). De ce fait, il convient de laisser des grandes zones de prairies qui pourraient permettre de contre balancer les effets négatifs possibles des cultures à biomasse.

En ce qui concerne les prairies, il est à noter que la production de matière par eau transpirée est presque quatre fois supérieure pour des prairies « productives » (prairies temporaires fertilisées à 300 kgN/ha ressemées) que pour des prairies « pauvres » (prairies extensives, faiblement productives et jamais ressemées). En moyenne, cette production est estimée à 42,6, 25 et 11,8 kg/ha/mm pour des prairies temporaires, permanentes et pauvres respectivement, en Grande-Bretagne. L'ET est plus faible sous les prairies pauvres que sous les prairies productives ce qui permet une meilleure recharge de la nappe (Qi, Murray, Richter 2017). De plus, comparé à une forêt de pin, la prairie a un taux de recharge moyen estimé à 9,7 cm/an contre 0,07 cm/an pour une forêt dense de pins ce qui représente dans le cas de l'étude 17% et 0,13 % des précipitations brutes. La valeur donnée pour la prairie correspond aux fourchettes données par les autres études citées dans la publication alors qu'il y a un manque de donnée pour les forêt de pins(Adane et al. 2018). De plus, la conversion des surfaces de prairies naturelles en cultures énergétiques entrainerait une baisse de la quantité d'eau du fait de la combinaison de l'augmentation de l'ET lors de la saison de croissance et de l'augmentation de l'évaporation de l'eau du sol lors de la saison de non-croissance (Wu, Liu 2012).

Références

ADANE, Zablon A., NASTA, Paolo, ZLOTNIK, Vitaly et WEDIN, David, 2018. Impact of grassland conversion to forest on groundwater recharge in the Nebraska Sand Hills. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. février 2018. Vol. 15, pp. 171-183. DOI 10.1016/j.ejrh.2018.01.001.

CHEN, Yong, ALE, Srinivasulu, RAJAN, Nithya et MUNSTER, Clyde, 2017. Assessing the hydrologic and water quality impacts of biofuel-induced changes in land use and management. *GCB Bioenergy*. 1 septembre 2017. Vol. 9, n° 9, pp. 1461-1475. DOI 10.1111/gcbb.12434.

DEB, Debjani, TUPPAD, Pushpa, DAGGUPATI, Prasad, SRINIVASAN, Raghavan et VARMA, Deepa, 2015. Spatio-Temporal Impacts of Biofuel Production and Climate Variability on Water Quantity and Quality in Upper Mississippi River Basin. *Water*. 26 juin 2015. Vol. 7, n° 7, pp. 3283-3305. DOI 10.3390/w7073283.

FERCHAUD, Fabien et MARY, Bruno, 2016. Drainage and Nitrate Leaching Assessed During 7 Years Under Perennial and Annual Bioenergy Crops. BioEnergy Research. juin 2016. Vol. 9, n° 2, pp. 656-670. DOI 10.1007/s12155-015-9710-2.

GUO, Tian, CIBIN, Raj, CHAUBEY, Indrajeet, GITAU, Margaret, ARNOLD, Jeffrey G., SRINIVASAN, Raghavan, KINIRY, James R. et ENGEL, Bernard A., 2018. Evaluation of bioenergy crop growth and the impacts of bioenergy crops on streamflow, tile drain flow and nutrient losses in an extensively tile-drained watershed using SWAT. *Science of The Total Environment*. février 2018. Vol. 613-614, pp. 724-735. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.09.148.

HARDING, K. J., TWINE, T. E., VANLOOCKE, A., BAGLEY, J. E. et HILL, J., 2016. Impacts of second-generation biofuel feedstock production in the central U.S. on the hydrologic cycle and global warming mitigation potential: Biofuel Production and Hydrologic Cycle. *Geophysical Research Letters*. 28 octobre 2016. Vol. 43, n° 20, pp. 10,773-10,781. DOI 10.1002/2016GL069981.

PANAGOPOULOS, Yiannis, GASSMAN, Philip W., KLING, Catherine L., CIBIN, Raj et CHAUBEY, Indrajeet, 2017. Water Quality Assessment of Large-scale Bioenergy Cropping Scenarios for the Upper Mississippi and Ohio-Tennessee River Basins. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. décembre 2017. Vol. 53, n° 6, pp. 1355-1367. DOI 10.1111/1752-1688.12594.

QI, Aiming, MURRAY, Philip J. et RICHTER, Goetz M., 2017. Modelling productivity and resource use efficiency for grassland ecosystems in the UK. *European Journal of Agronomy*. septembre 2017. Vol. 89, pp. 148-158. DOI 10.1016/j.eja.2017.05.002.

SONG, Yang, CERVARICH, Matthew, JAIN, Atul K., KHESHGI, Haroon S., LANDUYT, William et CAI, Ximing, 2016. The Interplay Between Bioenergy Grass Production and Water Resources in the United States of America. *Environmental Science & Technology*. 15 mars 2016. Vol. 50, n° 6, pp. 3010-3019. DOI 10.1021/acs.est.5b05239.

VAN DER HILST, F., LESSCHEN, J.P., VAN DAM, J.M.C., RIKSEN, M., VERWEIJ, P.A., SANDERS, J.P.M. et FAAIJ, A.P.C., 2012. Spatial variation of environmental impacts of regional biomass chains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. mai 2012. Vol. 16, n° 4, pp. 2053-2069. DOI 10.1016/j.rser.2012.01.027.

VANLOOCKE, Andy, BERNACCHI, Carl J. et TWINE, Tracy E., 2010. The impacts of Miscanthus×giganteus production on the Midwest US hydrologic cycle. *GCB Bioenergy*. 2010. Vol. 2, n° 4, pp. 180-191. DOI 10.1111/j.1757-1707.2010.01053.x.

WHITAKER, Jeanette, FIELD, John L., BERNACCHI, Carl J., CERRI, Carlos E. P., CEULEMANS, Reinhart, DAVIES, Christian A., DELUCIA, Evan H., DONNISON, Iain S., MCCALMONT, Jon P., PAUSTIAN, Keith, ROWE, Rebecca L., SMITH, Pete, THORNLEY, Patricia et MCNAMARA, Niall P., 2018. Consensus, uncertainties and challenges for perennial bioenergy crops and land use. *GCB Bioenergy*. mars 2018. Vol. 10, n° 3, pp. 150-164. DOI 10.1111/gcbb.12488.

WU, Yiping et LIU, Shuguang, 2012. Impacts of biofuels production alternatives on water quantity and quality in the Iowa River Basin. *Biomass and Bioenergy*. janvier 2012. Vol. 36, pp. 182-191. DOI 10.1016/j.biombioe.2011.10.030.

Annexe 5 : Questionnaire

Entretien avec les agriculteurs du territoire

Cette rencontre a pour but d'échanger avec vous sur l'opportunité d'implanter chez vous des nouvelles cultures qui peuvent vous intéresser.

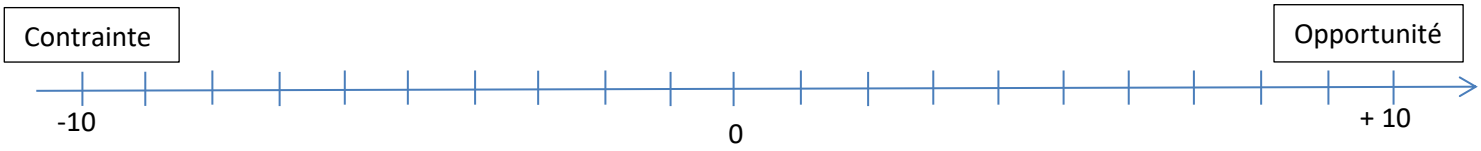
Opportunité

1. Avez-vous déjà pensé à introduire de nouvelles cultures dans votre rotation ? Si oui laquelle ?

2. Pourquoi ?

3. Si aujourd'hui l'opportunité d'implanter de nouvelles cultures s'offre à vous, quelles seraient les cultures qui vous intéresseraient ? (faire un classement)

4. Quels sont pour vous, les opportunités et les risques liées à l'introduction de nouvelles cultures au sein de votre exploitation ?



a) Débouché,
b) Temps de travail,
c) Outils nécessaires,
d) Coût des semences/de l'implantation,
e) Valeur ajoutée,
f) Complexité de l'itinéraire technique,
g) Impact environnemental,
h) Augmente la qualité de l'eau,
i) Aides perçues avec la culture,
j) Filière développée,
k) Passer par des marchés internationaux
l) Vendre en local
m) Autres (préciser)

Connaissance d'autres cultures

5. Connaissez-vous des cultures qui répondent au maximum aux opportunités évoquées ?

6. Quelles sont-elles ?

7. Avez-vous prévu de les implanter ?

8. D'ici combien de temps ?

9. Quelles sont pour vous les cultures qui ne répondent pas du tout aux opportunités évoquées?

Cultures à Biomasse

Cas des haies

10. Possédez-vous des haies sur votre parcellaire ?

11. Comment sont gérées ces haies

12. Connaissez-vous les espèces présentes dans ces haies ?

13. Pour quelles raisons ces haies sont présentes ? (Faire un classement)

14. Ces haies sont-elles valorisées ?

15. De quelle manière ?

Première confrontation avec les nouvelles cultures

Présentation des cultures

Voici trois cultures à biomasse sur lesquels je travaille (miscanthus, switchgrass et TTCR de saule).

16. Connaissiez-vous ces cultures ?

17. En aviez-vous déjà entendu parler ?

18. Qui vous en a parlé ? Sur quel support ?

19. Où les aviez-vous déjà rencontrées ?

20. Quelle est l'image des cultures à biomasse dans le monde agricole ?

21. Quel est votre ressenti du fait que ces cultures n'aient pas de valeur alimentaire ?

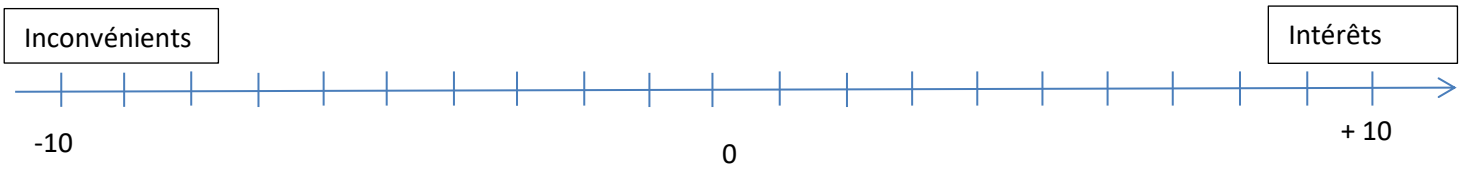
22. Pensez-vous que ces cultures permettent de maintenir une eau de qualité ?

23. Pourquoi ?

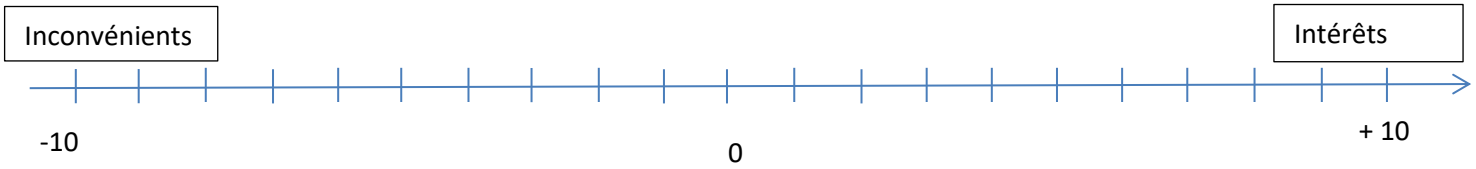
24. Ces itinéraires vous posent-ils des questions ? Lesquelles ?

25. Après avoir vu ces informations quelles sont pour vous les intérêts et les inconvénients de ces cultures ?

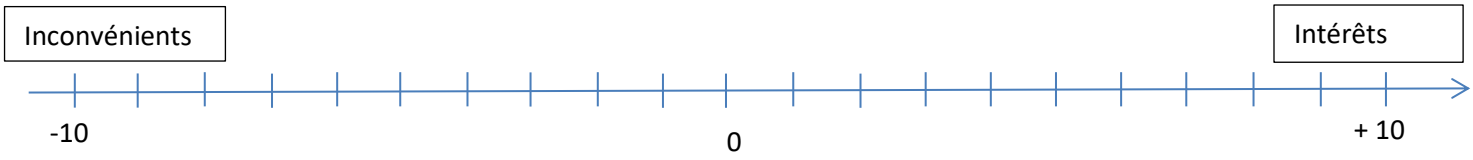
Cas du Switchgrass :



Cas du Miscanthus :



Cas du TTCR de saule :



26. Quel sentiment avez-vous vis-à-vis de la durée de vie de ces cultures ?

27. Quel sentiment avez-vous vis-à-vis du temps de travail nécessaire et de la période des pics de travail sur votre exploitation ?

28. Pensez-vous que ces cultures demandent beaucoup de temps à l'agriculteur ?

29. Pour vous, quelle(s) étape(s) semble(nt) primordiale(s) pour réussir la culture ? (faire un classement)

30. Pour vous, quels sont les freins (techniques) à l'implantation de ces cultures ? (faire un classement)

31. Pensez-vous qu'il soit nécessaire d'utiliser d'autres types de matériels pour la culture ? (de la plantation à la récolte)

32. Est-ce que cela nécessite un investissement lourd selon vous ?

Valorisable en combustion pour chaudières : 15 tonnes de MS de miscanthus (soit environ 1ha) apportent l'équivalent de 7 200 L de fuel (La consommation moyenne annuelle d'un ménage français se chauffant au fioul domestique est d'environ 2000 litres soit 2 m^3). Les valeurs sont sensiblement les mêmes pour les autres cultures. Ces cultures peuvent également être valorisées en **litière** pour animaux (bovin, ovin, aviculture et équins) et en **biomatériaux** (en cours de développement).

Filière

33. Quelle est selon vous le débouché le plus simple à mettre en place sur le territoire ?

34. Pour quelles raisons ?

35. Qu'est-ce qui pour vous, permettrait la création de filières de valorisation sur le territoire ? (faire un classement)

36. Quelles sont les critères de choix qui vous semblent important pour vous lancer dans la culture de ces plantes ?

Pas important

Très important

0 20

a) Débouché existant sur le territoire
b) Contrat de longue durée avec un client
c) Coût du matériel
d) Prix de l'implantation
e) Bénéfice
f) Lieu du point de stockage
g) Transport de la récolte
h) Temps de travail
i) Retour sur investissement
j) Suivit et conseils sur la culture

37. Concernant le lieu de stockage, préférez-vous un stockage sur place où centralisé ?

Débouché litière

38. Quelles doivent être les caractéristiques d'une bonne litière selon vous ? (faire un classement)

39. Seriez-vous prêt à utiliser d'autres ressources (autre que paille de blé et d'orge) comme litière pour vos animaux ?

40. Quelle quantité de paille utilisez-vous ?

41. En achetez-vous ou tout est produit sur l'exploitation ? (avoir un ratio)

42. Si achat : En moyenne, à combien achetez-vous la paille ?

43. Quelles sont les points forts et les points faibles de ce débouché ?

Points faibles

Points forts

-10 0 + 10

Débouché énergie

44. Combien utilisez/consommez-vous d'énergie pour vous chauffer ?

45. Seriez-vous prêt à installer une chaudière à biomasse ?

46. Seriez-vous prêt à livrer des entreprises et/ou des communes en biomasse énergétique ?

47. Quelles sont les points forts et les points faibles de ce débouché ?

Points faibles

Points forts

-10 0 + 10

Point économie

48. Avez-vous une idée du coût de ces cultures (implantation + gestion) ? Pouvez-vous l'estimer ?

49. A partir de combien de temps pensez-vous qu'il est possible d'avoir un retour sur investissement ?

50. Savez-vous s'il y a des aides possibles au développement de ces cultures ?

51. Seriez-vous prêt à faire un contrat qui garantit un prix pour une obligation d'un minimum à livrer ?

52. Que penseriez-vous si le prix de vente de ces cultures était indexé au prix de vente d'une culture de vente ?

53. Laquelle vous semble la plus propice et pourquoi ?

54. Que penseriez-vous si le prix de vente de ces cultures était indexé au prix de vente du fuel ?

55. Entre une indexation avec une culture de vente et le fuel, laquelle vous semble la plus approprié et pourquoi ? (faire un classement des raisons)

La possibilité d'en implanter

56. Etes-vous intéressé par ces cultures ?

57. Est-ce que vous voyez un intérêt personnel à implanter ces cultures ?

58. En ayant connaissance de tout cela, voudriez-vous faire un essai d'implantation ?

59. Seriez-vous prêt à vous lancer directement dans la production ?

60. Quelles sont les parcelles où vous les mettriez (description de ces parcelles : type de sol, accessibilité, distance avec l'exploitation…). Quels sont les critères de choix de ces parcelles ? (faire un classement)

61. Sur combien d'hectare seriez-vous prêt à mettre ces cultures ?

Questions paysagères

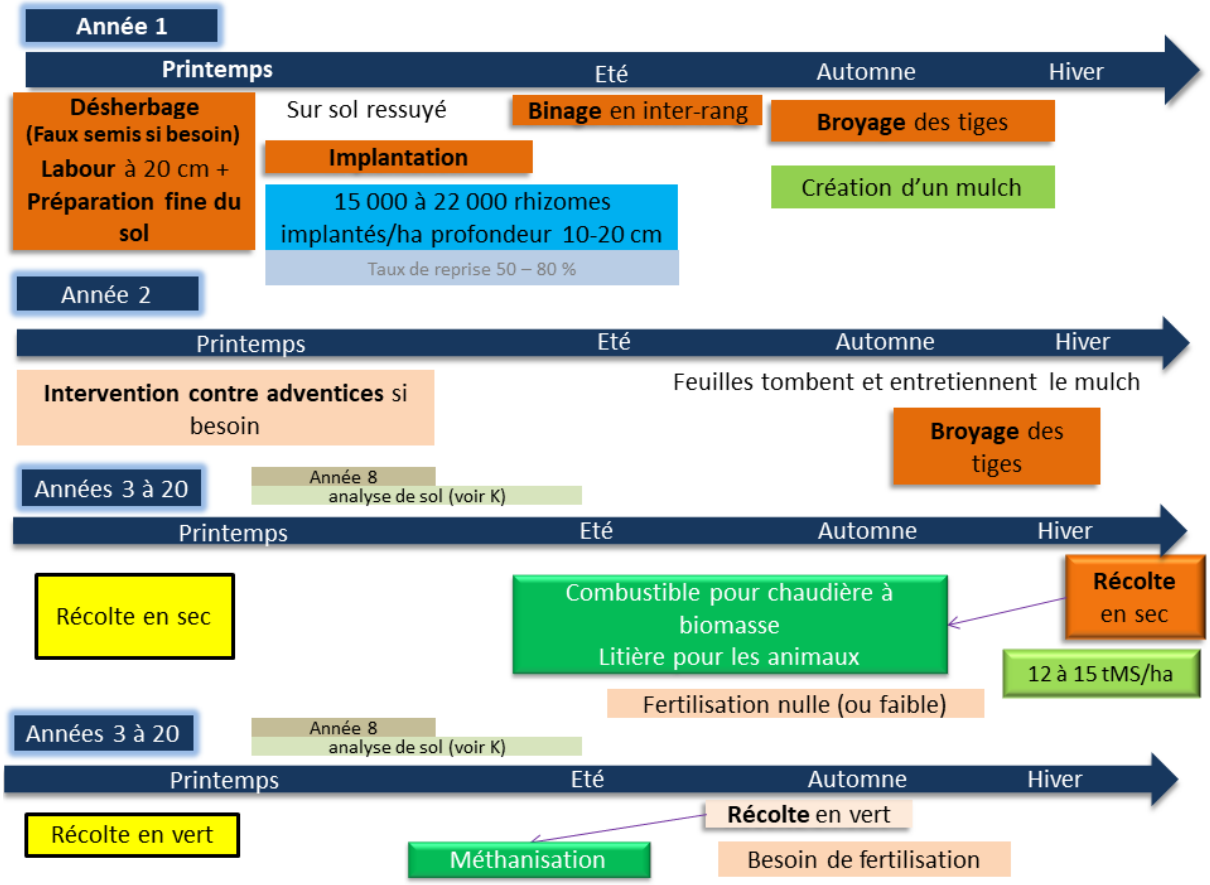
62. Pensez-vous que l'agriculture impact le paysage ?

63. De quelle manière ?

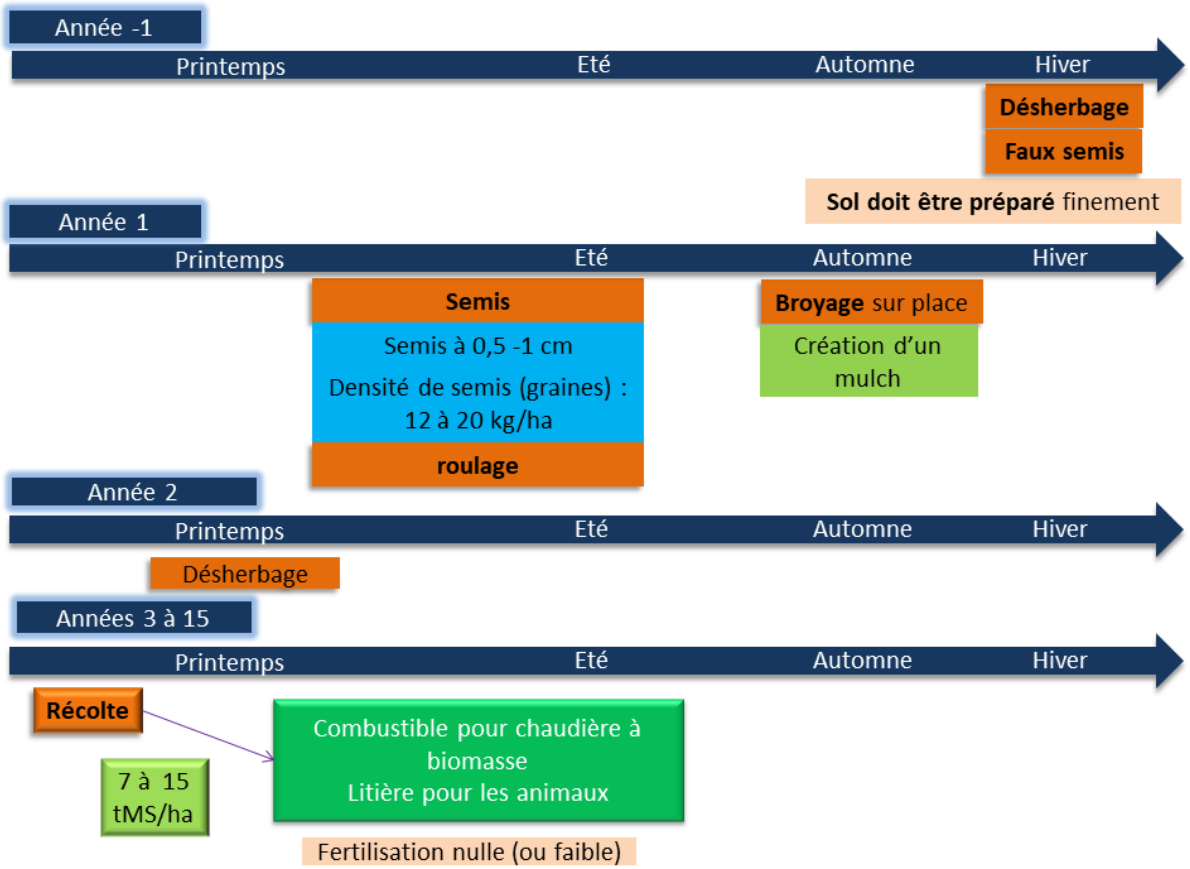
64. Etes-vous sensible aux questions paysagères ?

Annexe 6 : Présentation des trois itinéraires techniques

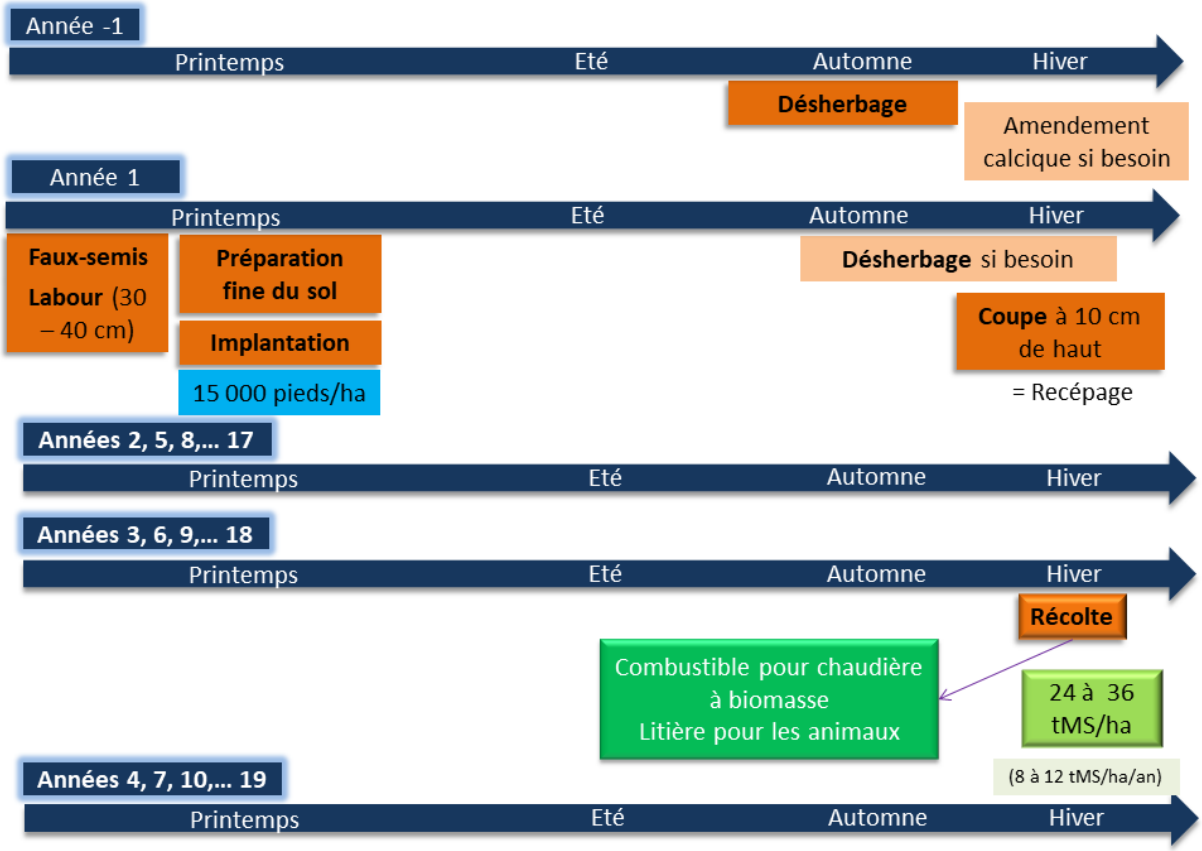
Itinéraire technique du miscanthus



Itinéraire technique du switchgrass



Itinéraire technique du Taillis Très Courte Rotation de saule



Annexe 7 : Document présenté lors de la promotion du miscanthus en litière équine

Utiliser du Miscanthus comme litière pour les équins

Infos clés

- **Très absorbant :** Ne chauffe pas, pas de formation de NH_3
- **100% naturelle :** 0 pesticide 0 phyto
- **Economique :** Faible consommation
- **Non appétant :** Contrôle alimentaire
- **Dépoussiéré :** Pas d'allergie
- **Souple et non abrasive :** Pour pieds sensibles
- **Dégradable rapidement :** Compost neutre

Protéger la ressource en eau

Créer de la valeur ajoutée

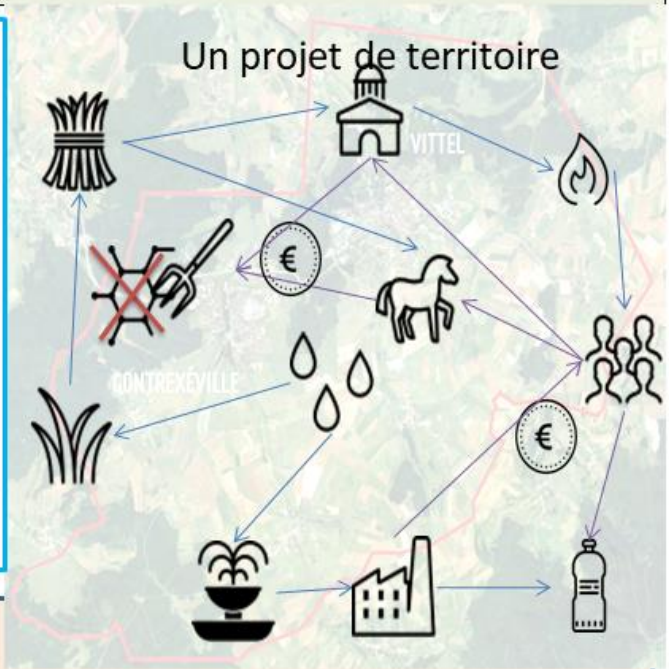
Créer des filières sur le territoire

Maintenir des exploitants sur le territoire

Maintenir des emplois

Maintenir des loisirs

Avoir une action environnementale



Utilisation :

Box nettoyé, désinfecté

Tapis épais de Miscanthus (300 L pour 9m²)

Entretien
- Crottins enlevés ainsi que zones humides
- Chaque semaine, compenser ce qui a été enlevé

Toutes les 10 semaines recommencer le processus

Approuvé par de nombreux professionnels parmi lesquels:

Clinique vétérinaire (Calvados)
Hippodrome de La Capelle (Aine)

Centres équestres
Ecuries

Résumé

Afin de protéger les eaux minérales de Vittel® et Contrex® tout en permettant une rentabilité des exploitants agricoles de l'impluvium, l'étude du développement du miscanthus, du switchgrass et des TTCR a été réalisée. Cette étude a pour but dans un premier temps de montrer l'aspect protecteur des cultures vis-à-vis de la ressource en eau puis d'étudier la possibilité d'en implanter sur le territoire grâce à des rencontres avec les acteurs potentiellement concernés : agriculteurs, centres équestres, communes,….

Mots clefs : Biomasse, Qualité de l'Eau, Développement de Filières, Miscanthus.

Abstract

In order to conciliate the protection of Vittel® and Contrex® mineral water quality and the profitability of the farms, the study aims to develop new energetic crops such as miscanthus, switchgrass and short rotation coppice was done. This study shows how these crops are beneficial for water quality and the opportunity for farmers to implant it on the area. Furthermore, the study of opportunities on the area was done to develop a biomass economic sector. Some meetings were done with different players of the area.

Keywords: Biomass, Water quality, Development, Miscanthus.

Pour citer ce document

BOULEC, Renaud, « Développement de cultures énergétiques sur l'impluvium de Vittel-Contrexéville », Mémoire de stage d'Ingénieur Agronome de l'ENSAIA, spécialité Agricultures et Développement des Territoires, Nancy, Université de Lorraine, ENSAIA, 2018.

Annexe 2

AGREV3 DT - Eléments d'information sur l'efficacité du miscanthus récolté en vert pour la méthanisation

Quel rendement méthanogène ?

Document en cours de validation en date du 22/05/19

INRA SAD-ASTER Mirecourt - 20/05/19
Clémentine Frogneux, Marc Benoît

L'intérêt du miscanthus est multiple. Son potentiel élevé de production de biomasse à l'hectare en fait une culture particulièrement intéressante pour la valorisation énergétique. Le fonctionnement agronomique de la culture récoltée en sec en début de printemps permet de se passer d'intrant, ce qui la rend résiliente et notamment favorable à la préservation de la ressource en eau [1]. Cependant, le rendement méthanogène de la biomasse est fonction de son stade de développement. Dans une optique d'utilisation de la culture en méthanisation, le potentiel maximal de la culture est atteint lorsque cette dernière est récoltée « en vert » et non en sec.

Table des matières

POTENTIEL METHANOGENE DE LA MATIERE 2
Miscanthus récolté en sec 2
Miscanthus récolté en vert 2
GESTION AGRONOMIQUE DU MISCANTHUS RECOLTE EN VERT 3
RENDEMENT METHANOGENE DU MISCANTHUS 7
MISCANTHUS EN VERT ET QUALITE DE L'EAU 8
CONCLUSION 11
REFERENCES 12

POTENTIEL METHANOGENE DE LA MATIERE

Plusieurs travaux de recherche concernant le pouvoir méthanogène du miscanthus existent. Plusieurs études ont été réalisées sur le potentiel méthanogène du miscanthus récolté en vert avant l'hiver, et des études sont en cours sur le potentiel méthanogène du miscanthus récolté en sec en sortie d'hiver, avant la reprise de végétation [2].

Miscanthus récolté en sec

Les premiers résultats des expérimentations montrent que le miscanthus récolté en sec a un potentiel méthanogène (Biochemical Methane Potential = BMP) à forte variabilité, plus faible que le miscanthus récolté en vert. Il est de 95 à 200 NmL CH4/gTS (millilitres normalisés de CH4 par gramme de solide) pour le miscanthus en sec contre 119 à 214 NmL CH4/gTS pour le miscanthus vert dans les mêmes conditions d'étude [3].

La cinétique de digestion du miscanthus en sec est élevée, plus que le maïs et le miscanthus récolté en vert. Elle pourrait être améliorée si le miscanthus était utilisé pour de la litière. En effet, les brins imbibés présenteraient certainement une digestibilité plus rapide [4].

Miscanthus récolté en vert

Les résultats des études indiquent que plus le miscanthus est récolté précocement, plus important est le potentiel méthanogène de la matière récoltée, avec un stade de développement optimal en fin d'été [4] [5] [6]. En effet, la date de récolte influence la composition de la biomasse [7] et un miscanthus récolté en octobre sera plus ligneux qu'un miscanthus récolté fin d'été, donc avec un potentiel méthanogène de la matière moindre [4]. Le miscanthus testé dans le cadre du projet ENERBIOM, récolte à la mi-octobre, contient plus de parois cellulaires que le maïs et moins de glucides et protéines [4]. Or la teneur en lignine réduit la production de biogaz en limitant la dégradation du substrat et plus la teneur en matières organiques est élevée, plus la production de méthane est importante [8].

Ainsi, le potentiel méthanogène d'un miscanthus récolté en octobre est inférieur à celui d'un maïs ensilage. A titre de comparaison, des résultats d'une expérimentation nous indiquent que le BMP du miscanthus récolté en octobre est compris aux alentours de 250 mL/g contre 400 mL/g pour le maïs [6].

En outre, le taux de dégradation à 90 % du miscanthus en vert récolté à la mi-octobre est de 300 jours contre seulement 14 jours pour le maïs ensilage. [4]

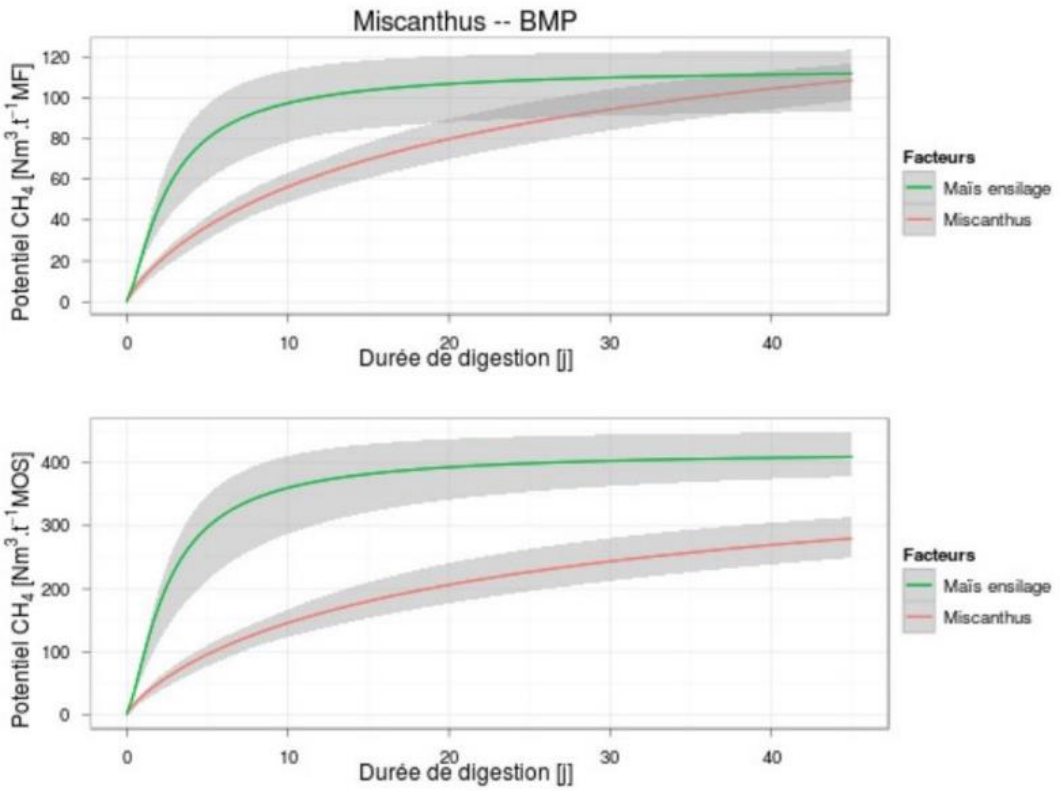


Figure 1- Curve-fitting moyen des productions cumulées de méthane (en m^3 normal par tonne de – matière fraîche – matière organique sèche) du miscanthus récolté en 2009 et 2010, versant belge (source : ENERBIOM)

Source : Somer (Valbiom), 2014

La cinétique de digestion est élevée dans le cas du miscanthus récolté en vert comparé au maïs ensilage. Le miscanthus en vert conviendrait donc mieux aux grosses unités de méthanisation, où le temps de séjour est supérieur à 100 jours.

Ainsi, plus le miscanthus est récolté précocement (fin d'été), meilleur est le potentiel méthanogène de la matière. Cependant, la culture présente une trop faible résistance à une coupe si précoce en continu. Au-delà du potentiel méthanogène de la matière, il convient d'évaluer le rendement méthanogène de la culture de miscanthus pour estimer la gestion optimale de la culture en vue d'une utilisation en méthanisation.

GESTION AGRONOMIQUE DU MISCANTHUS RECOLTE EN VERT

Le miscanthus Giganteus recycle une partie importante des nutriments de la partie supérieure de la plante jusqu'aux rhizomes en automne, et réutilise cette réserve pour la production de nouvelles pousses au printemps. Une coupe avant relocalisation des nutriments dans les rhizomes devrait à priori épuiser la plante [9]. En effet, une récolte trop précoce pourrait induire une exportation trop importante d'éléments minéraux, ce qui épuiserait les rhizomes. La plante n'aurait alors pas assez de réserve carbonée et d'éléments minéraux pour une bonne reprise au printemps, ce qui impacterait la productivité de la culture sur le long terme [5] [10]. Ainsi, certains retours d'expérience sont négatifs

concernant la gestion de la culture en vert, notamment en Bavière [11] et sur le site géré par Novabiom [12], et pourraient être expliqués par un apport compensatoire insuffisant de fertilisants et/ou une coupe trop précoce.

Une expérimentation menée dans le Sud-Ouest de l'Allemagne a permis de tester la résistance de la culture de miscanthus à différentes dates de coupe avant hiver (implantation en 2008 près de Stuttgart/ sol argilo-limoneux/ 689 mm de précipitation annuelle moyenne) [9].

Table 2 Experimental treatments of the cutting tolerance field trial

No.	Harvest regime	Fertilization (kg N ha^{-1})	Harvest date Year 1 (2013)	Harvest date Year 2 (2014)
1	Double cut	80	1st cut: 18.07.13	1st cut: 28.07.14
2		140	2nd cut: 24.10.13	2nd cut: 23.10.14
3	Early single cut	80	29.08.13	28.08.14
4		140		
5	Late single cut	80	24.10.13	23.10.14
6		140		
7	Winter control	80	20.02.14*	09.03.15†

*Biomass from growing season 2013.
†Biomass from growing season 2014.

Source : Kiesel et al., 2017

L'expérimentation donne les observations suivantes dès la deuxième année suivant la coupe en vert :

FERTILISATION MINERALE DATE DE COUPE	80 UN/ha/an	140 UN/ha/an
juillet et octobre (2 coupes)	mauvaise reprise	mauvaise reprise
aout	mauvaise reprise	mauvaise reprise
octobre	Productivité stable l'année d'après voire supérieure	Productivité stable l'année d'après voire supérieure

La productivité du miscanthus récolté en août et celle du miscanthus ayant subi deux coupes en juillet et en octobre baisse significativement dès l'année suivante. L'observation d'une baisse de productivité suite à une coupe en août a également été observée par Fritz et Formowitz, 2010.
En revanche, la productivité du miscanthus récolté en octobre est stable l'année après la coupe, voire augmente légèrement. Aucune différence entre les deux taux de fertilisation à 80 ou 140 unités d'azote n'est observée [9].

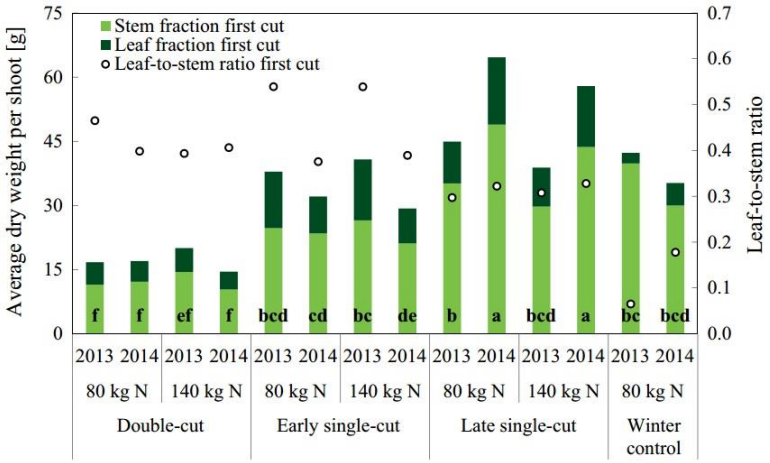
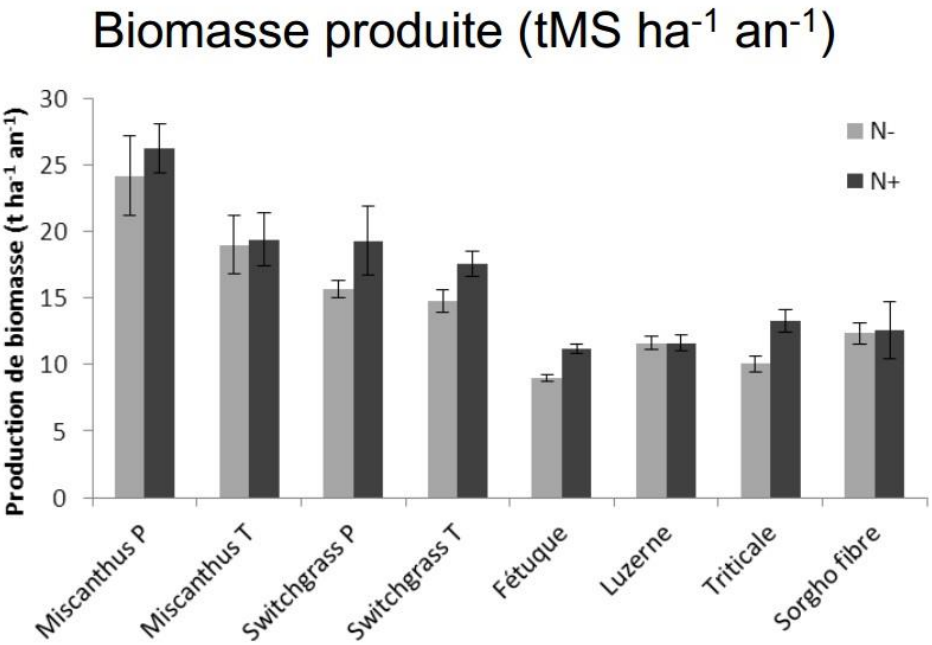


Fig. 2 Average dry weight per shoot and leaf-to-stem ratio of the first cut from the four different harvest regimes and two fertilization levels [80 and 140 kg nitrogen (N) ha^{-1} a^{-1}] in the field trial. Letter display corresponds to total average dry weight per shoot (leaf and stem biomass). The columns with different lower-case letters differ significantly from each other according to a multiple *t*-test $\alpha = 0.05$.

Source : Kiesel et al., 2017

Les travaux de recherche menés à la station expérimentale de l'INRA à Estrées-Mons sur la culture de miscanthus nous apportent également des renseignements sur le comportement de la culture lorsqu'elle est récoltée en octobre. Dans le cas d'un miscanthus récolté en octobre et non fertilisé, une diminution du rendement de moitié a été observée à partir de la quatrième année d'implantation, tandis que le miscanthus récolté à la même date et fertilisé à 120 UN/ha (minéral) n'a pas présenté de baisse de rendement. [13] [5] (les conditions pédo-climatiques du site sont à garder à l'esprit, avec un sol particulièrement profond de plus de 3 mètres).



Source : Cadoux et al., 2013.
MIS P = miscanthus récolté en vert (miscanthus précoce), MIS T = miscanthus récolté en sec (miscanthus tardif), N- = sans fertilisation, N+ = fertilisation à 120 UN/ha/an

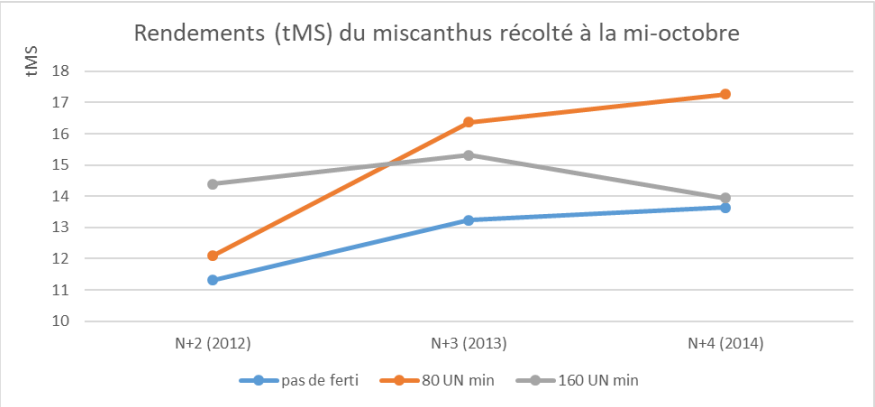
Traitement	Rdt_MS (t/ha/an)	Conc_N (g/kg)	Conc_C (g/kg)	Conc_P (g/kg)	Conc_K (g/kg)	Qtité_N (kg/ha/an)	Qtité_C (kg/ha/an)	Qtité_P (kg/ha/an)	Qtité_K (kg/ha/an)
MIS P N-	**19.3**	4.2	464.5	1.1	8.3	79.0	8.9	20.0	158.9
MIS P N+	**26.3**	5.9	468.4	0.7	8.5	156.8	12.3	19.2	225.4
MIS T N-	18.6	2.3	478.4	0.6	5.3	42.4	8.9	10.9	98.3
MIS T N+	18.9	4.3	476.9	0.4	6.6	80.4	9.0	8.4	123.7

Tableau résumé des résultats de l'expérimentation sur la période 2006-2015 [5].

Une étude en cours sur le site de Libramont en Belgique (500 m d'altitude / 1100 mm de précipitation annuelle moyenne), faisant suite au projet ENERBIOM, donne des premiers résultats allant dans le sens des études citées ci-dessus [14]. Le miscanthus semble bien résister à la coupe en vert en octobre, même en absence de fertilisation. Les résultats finaux seront disponibles au printemps 2020.

rdt tMS/ha	N+2 (2012)	N+3 (2013)	N+4 (2014)
pas de ferti	11.305	13.235	13.644
80 UN min	12.096	16.369	17.267
160 UN min	14.384	15.314	13.946

Source données brutes : D. STILMANT du CRA W, mai 2019



On constate donc que dans le cas des expérimentations menées dans le Sud-Ouest de l'Allemagne, dans le sud de la Belgique et à Estrées-Mons, l'apport d'azote suffit à pallier l'exportation due à la coupe en vert en octobre, voire n'est pas nécessaire. Ainsi, en octobre, la culture a certainement remobilisé une partie suffisante des nutriments en réserve dans les rhizomes, ce qui permet de mieux résister à l'hiver [5] (Godin et al., 2013b, Bayern Biogas Forum, 2010). Cette stabilité de productivité lorsque le miscanthus est récolté en octobre a également été observée par Mayer *et al.*, 2014 et Yates *et al.*, 2015. Cependant, les mécanismes influençant la tolérance de la coupe précoce sont aujourd'hui encore mal connus et il conviendrait de mener une étude similaire sur le long terme et avec répétitions d'expérience à d'autres localisations pour conforter ces résultats [9].

Ainsi, afin de ne pas épuiser la culture de miscanthus en cas de coupe en vert, il convient d'éviter de réaliser la récolte avant octobre, et un apport de minimum 80 UN/ha/an est préconisé. Cet apport est modulable en fonction de l'environnement de la culture et un suivi du rendement de la culture sur le long terme, couplé à des mesures de teneurs en minéraux, permettra d'affiner la gestion de la culture en évitant les carences [5]. En outre, dans le cas d'une utilisation du miscanthus pour la méthanisation, il serait conseillé d'utiliser le digestat comme fertilisant, permettant ainsi de boucler le cycle des autres éléments minéraux exportés [9].

RENDEMENT METHANOGENE DU MISCANTHUS

Bien que le potentiel méthanogène de la matière issue d'un miscanthus récolté fin d'été soit plus élevé que dans le cas d'une coupe en octobre, la moindre production de biomasse induite par la coupe trop précoce entraine un potentiel méthanogène plus faible à l'hectare que dans le cas d'une coupe en octobre. De plus, le miscanthus récolté en octobre a un rendement méthanogène significativement plus élevé que le miscanthus en sec (45 % plus élevé) du fait d'une production plus importante de biomasse et d'un meilleur potentiel méthanogène de la matière [9].

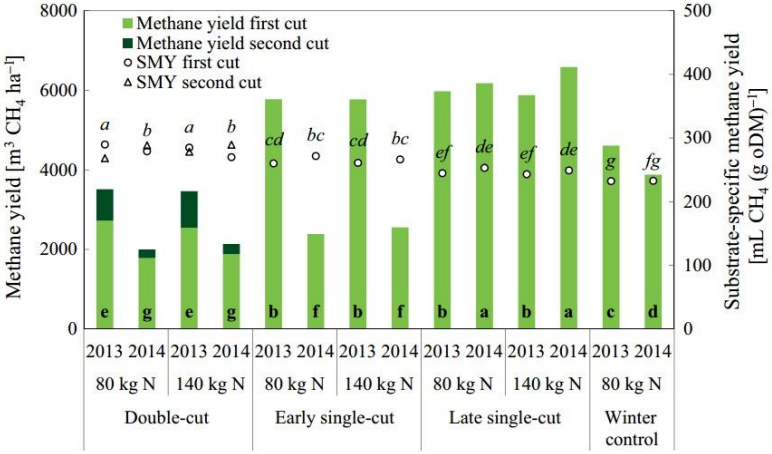


Fig. 4 Mean methane yield per hectare and substrate-specific methane yield (SMY) of the four harvest regimes at two fertilization levels [80 and 140 kg nitrogen (N) ha^{-1} a^{-1}] in the field trial. Letter display with bold lower-case letters corresponds to total mean methane yield (first and second cut). Letter display with italic lower-case letters corresponds to the SMY of the first cut. The columns with different bold or italic lower-case letters differ significantly from each other according to a multiple *t*-test $\alpha = 0.05$.

Source : Kiesel et al., 2017

D'après les expérimentations menées sur le sujet, le miscanthus utilisé pour la méthanisation doit donc être coupé en automne pour offrir le meilleur rendement méthanogène. Ces valeurs élevées de rendement lui permettent de se mesurer à la culture de maïs qui est classiquement utilisée en méthanisation (mais catastrophique pour l'eau !).

En effet, plusieurs études démontrent un intérêt comparable au maïs à l'utilisation de miscanthus pour la méthanisation. Mayer *et al.* nous informe que le miscanthus arrive en deuxième position après le maïs parmi les cultures testées pour leur potentiel méthanogène (4468 ± 1265 m^3/ha contre 6934 ± 1850 m^3/ha) [6]. L'expérimentation menée dans le Sud-Ouest de l'Allemagne donne un rendement en méthane du miscanthus récolté en octobre d'environ 6153 m^3/ha (A. Kiesel, I. Lewandowski). Comparé

à un rendement moyen du maïs ensilage de 6008 m^3/ha (Mast *et al.*, 2014), le miscanthus Giganteus présente dans ce cas un intérêt supérieur au maïs pour une valorisation en méthanisation. Des résultats similaires ont été obtenus dans le cadre du projet ENERBIOM [8]. Ces résultats s'expliquent par la forte productivité de la culture de miscanthus. En effet, si l'on compare les productions énergétiques à l'hectare en fonction des rendements observés (rendement de 20 à 25 tMS/ha pour le miscanthus en vert), le miscanthus en vert présente la production la plus importante de toutes les biomasses évaluées dans le cadre du projet ENERBIOM [6], qui sont le chanvre, l'épeautre, le maïs, le seigle, le sorgho, la fétuque et le panic érigé. En outre, le miscanthus en vert utilisé pour comparer les rendements méthanogènes, illustrés dans le graphique ci-dessous, correspond à des coupes en année 1 et 2, lorsque le potentiel maximal de productivité de la culture n'est pas encore atteint. L'écart pourrait ainsi se creuser entre le miscanthus et le maïs, en faveur du miscanthus. [4]

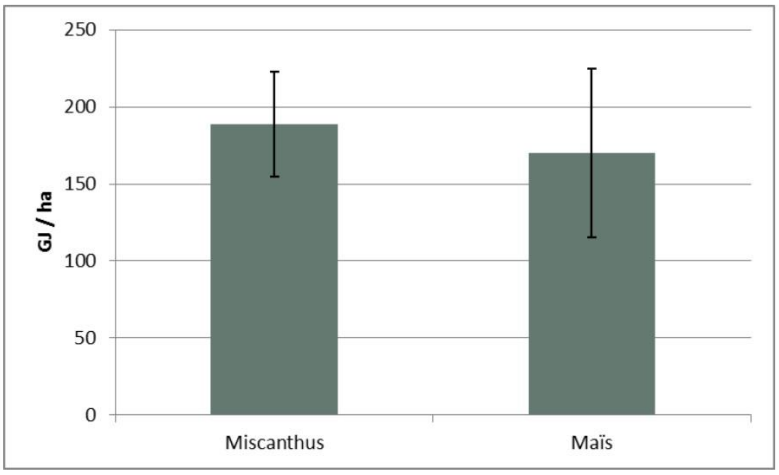


Figure 4- Production énergétique par hectare (en GJ/ha)

Source : Somer (Valbiom), 2014

Le miscanthus récolté en vert semble donc bien indiqué pour la méthanisation, son rendement méthanogène étant comparable à celui du maïs. Les moindres besoins en fertilisation azotée comparé à la culture de maïs et le caractère pérenne de la culture de miscanthus laissent à penser que l'utilisation du miscanthus pour la méthanisation est préférable à l'utilisation du maïs du point de vue des impacts sur l'environnement (moindres émissions de GES, biodiversité, meilleure qualité de l'eau).

MISCANTHUS EN VERT ET QUALITE DE L'EAU

Des données de lixiviation des nitrates sous miscanthus en vert ont fait l'objet de publications scientifiques. Que le miscanthus récolté à l'automne soit fertilisé ou non, les résultats montrent une faible lixiviation des nitrates comparé à des cultures annuelles fertilisées.

Une expérimentation menée dans l'Illinois montre ainsi une très faible lixiviation de nitrates sous miscanthus récolté en vert et non fertilisé [15] :

Table 3. Mean ± 95% confidence limits of the annual leaching fluxes of nitrate, ammonium, and total inorganic nitrogen recovered in the ion exchange resin lysimeters at 50 cm depth under maize–soybean, switchgrass, and *Miscanthus*.

Collection period†	Maize–soybean	Switchgrass	*Miscanthus*
	kg N ha^{-1} yr^{-1}		
		NO_3	
2005–2006	41.2 ± 12.6	0.3 ± 0.3	ND‡
2006–2007	34.2 ± 6.5	0.4 ± 0.3	6.6 ± 2.0
2007–2008	45.9 ± 12.9	3.9 ± 3.2	1.6 ± 0.7
2008–2009	43.1 ± 8.9	1.1 ± 0.5	1.5 ± 0.7
2006–2009 avg.	40.4 ± 5.2	1.4 ± 0.7	3.0 ± 1.0
		NH_4–N	
2005–2006	2.8 ± 2.8	0.1 ± 0.05	ND
2006–2007	2.4 ± 0.6	4.2 ± 1.3	1.3 ± 0.2
2007–2008	2.3 ± 0.4	3.9 ± 0.7	2.3 ± 0.7
2008–2009	2.7 ± 0.5	4.0 ± 1.2	1.8 ± 0.4
2006–2009 avg.	2.4 ± 0.3	4.0 ± 0.6	1.8 ± 0.3
		TIN§	
2005–2006	45.4 ± 14.4	0.5 ± 0.3	ND
2006–2007	36.5 ± 6.8	4.6 ± 1.3	7.9 ± 2.0
2007–2008	48.3 ± 13.0	7.8 ± 3.6	3.9 ± 1.2
2008–2009	46.0 ± 9.0	5.1 ± 1.6	3.3 ± 0.9
2006–2009 avg.	43.0 ± 5.4	5.7 ± 1.6	4.8 ± 1.0

† The collection periods began in mid-April to early May and continued to approximately the same date in the following year.

‡ ND, no data collected due to establishment failure.

§ TIN, total inorganic nitrogen.

Source : McIsaac et al., 2010

Une expérimentation menée à l'INRA à Estrée-Mons nous donne également des informations sur la lixiviation des nitrates sous miscanthus récolté en vert. Le tableau ci-dessous indique que le sol sous miscanthus récolté en vert non fertilisé contient début mars 20 kgN/ha, tandis que le sol sous miscanthus fertilisé en contient 35 (moyennes sur 7 années d'expérimentation). A la mi-mars, le non fertilisé en contient 16 kgN/ha tandis que le fertilisé en contient 33. Cependant, la différence entre les deux traitements n'est pas significative [16].

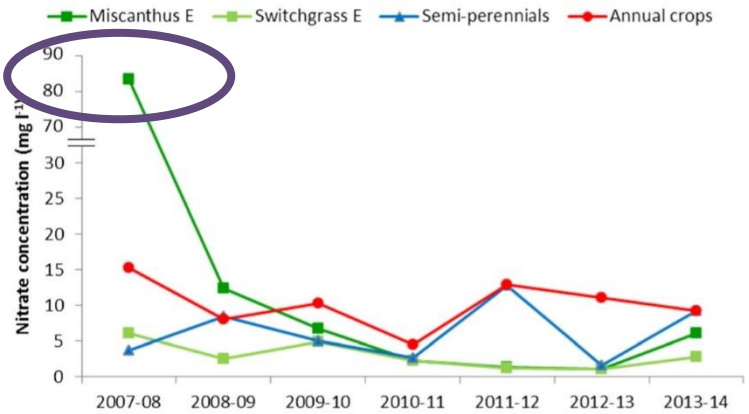
Table 2 Soil water, nitrate and ammonium contents over 0–150 cm measured in early November (average of 7 years from 2007 to 2013) and mid-March (average of 7 years from 2008 to 2014)

Rotation	N	Soil water content (mm)						Soil nitrate (kg N ha^{-1})						Soil ammonium (kg N ha^{-1})					
		Early November			Mid-March			Early November			Mid-March			Early November			Mid-March		
Mis E	N−	434	(15)	b+	516	(2)	b	20	(1)	b	16	(2)	d	10	(1)	a−	13	(2)	b−
	N+	409	(4)	b−	515	(1)	b	35	(1)	a	33	(2)	a	15	(1)	a+	17	(2)	b+
Mis L	N−				518	(6)	ab				17	(1)	d				19	(4)	a−
	N+				515	(2)	b				33	(1)	a				22	(5)	a+
Swi E	N−	476	(4)	a+	523	(4)	ab	11	(1)	c	11	(1)	e	11	(2)	a−	15	(3)	ab−
	N+	446	(7)	a−	520	(2)	ab	19	(1)	b	21	(1)	c	15	(3)	a+	18	(2)	ab+
Swi L	N−				525	(4)	a				14	(2)	de				18	(2)	ab−
	N+				518	(4)	ab				28	(4)	b				19	(1)	ab+
Fes-Alf	N−	402	(6)	C	506	(13)	A	27	(8)	C	35	(7)	B	18	(2)	A	16	(2)	A
	N+	404	(4)		508	(11)	A	25	(7)		35	(3)		17	(2)	AB	16	(2)	
Alf-Fes	N−	416	(15)	B	503	(20)	A	36	(2)	AB	56	(4)	A	15	(1)	BC	13	(4)	A
	N+	417	(7)		508	(13)	A	35	(1)		58	(0)		16	(3)	B	13	(2)	
Sor-Tri	N−	465	(5)	A	504	(9)	A	37	(5)	A	28	(2)	B	8	(1)	E	9	(1)	B
	N+	455	(11)		499	(20)	A	53	(9)		38	(3)		11	(1)	D	10	(2)	
Tri-Sor	N−	460	(5)	A	504	(2)	A	31	(8)	B	38	(9)	B	11	(1)	D	9	(1)	B
	N+	465	(13)		511	(6)	A	30	(4)		38	(6)		11	(1)	D	9	(2)	

Values in parentheses are standard deviations between blocks. Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between treatments (lowercase: perennial crops; uppercase: other crops). The minus (−) and plus (+) signs indicate a significant effect of N fertilisation (without interaction with rotations)

Source : Ferchaud et al., 2016

Fig. 3 Evolution of the mean nitrate concentration in drained water (mg NO_3 l^{-1}) for miscanthus E, switchgrass E, semi-perennial (mean of Fes-Alf and Alf-Fes) and annual crops (mean of Sor-Tri and Tri-Sor). Data are averaged between N− and N+ treatments



Source : Ferchaud et al., 2016

Dans cette même expérimentation, au bout de la troisième année d'implantation, le miscanthus précoce qui correspond au miscanthus récolté en vert induit une concentration des eaux de drainage inférieure à 10 mg/l (la lixiviation importante calculée en première année serait possiblement liée à une année particulière d'implantation et surestimée, du fait d'une absorption immédiate des nitrates par la culture qui réduirait les pertes réelles par drainage). La concentration moyenne en nitrates sous miscanthus précoce fertilisé est de 8.1 ± 4.1 mg/l dans cette expérimentation, et sous miscanthus précoce non fertilisé de 2.5 ± 0.5 mg/l [16].

Table 7 Amounts of drained water and nitrate leached, and nitrate concentration in drained water below 210 cm (mean values over 7 years)

Rotation	N	Drained water (mm $year^{-1}$)			Nitrate leached (kg N ha^{-1} $year^{-1}$)			Nitrate concentration (mg NO_3 l^{-1})		
Mis E	N−	83	(13)	b+	2.0	(0.9)	a−	10.4	(3.5)	a−
	N+	56	(11)	b−	2.8	(0.2)	a+	23.0	(3.6)	a+
Swi E	N−	127	(9)	a+	0.6	(0.0)	b−	2.0	(0.0)	b−
	N+	94	(13)	a−	0.8	(0.2)	b+	4.1	(1.4)	b+
Fes-Alf	N−	59	(10)	B	0.5	(0.1)	C	3.8	(0.5)	C
	N+	65	(19)		0.5	(0.2)		3.1	(0.6)	
Alf-Fes	N−	69	(17)	B	2.0	(1.0)	AB	12.4	(4.1)	A
	N+	63	(19)		2.3	(0.1)		16.9	(5.3)	
Sor-Tri	N−	134	(9)	A	2.9	(0.9)	A	9.6	(2.3)	A
	N+	127	(20)		5.0	(3.6)		16.4	(9.2)	
Tri-Sor	N−	142	(2)	A	2.4	(0.6)	B	7.6	(1.9)	B
	N+	132	(8)		1.8	(0.7)		6.1	(3.0)	

Values in brackets are standard deviations between blocks. Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between treatments (*Lowercase*: perennial crops; *Uppercase*: other crops). The minus (–) and plus (+) signs indicate a significant effect of N fertilisation (without interaction with rotations)

Source : Ferchaud et al., 2016

Le miscanthus récolté en vert serait donc, à priori, bien plus favorable à la préservation de l'eau qu'une culture annuelle, et en particulier le maïs, souvent utilisé pour la méthanisation.

CONCLUSION

Le potentiel méthanogène de la matière issue du miscanthus diminue à partir de la fin de l'été du fait d'une lignification de la culture, ce qui augmente la cinétique de digestion dans le méthaniseur et rend la culture moins compatible aux petites unités de méthanisation de moins de 100 jours de temps de séjour. Cependant, la productivité du miscanthus n'est pas maintenable dans le cas de coupes répétitives avant le mois d'octobre. Les expériences étudiées montrent en effet que **le meilleur rendement méthanogène de la culture est atteint lorsque les coupes sont réalisées en octobre**. Ce rendement élevé en fait une bonne candidate pour la méthanisation et est alors comparable à celui du maïs qui est généralement utilisé en culture dédiée. Les coupes successives à l'automne ne semblent pas épuiser la culture, à condition d'apporter une fertilisation azotée qui compense les exports dus à la coupe. **Une fertilisation entre 80 et 130 UN/ha/an serait suffisante** pour maintenir la productivité du miscanthus. En outre, l'apport de fertilisant **sous forme de digestat** permettrait de compenser au mieux l'export des différents éléments minéraux. Enfin, même si l'intérêt d'auto-fonctionnement de la culture de miscanthus en sec est perdu lorsqu'il est coupé en vert, ce mode de gestion de la culture est moins néfaste pour l'environnement que la culture de maïs, notamment sur la qualité de l'eau.

REFERENCES

[1] Boulec, « Développement de cultures énergétiques sur l'impluvium de Vittel-Contrexéville », Mémoire de stage ENSAIA, 2018

[2] Entretien téléphonique avec Hélène CARRERE, directrice de recherches à l'INRA LBE à Narbonne le 12/03/19

[3] Carrère et al, « Développement de nouvelles variétés de biomasse ligno-cellulosique adaptées aux filières de valorisation : potentiel méthanogène de différentes variétés de sorgho et miscanthus et prétraitements », présentation à la Journée Recherche Industrie biogaz-méthanisation du 3-5 février 2015 à Rennes

[4] L. Somer (Valbiom), 2014. Utilisation du miscanthus en vert en biométhanisation. 13 p.

[5] Echanges mails avec Fabien FERCHAUD, décembre 2018

[6] F. Mayer et al., « Assessment of energy crops alternative to maize for biogas production in the Greater Region », Bioresource Technology, 2014

[7] Godin et al., Chemicals characteristics and biofuels potentiels of various plant biomasses : influence of the harvesting date. 2013

[8] F. Ghysel et al, « Valorisation énergétique des fourrages : comparaison de trois filières, enjeux et opportunités », 2010, p.10/15

[9] A. Kiesel, I. Lewandowski, « Miscanthus as biogas substrate – cutting tolerance and potential for anaerobic digestion » in GCB Bioenergy, 2017, p. 154 – 166

[10] AGRA-OST, « ENERBIOM », Assemblée générale du 22/02/2013, p.2

[11] Entretien téléphonique avec Jérôme GENNEN , AGRA-OST, 15/04/19

[12] Echanges avec C. Wathy, Novabiom, 2019

[13] Cadoux et al, « Implications of productivity and nutrient requirements on greenhouse gas balance of annual and perennial bioenergy crops », BIOENERGY, 2013. p. 430

[14] Entretien téléphonique et échanges mails avec Didier STILMANT, CRA W, responsable du projet ENERBIOM 2, 2019

[15] Miscanthus and Switchgrass Production in Central Illinois: Impacts on Hydrology and Inorganic Nitrogen Leaching. McIsaac et al, 2010. Journal of Environmental Quality, Volume 39, September–October, p.1797

[16] Drainage and Nitrate Leaching Assessed During 7 Years Under Perennial and Annual Bioenergy Crops. Ferchaud, Mary. 2016. Bioenerg. Res. (2016) 9:656–670 p.661

Annexe 3

Etude des modalités d'introduction d'une unité de séchage collective des fourrages dans l'impluvium de Vittel-Contrexéville

Document de synthèse bibliographique

01/03/2019

Henri DUCHAUX
Stagiaire / Février 2019
Formation Agricadre / ESA Angers

Sommaire :

I. Contexte et situation p. 3

II. Synthèse des systèmes de séchage de fourrages existants p. 3

A. Présentation générale de la technique du séchage en grange p. 3
B. L'eau dans la matière végétale et les étapes du séchage p. 6
C. Les facteurs contrôlant le séchage p. 6
D. Différentes modalités de présentation du fourrage pour le séchage p. 7

1) Le traitement des fourrages en vrac
2) Le traitement des fourrages en bottes
3) Séchoir de fourrages à bande continue

E. Les sources de chaleur utilisées p. 10

1) Le séchage par récupération de chaleur solaire
2) Le séchage par récupération de chaleur de méthanisation
3) Les chaudières à biomasse

F. Les investissements p. 15
1) L'impact à l'échelle de l'exploitation
2) Le matériel
3) La main d'œuvre
4) Le coût financier

III. Proposition pour l'impluvium de Vittel-Contrexéville **p. 17**

A. Exemples de deux unités de séchage collectives p. 17
B. Visite de l'unité de séchage de luzerne à Lescheroux (01) p. 17
C. Les étapes pour construire le projet p. 19
D. Choix d'un système de séchage p. 19
1) Coût du ramassage du fourrage au champ

E. Besoin en énergie p. 20
F. Choix d'une énergie
1) Coûts observés de différentes énergies

I) Contexte / situation

Le territoire de Vittel-Contrexéville, situé dans l'Ouest vosgien, est producteur d'eaux minérales naturelles (Vittel, Contrex et Hépar) depuis le 19ème siècle. La zone d'infiltration des eaux du territoire qui alimente l'aquifère et donne naissance aux eaux minérales exploitées par Nestlé Waters, appelé impluvium de Vittel-Contrexéville, s'étend sur plus de 100 Km².

L'agriculture du territoire est tournée vers l'élevage, avec une SAU de 6200 Ha, comprenant 70 % de surfaces fourragères principales dont 53 % de prairies permanentes. Un travail de recherches, nommé AGREV (AGRiculture Environnement Vittel) a été mené dans les années 1990 et a permis de définir une politique globale de protection de la ressource en eau vis-à-vis des pollutions agricoles. Cette politique est portée depuis 1992 par AGRIVAIR, filiale de Nestlé Waters. Elle repose sur une maîtrise des flux d'azote des exploitations agricoles de l'impluvium de Vittel-Contrexéville et une non-utilisation de produits phytosanitaires, tout en veillant à maintenir une rentabilité des exploitations.

Le programme de recherche partenarial entre Agrivair, l'INRA et les agriculteurs partenaires a été réenclenché en 2014 pour s'orienter en 2017 vers le développement territorial de l'impluvium (AGREV3DT, développement territorial). L'objectif est d'assurer une protection des ressources sur le long terme en développant le fonctionnement autonome du territoire. Le projet se concentre ainsi sur le renforcement et la création de filières compatibles avec une bonne qualité de l'eau, en se basant sur le maintien et le développement de couverts agricoles protecteurs de l'eau que sont, en premier lieu, les prairies permanentes.

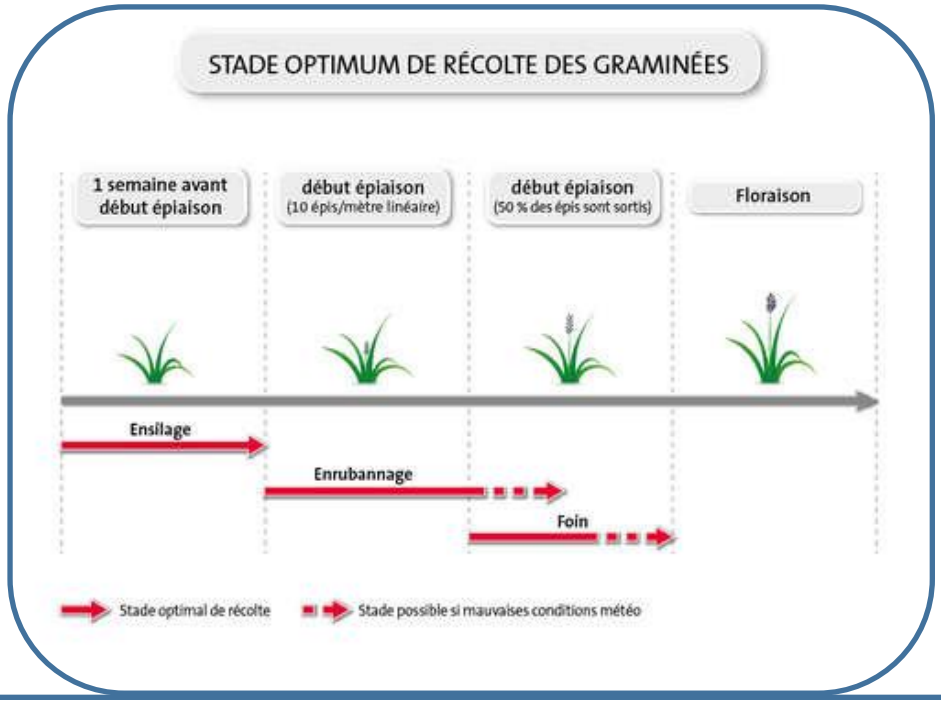
De ce fait, il devient évident que la recherche d'une valorisation maximale des fourrages issus de prairies permanentes constitue une priorité dans l'impluvium. C'est la raison d'être de l'étude d'un projet de mise en place d'un séchoir collectif de fourrages.

II) Synthèse des systèmes de séchage de fourrages existants

A. Présentation générale de la technique du séchage en grange

La constitution de stocks fourragers s'impose comme une condition nécessaire pour la pratique de l'élevage. Ce constat est d'autant plus vrai dans le département des Vosges, dont l'impluvium de Vittel-Contrexéville fait partie, en raison d'un hiver rigoureux marqué par une pluviométrie conséquente, qui oblige les éleveurs à rentrer les animaux en bâtiment. Durant cette période (généralement Novembre à Avril), les animaux, en partie des troupeaux laitiers dans l'impluvium, sont nourris en stabulation. Ces dernières années, l'affouragement au parc durant la période estivale est devenu très régulier : il convient donc de le prendre en compte dans la constitution des stocks de foin et regain.

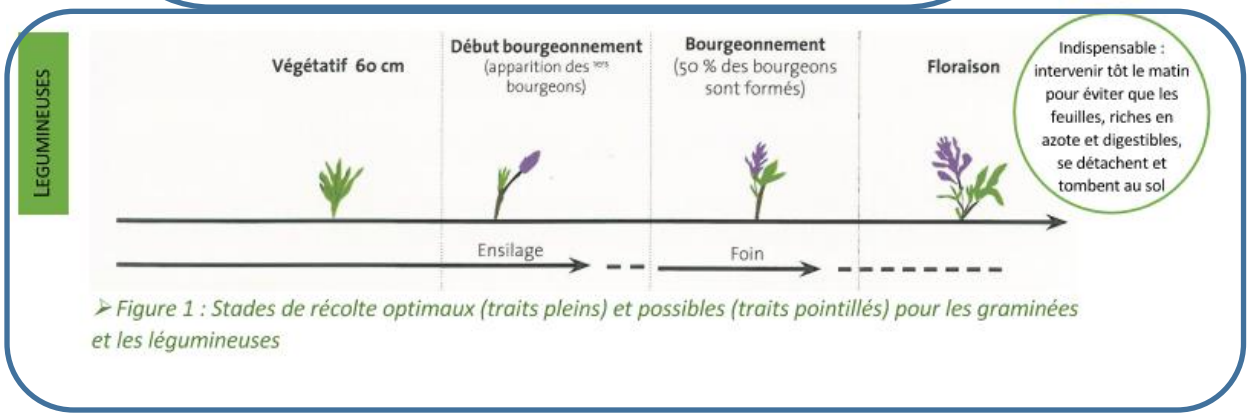
Afin de favoriser les performances zootechniques des animaux et ainsi la qualité des produits, il est nécessaire de leur présenter un fourrage en visant une qualité maximale. Ces derniers sont réalisés pendant la période de fenaison. Mais celle-ci peut être fortement décalée dans le temps suivant le mode de récolte choisi.



Faucher au bon stade

LG semences

Stade optimum de récolte

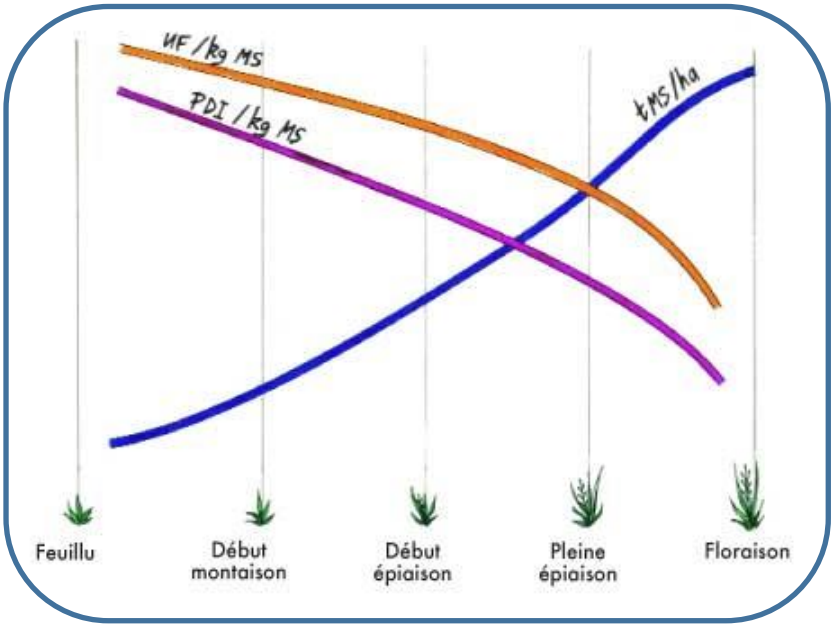


➢ *Figure 1 : Stades de récolte optimaux (traits pleins) et possibles (traits pointillés) pour les graminées et les légumineuses*

Voie fourragère

Web agri

Cniel



La production de fourrage

GNIS Pédagogie

Rendement et qualité alimentaire

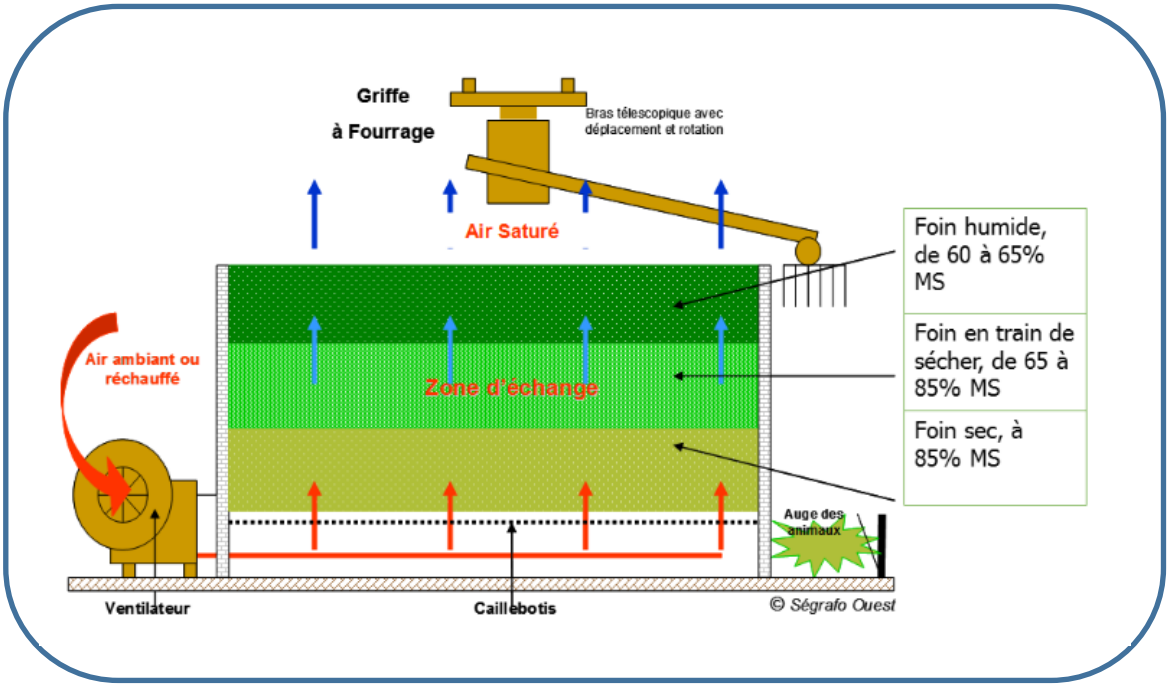
UF => Unité Fourragère (valeur alimentaire en énergie)

PDI => Protéines digestibles dans l'Intestin grêle (valeur alimentaire en protéines)

On remarque que les graminées atteignent une valeur alimentaire maximale entre le stade « début épiaison » et le stade « pleine épiaison » : le choix de fauche doit se faire au croisement des courbes (figure ci-dessus).

Pour les légumineuses, le stade idéal est celui du « début bourgeonnement ». Or, ces stades physiologiques sont atteints généralement pour une somme des températures d'environ 850°C (base 1er février) ce qui correspond à une période trop précoce pour la réalisation de foin (approximativement mi-Mai dans l'impluvium de Vittel-Contrexéville suivant les années ; données INRA Mirecourt). Le problème d'une fenêtre météo idéale suffisante est souvent rencontré.

C'est pour cette raison que la technique du séchage en grange a été mise au point. Elle consiste à rentrer le fourrage en bâtiment, fauché et fané, pour terminer son séchage et le porter au stade de foin. Le fourrage peut alors être ramassé au champ à un taux de matière sèche compris entre 45 et 65 % pour du vrac afin de porter ce taux à 85 à 90 % lors de la phase de séchage en bâtiment. Pour atteindre l'objectif d'environ 60 % de matière sèche suite à la fauche, il faut prévoir généralement 24 à 48 heures, en fonction de la productivité de la praire et de la météo (le vent et les températures hautes favorisant le séchage). Ensuite, la durée du séchage en bâtiment varie généralement entre 24 et 48 heures : il est important que cette phase n'excède pas 72 heures pour atteindre les 85% de MS et ainsi assurer l'absence de développement de moisissures.



http://www.segrafo.com

Cette technique permet donc de réaliser du foin à une période de l'année où cela se révèle très aléatoire suivant les années (fin de printemps et début d'automne). On parvient alors à limiter l'impact de la météo sur la récolte des fourrages et de ce fait de favoriser le stade physiologique dans le choix de date de fauche. En prélevant la plante au moment où sa valeur alimentaire atteint son apogée, on parvient à améliorer la qualité du fourrage.

Dans de nombreux cas de projets de séchage en grange, l'objectif est d'augmenter l'autonomie des exploitations par la qualité des fourrages et par conséquent réduire la distribution de concentrés aux animaux. Pourtant, certains utilisateurs favorisent ce procédé même lorsque la météo permettrait de réaliser le foin en extérieur : en effet, on parvient encore à obtenir une qualité supérieure dans ce cas. Le ramassage du fourrage à un taux d'humidité d'environ 60 % permet en outre de conserver une part importante des feuilles, même de très petite taille, ce qui n'est pas le cas pour du foin réalisé en champ à un taux de 85 %. Etant donné que ces feuilles contiennent une part importante des protéines de la plante (chez les graminées comme les légumineuses), leur conservation permet d'augmenter la valeur azotée du fourrage et donc l'autonomie protéique des exploitations. Ainsi, le séchage en grange permet d'allonger la période de fauche pour le foin et en parallèle, favorise une qualité maximale du fourrage.

B. L’eau dans la matière végétale et les étapes du séchage

L'eau dans la matière végétale se trouve sous 3 formes : l'eau libre, l'eau liée et l'eau de constitution. Seules les 2 premières peuvent être évaporées. L'eau libre s'évapore facilement, elle remplit l'intérieur des cellules tandis que l'eau liée est fixée aux parois cellulaires. Le séchage se déroule en trois phases. Ces trois phases sont les mêmes pour les céréales, le fourrage et le bois.

Phase	Origine de l'eau	Vitesse d'évaporation	Température de la matière	Besoin en énergie
Phase 1			Montée en température de la matière (étape rapide)	
Phase 2	Évaporation de l'eau libre	Rapide	Température relativement constante	Faible
Phase 3	Évaporation de l'eau liée	Lente	Élévation de la température	Élevé

https://bourgogne-franche-comte.ademe.fr/sites/default/files/etude-sechage-metha-2015.pdf , Le séchage de produits végétaux pour valoriser la chaleur d'une installation de méthanisation, Rapport final, Mars 2015, ADEME Bourgogne

La phase 3 est la plus lente et la plus énergivore. Elle débute autour de 30 % d'humidité sur anhydre (soit 0,23 % d'humidité sur matière brute). D'un point de vue économique, il est donc important de :

- bien définir le taux d'humidité objectif, celui correspondant au débouché visé
- suivre la fin du séchage pour limiter les consommations excessives d'énergie. Un séchage excessif conduit à une augmentation des consommations d'énergie, une immobilisation plus longue du séchoir d'où un coût de revient moindre, voire une dégradation du produit (graines).

C. Les facteurs contrôlant le séchage

Lors du séchage, on utilise la capacité de l'air à absorber une certaine quantité d'eau. Cette capacité d'absorption dépend de plusieurs facteurs sur lesquels l'exploitant peut jouer.
Les caractéristiques de l'air ambiant (son taux d'humidité et sa température initiale) impactent les caractéristiques de l'air de séchage. Ainsi, l'efficacité du séchage varie au cours d'une journée et au cours de l'année.

Facteurs	Action de l'exploitant	Effet
La température de l'air de séchage	Chauffage de l'air en entrée du séchoir	Plus la température est élevée plus la capacité d'absorption de l'eau par l'air est importante. Par exemple, à 10°C, l'air peut contenir au maximum 17,2g d'eau par m3 alors qu'à 30°C il peut contenir 30,5g d'eau par m³.
Taux d'humidité de l'air	Mise en place éventuel d'un déshumidificateur	Plus le taux d'humidité de l'air est faible plus la capacité d'absorption de l'eau par l'air est importante.
Le renouvellement de l'air	Débit d'air géré par les ventilateurs	Plus l'air est renouvelé, plus le taux d'humidité est maintenu bas et meilleur est la capacité d'absorption de l'air

https://bourgogne-franche-comte.ademe.fr/sites/default/files/etude-sechage-metha-2015.pdf , Le séchage de produits végétaux pour valoriser la chaleur d'une installation de méthanisation, Rapport final, Mars 2015, ADEME Bourgogne

D. Différentes modalités de présentation du fourrage pour le séchage

Initialement destiné au traitement des fourrages en vrac, le séchage en grange à évolué avec l'arrivée des presses à roundballers. De ce fait, ces deux techniques sont aujourd'hui envisageables lors de l'élaboration d'un projet.

1) Le traitement des fourrages en vrac

Plus ancienne des deux technique, la méthode de séchage des fourrages en vrac nécessite un matériel de récolte adapté à des volumes conséquents du fait de la non-compression des fourrages mais également des dimensions importantes pour les cellules de séchage. On peut retenir l'exemple d'une unité de séchage dans l'Ain : 12 000 m3 de cellules pour 170 Ha de luzerne engagés soit 1500 tonnes de fourrage séchées (→ 8 m3 de cellule/ tonne de fourrage).

En ce qui concerne le matériel de ramassage du fourrage au champ, il existe une solution, l'auto-chargeuse. Celle-ci récolte le fourrage au sol lorsqu'il est en andain. (voir photo ci-dessous). Le dimensionnement de la machine est à évaluer en fonction des volumes à traiter mais il faut également prendre en compte la notion de logistique. Plus les distances entre les parcelles à récolter et l'unité de séchage sont longues, plus l'autochargeuse doit être volumineuse pour réduire le nombre de trajets. En parallèle, il faut veiller à ne pas conduire de charges trop importantes sur les prairies pour la préservation des sols : les constructeurs ont pris la mesure du problème en équipant les outils de pneus à basse pression.

Généralement, ces cellules de séchage sont conçues en bois, comme on peut le voir sur la photo ci-dessus.

Avantages	Inconvénients
-séchage rapide et homogène du fourrage assurant une qualité optimale	-déplacement de volumes plus importants qu'en bottes → logistique plus complexe - Nécessite une organisation précise pour une redistribution individualisée des fourrages

2) Le traitement des fourrages en bottes

Avec l'arrivée des premières presses à balles rondes, la technique de séchage en grange a évolué. De nouveaux dispositifs (tels que celui visible sur la photo ci-dessous) ont été conçus, permettant de sécher des balles rondes ou carrées pressées à un taux d'humidité légèrement supérieur que pour le vrac. De la même manière, le temps de séchage est généralement compris entre 24 et 48 heures, et ne doit pas excéder 72 heures. Cette technique présente l'avantage de minimiser les volumes à transporter et offre une grande liberté de déplacement des fourrages pour la gestion de l'avancement du séchage : il suffit en effet déplacer des roundballers. Par contre, ces dispositifs correspondent généralement plutôt à des petites unités de séchage du fait qu'elles nécessitent de plus importants volumes d'air qu'avec la méthode de séchage en vrac. De plus, l'homogénéité du séchage est plus difficile à obtenir, notamment lorsque le pressage des bottes n'est pas régulier, à la fois au sein d'une botte ou alors entre différentes presses.

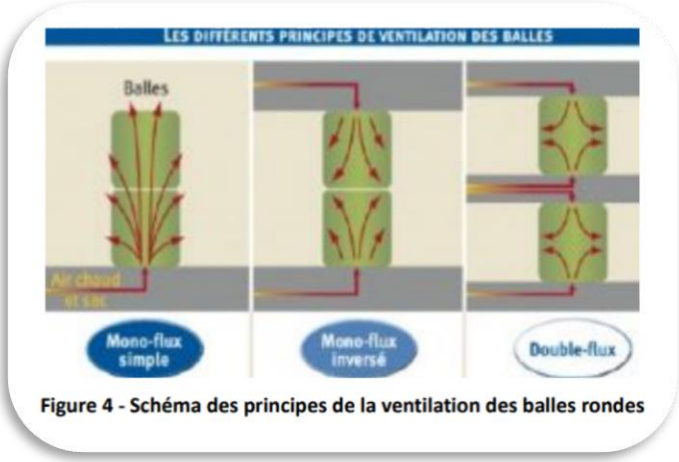


Figure 4 - Schéma des principes de la ventilation des balles rondes

http://grenergies.com/entreprise/wp-content/uploads/2015/11/s%C3%A9chage-en-balles-rondes-fixe.jpg

Principaux avantages et inconvénients du séchage en botte	
Principaux avantages de la technique	**Principaux inconvénients de la technique**
• Production d'un fourrage de meilleure qualité qu'un foin séché au sol. • Souplesse par rapport aux conditions météo. • Pas de modification du matériel de récolte. • Pas de construction de bâtiment spécifique. • Solution possible pour les exploitations aux parcelles de fauche très éloignées.	• Pressage délicat des bottes. • Manutention importante. • Besoin d'un contrôle régulier de l'état des bottes une fois stockées. • Production limitée par la capacité du séchoir. • Utilisation d'énergie fossile dans la majorité des cas et coût de fonctionnement élevé.

Limites :

- *« Celles-ci (les bottes) doivent être régulières et de densité homogène afin que le séchage se fasse au mieux. Ce système implique un andain régulier, un round-baller bien rempli et un chauffeur averti »* https://abiodoc.docressources.fr/doc_num.php?explnum_id=1905, Le séchage des fourrages à la ferme, visite de deux systèmes, Ludivine MIGNOT (ITAB) et Cédric MARCHAND, GAB Ile de France, mai/juin 2002
- Pour la luzerne, il faut atteindre un taux de MS d'au moins 65% pour éviter que les bottes se tassent du fait du poids, ce qui pourrait ralentir le séchage

Tableau 3 – Comparatif des consommations d'énergie entre le séchage des fourrages en vrac et en balles rondes

	Vrac	Balles rondes
Récolte/transport	Autochargeuse	Pressage + chargement remorques
Mise en séchage	Électricité pour la griffe Une seule manutention (stockage direct)	Chargeur sur tracteur pour installation sur séchoir et pour sortie du séchoir et mise en stockage
Séchage	Électricité : <100 kWh /tMS Combustible : faible ou 0 en solaire Coût : 5 à 7 € / tMS	Électricité : 100 à 150 kWh /tMS Combustible : 200 à 400 kWh /tMS Coût : 30 à 50 € /tMS
Distribution aux animaux	Électricité pour la griffe en général (1/4 h /jour)	Fioul pour tracteur
Globalement	Faible	Élevé

Le tableau ci-dessus est présenté à titre indicatif, les données correspondent à un séchage en grange, directement sur la ferme, et non pas à une unité collective.

3) Séchoir de fourrages à bande continue

Ce système de séchage est très peu mentionné dans la bibliographie concernant les différents types de séchoirs de fourrages. Cependant, le conseiller technique en bâtiments de la chambre d'agricultures de l'Ain m'a livré ses impressions à propos de ce système suite à une visite d'une installation à proximité de Laval (53).

Le principe consiste à déposer le fourrage de manière continue sur un tapis qui avance lentement dans une chambre chauffée où l'air est ventilé. A l'entrée dans cette chambre, le fourrage a une humidité d'environ 30 à 40% et en ressort à 85-90% de matière sèche. Lorsque la matière est apportée à une humidité constante, le tapis peut avancer à une vitesse constante. Mais lorsque l'humidité des fourrages apportés est irrégulière, cela ralentit tout le processus car le tapis adapte sa vitesse d'avancement au fourrage le plus humide afin d'en assurer un séchage suffisant. L'inconvénient est que pendant ce temps, le fourrage plus sec situé dans la chambre de séchage continue de sécher à un rythme insuffisant, et il y passe de ce fait plus de temps ce qui pourrait diminuer sa valeur alimentaire.

Pour l'exemple de l'unité de séchage près de Laval, ce constat de réduction de la vitesse a diminué de moitié les capacités de séchage par rapport aux prévisions (1500 tonnes par rapport aux 3000 tonnes prévues).

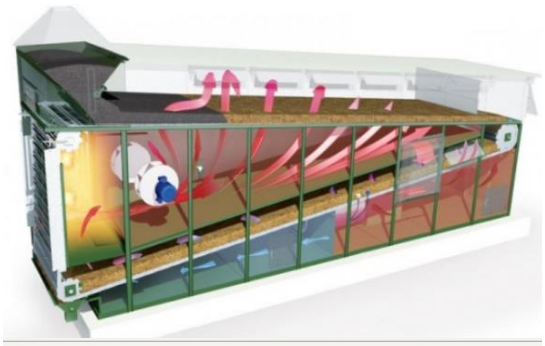
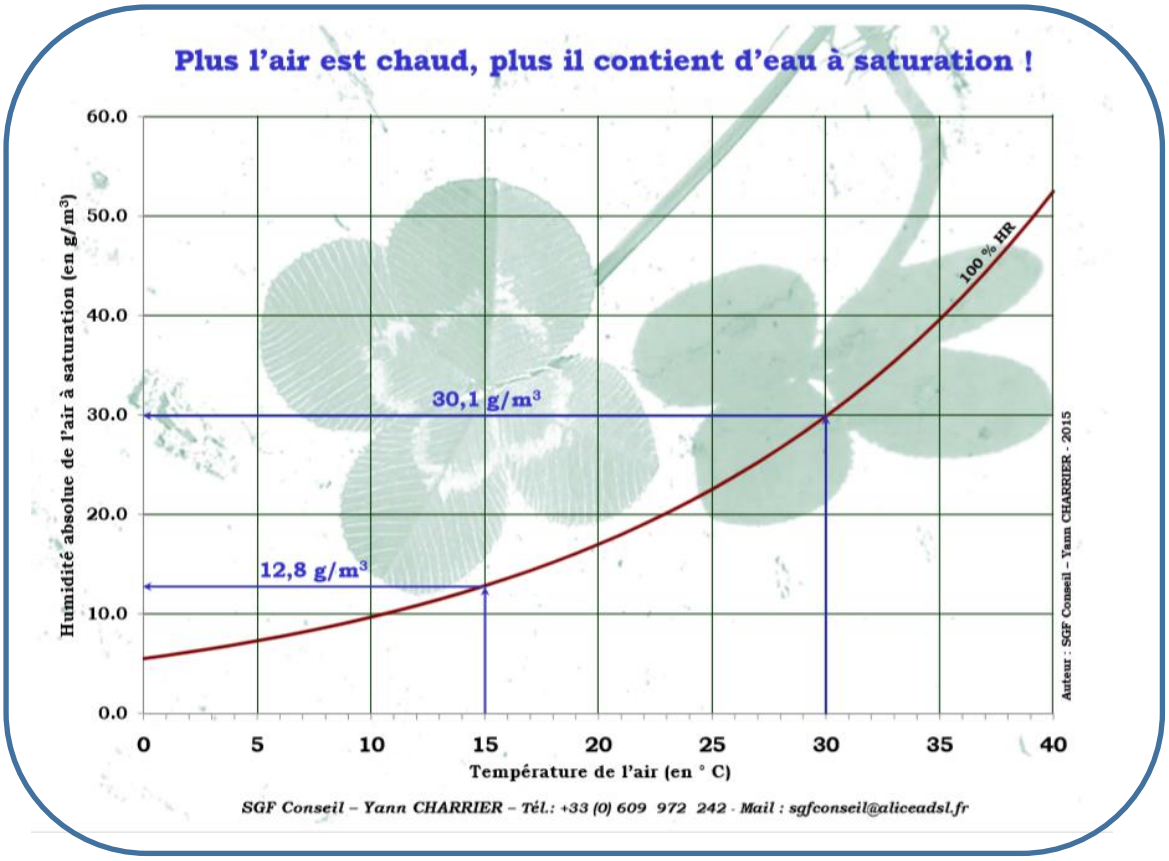


Schéma de principe du séchoir-convoyeur Alvan Blanch

E. Les sources de chaleur utilisées

Pour maximiser la qualité du séchage, c'est-à-dire réduire la durée à moins de 48 heures, il est intéressant d'utilisé de l'air réchauffé, car celui-ci atteint sa saturation en eau à un taux d'humidité plus élevé que pour de l'air ambiant.



Rappel : L'**humidité relative de l'air** correspond à la quantité de vapeur d'eau dans l'**air** par rapport à la capacité maximale que ce dernier peut en contenir. L'**humidité relative de l'air** s'exprime en pourcentage (%) et dépend de la température et de la pression.

On remarque d'après ce graphique présentant l'humidité absolue de l'air à saturation en fonction de la température de l'air qu'à 15°C, la saturation est atteinte à 12.8 g/m3 alors qu'à 30°C, cette valeur est de 30.1 g/m3. Ce constat nous amène à penser qu'il serait intéressant de pulser de l'air très chaud dans le fourrage pour réduire le séchage, mais trois limites semblent montrer que la température idéale se situe aux alentours de 35°C :

- Une chaleur trop élevée sur le fourrage pourrait accélérer la diminution de la valeur alimentaire.
- Le risque d'incendie ne peut être qu'augmenter avec de l'air très chaud.
- Produire un air très chaud pourrait engendrer des coûts qui limiteraient la rentabilité de l'installation

Notion de déshumidification :

De plus, il est intéressant d'utiliser un air dont l'humidité relative est la plus faible possible afin qu'il se charge au maximum en humidité dans le fourrage. Pour y parvenir, on peut utiliser un déshumidificateur : celui-ci permet de favoriser ce type de séchage dans les régions à climat océanique mais également de rallonger la période de fenaison pendant les périodes plus humides (automne ou printemps). La déshumidification va donc permettre de maximiser le rendement de séchage par unité de volume d'air pulsé dans les gaines.

https://agrimanu.fr/heutrochnung/

Témoignage d'un spécialiste du séchage en grange : Lionel DALMONT, Bories Equipement (81)

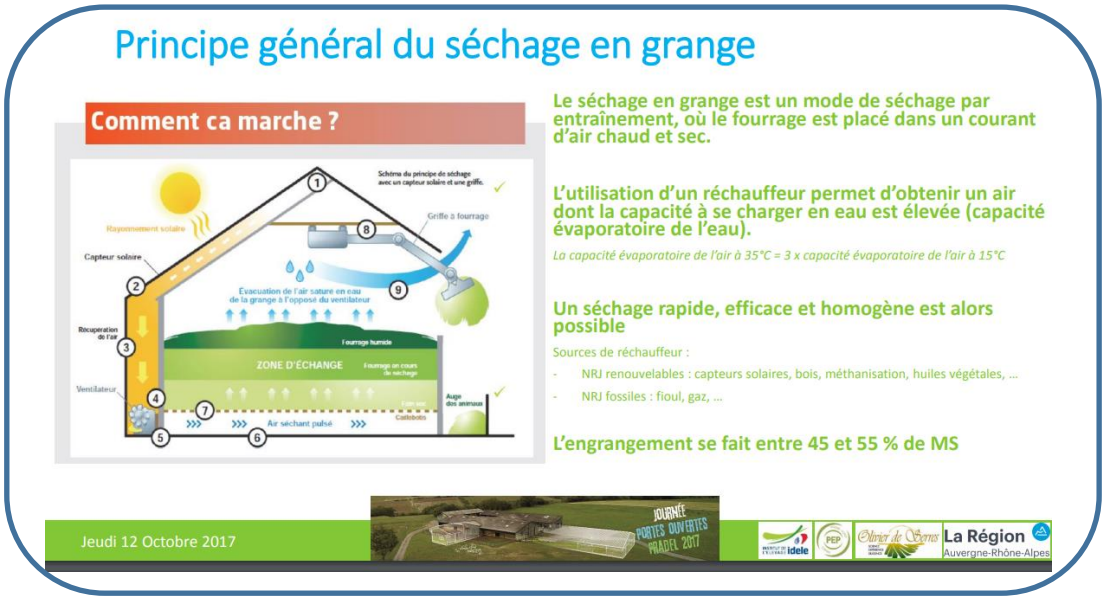
Une vingtaine d'installations de séchage en grange en France sont équipées de déshumidificateurs. Pouvez-vous nous en expliquer le fonctionnement?

Lionel Dalmont : « *C'est un gros échangeur, placé entre l'entrée d'air extérieur et le ventilateur. Le principe est simple : l'air chaud et humide traverse une batterie froide (12°C), qui lui permet d'atteindre le point de rosé et donc d'extraire l'humidité de l'air. Comme tout groupe de froid, la compression du gaz produit de la chaleur. Celle-ci est injectée à la deuxième batterie d'échange où l'air déshumidifié est réchauffé. Cela permet donc de sécher le foin même s'il pleut. Le rendement du déshumidificateur est d'autant meilleur que l'air qui y entre est humide et chaud. D'où l'intérêt de travailler avec le capteur solaire. Aujourd'hui, les installations les plus performantes sont en fait en « circuit fermé» lorsque l'air capté dans le récupérateur sous le toit est à la même température que l'air qui sort de la cellule de foin. L'air humide qui sort du tas de foin est récupéré et passe dans le déshumidificateur pour y être déshumidifié puis réchauffé. Ce recyclage de l'air permet d'envoyer de l'air toujours en dessous de 45% d'humidité. Pour une bonne rentabilité économique, il faut rentrer du foin pré fané avec un taux d'humidité entre 40 et 45%, sur une hauteur d'environ 2,5 mètres par cellule. Plus on rentre le foin humide, moins il faut en mettre épais sur les caillebotis. On travaille avec un seul ventilateur par installation et ceci jusqu'à 2000 tonnes de fourrage. Le séchage se fait sur deux cellules en alternance 1h / 1h. Dans ces installations, tout le pilotage est entièrement automatisé. C'est un peu comme un robot de traite en vaches laitières. Il suffit de renseigner la hauteur d'herbe rentrée et vous pouvez suivre en temps réel l'humidité du foin et le temps de séchage qu'il reste. Par contre, comme pour les robots de traite, il faut un peu de surveillance.* ***Ce type d'installation se calibre en fonction du tonnage du parcellaire, de leur distance du bâtiment ainsi que la main d'œuvre disponible pour les chantiers. Il est donc très compliqué d'avancer des prix****. Une chose est sûre, c'est que ce système garantit de pouvoir engranger du fourrage sur des fenêtres météo très courtes, entre 30 et 48 heures après la fauche. Ce genre d'installations commence tout juste à apparaitre dans les régions où le climat est vraiment difficile... Mais pour moi, l'avenir du séchage est là ! »*

http://paysan-tarnais.reussir.fr/actualites/des-equipements-pour-plus-de-performance-au-sechage-des-fourrages-en-grange:QKRGL9FT.html , Le paysan Tarnais, 21 octobre 2015, S. LENOBLE.

En effet, comme le précise L. DALMONT dans cet entretien, il est difficile d'avancer des coûts pour une installation quant au déshumidificateur car de nombreuses variables interviennent : tonnage à sécher, surface des cellules, dimensionnement du déshumidificateur,…Pour évaluer précisément le coût, il est conseillé de faire appel à un spécialiste qui saura évaluer les besoins de l'installation.

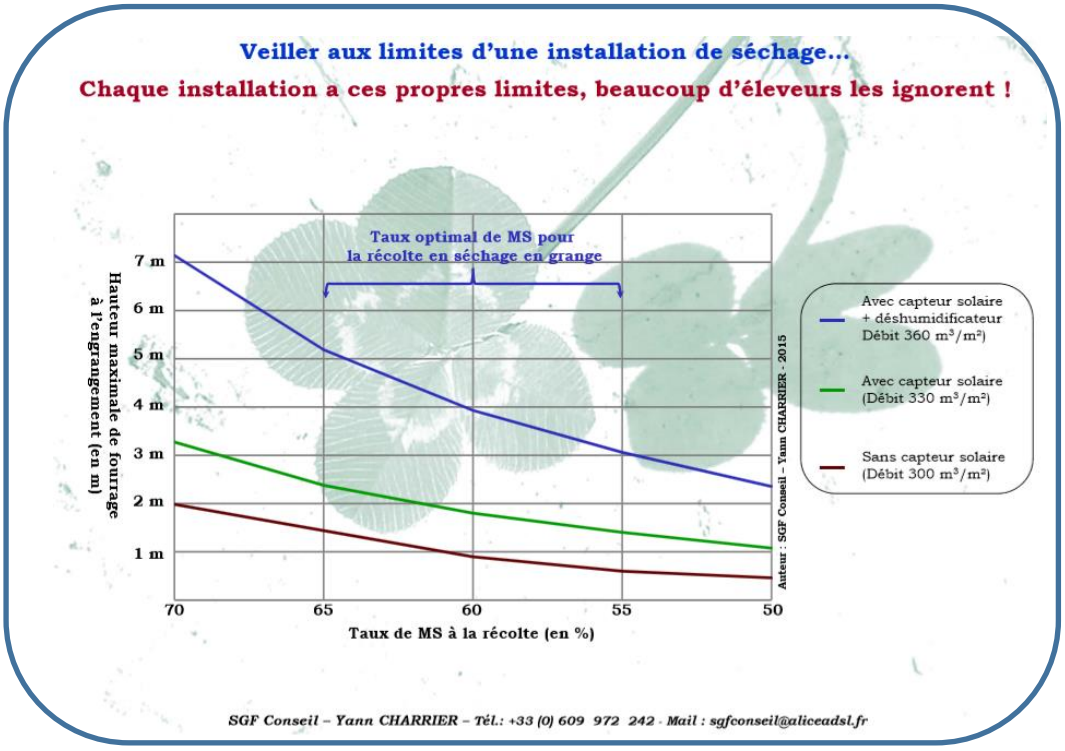
1) <u>Le séchage par récupération de chaleur solaire</u>



Jérémie JOST, Institut de l'élevage / REDCAP, Séchage en grange en caprin : Etat des lieux des possibilités en élevage de chèvres !

Bien que prévus pour produire essentiellement de l'électricité, les panneaux solaires produisent également en parallèle de la chaleur par échauffement des cellules photovoltaïques. Il est possible de récupérer cette chaleur en installant une sous-toiture avec une membrane isolante (panneaux OSB par exemple) : la chaleur se concentre entre les parois de cette double toiture et peut ensuite être pompée par les ventilateurs du séchage. Ensuite, les ventilateurs propulsent l'air dans les gaines sous les cellules de séchage. L'air chargé en humidité finit par être évacué par la toiture afin qu'il ne soit pas réutilisé. Ce système de réchauffage de l'air pose quelques limites :

- Il faut veiller à la température de l'air pompé : si celui-ci monte au-delà d'une valeur arbitraire, il faut pomper de l'air en extérieur pour refroidir.
- La production de chaleur est totalement corrélée à la météo : en cas de temps maussade ou pluvieux, il n'y a pas de production de chaleur, et il faut une solution d'appoint (ex : chaudière à biomasse)



Ce graphique illustre l'intérêt d'utiliser la chaleur issue de panneaux photovoltaïques et même de coupler cette technique à un déshumidificateur car on augmente significativement les quantités à traiter. Pour un taux d'humidité de 60 % à l'engrangement, on double la quantité de fourrage traité avec utilisation de panneaux solaires (2m de fourrage VS 1m), et on quadruple (4m de fourrage) lorsque l'on ajoute un déshumidificateur.

Limite du système : source de chaleur irrégulière au cours d'une saison de fenaison

2) Le séchage par récupération de chaleur de méthanisation

http://naskeo.com/references-construction/references-voie-liquide/sas-canac-paulhe/

L'installation d'une unité de méthanisation en milieu agricole a généralement deux finalités possibles : soit la production de gaz, soit la production d'électricité. Dans le cas de la production d'électricité, la génératrice produit également de la chaleur qui peut être réutilisée. D'ailleurs, certains projets prennent en compte la production de chaleur comme un produit à part entière. Cette chaleur peut alors offrir la possibilité de concevoir un séchoir à fourrages (souvent du fourrage en balles car c'est le conditionnement le plus commun dans les exploitations possédant une méthanisation). De la même manière que pour l'unité

photovoltaïque, la chaleur est pompée par les ventilateurs dans l'enceinte de la génératrice puis injectée dans le circuit de séchage.

Cette source de chaleur a l'avantage d'être une source quasi-constante au cours du temps (quotidiennement et annuellement) ce qui permet de faire des prévisions de séchage relativement certaines. Par contre, il faut noter que celle-ci nécessite un suivi et un travail important en amont (gestion de la méthanisation) c'est pourquoi il ne faut pas l'envisager uniquement dans l'optique d'un séchoir à fourrage (contrainte de travail élevée, considérations environnementales).

Limite du système : ne peut être couplé à un séchoir de fourrages que s'il y a un projet de production d'électricité en parallèle. Une méthanisation ne peut pas être installée dans l'unique but d'un séchoir de fourrages

Avantage : source de chaleur constante dans le temps

3) Les chaudières à biomasse

Vouées directement à la production de chaleur, les chaudières à biomasse peuvent être installées, dans le cas d'unités de séchage de foin en grange, soit en solution d'appoint (exemple des panneaux solaires), soit en solution principale lorsque d'autres sources d'énergie renouvelable n'ont pas été possibles. Elles utilisent des ressources comme le bois en plaquettes, le miscanthus ou encore la paille de céréales.

La production d'énergie par chaudière à biomasse présente généralement un coût de revient plus élevé que les autres sources renouvelables.

Limite du système : coût du séchage soumis aux variations du coût des énergies

F. Les investissements

Lors de l'élaboration d'un projet d'unité de séchage de fourrage en grange, il est important de ne pas occulter des axes qui ne semblent pas primaires.

1) L'impact à l'échelle de l'exploitation

Afin de rendre l'unité de séchage la plus efficace possible au niveau d'une exploitation, c'est-à-dire en tirer un maximum de bénéfice, il faut souvent bien réfléchir aux espèces à implanter. En adaptant les espèces fourragères de la sole à la fois à son troupeau et à l'unité de séchage, on peut créer un décalage dans les dates optimales de fauche (précoces et tardives) pour passer un maximum de fourrages par le séchage en grange. Il est important de mettre en place un planning prévisionnel de fauche.

Pour les unités collectives, ce constat est d'autant plus vrai du fait qu'il faut gérer un approvisionnement issu de plusieurs exploitations. Dans ce cas, il faut apporter un appui agronomique aux exploitations pour le choix des espèces et la mise en place du planning prévisionnel de fauche.

« Une commission culture établit un planning de fauche et un responsable météo donne le signal pour lancer la fauche. Le cahier des charges précise également l'itinéraire technique à respecter pour la culture et la récolte de la luzerne (jusqu'au choix des variétés), afin d'optimiser les temps de séchage. Le groupe a suivi une formation pour se l'approprier et harmoniser les pratiques »

Réussir Lait - n° 272 - Septembre 2013

Etude de l'ADEME sur un panel d'unités de séchage de fourrages :

Ces graphiques mettent en évidence la diversité des espèces fourragères qu'il est possible de sécher en grange ou en bottes, que ce soit dans l'Ouest (graphique 1) ou bien dans le Massif Central (graphique 2).

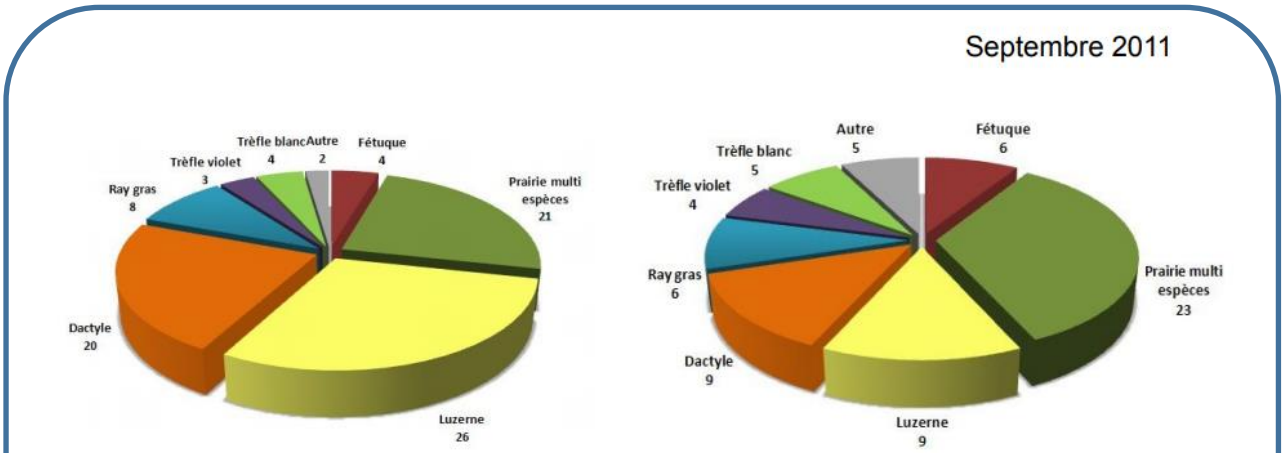


Figure 13 - Répartition des espèces fourragères séchées dans l'Ouest (gauche) et dans le Massif Central (droite)

https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/82324_ademe_sechage_fourrages.pdf

2) Le matériel

En ce qui concerne le matériel nécessaire, le choix du mode de présentation des fourrages (vrac ou bottes) a une importance fondamentale :

- Pour un système en séchage vrac, il faudra prévoir un parc matériel de fenaison commun mais sans presse, qui est remplacée par l'auto chargeuse. Le bâtiment de séchage est composé de cellules ainsi qu'une éventuelle presse de reconditionnement.

- Pour un séchage en bottes, le parc matériel de fenaison est celui couramment utilisé. Ensuite, le bâtiment de séchage est composé de solides gaines supportant le poids des roundballers, reliées aux ventilateurs, et où l'air réchauffé circule.

3) La main d'œuvre

A l'échelle d'une exploitation individuelle, la gestion de la main d'œuvre n'est pas facile à évaluer. Par contre, dans la bibliographie, on observe que les unités de séchage de fourrage collectives ont recours à une embauche pour assurer une gestion précise des approvisionnements. L'organisation des différentes tâches doit être bien précisée dans un cahier des charges.

« *Le fonctionnement d'une unité collective de cette importance demande une solide organisation. La fauche et le fanage sont de la responsabilité de chaque agriculteur. En revanche, la récolte est réalisée par la cuma avec deux autochargeuses. La traction est assurée par une entreprise de travaux agricoles. La cuma emploie un salarié pour gérer toutes les tâches liées au séchage et au conditionnement du foin* »

Réussir Lait - n° 272 - Septembre 2013

4) Le coût financier

La mise en place d'un séchoir à foin constitue un investissement important en bâtiment (cellules de séchage, sous-toiture…) et en matériel (griffe, autochargeuse, ventilateurs…). Les coûts d'investissement peuvent varier de 50000€ à plus de 300000€ selon la capacité requise, les bâtiments existants ainsi que la part d'autoconstruction. Cependant les frais de fonctionnement (ventilateur et griffe) sont relativement faibles (de 4 à 6 €/t MS de foin). En général, l'amortissement est réalisé sur une période de 10 à 15 ans.

III) Proposition pour l'impluvium de Vittel-Contrexéville

A. Exemples de deux unités de séchage collectives

Afin de construire une proposition de séchoir collectif de fourrages pour l'impluvium de Vittel-Contrexéville, il a été judicieux de s'intéresser à l'ensemble des systèmes existants pour dégager leurs avantages et inconvénients respectifs. Rapidement, il a été démontré que des différences remarquables existaient entre les unités individuelles et celles collectives, que ce soit au niveau de la gestion juridique, matérielle et même humaine. Ainsi, les recherches ont été particulièrement axées sur des unités collectives dont les différentes caractéristiques (fourrages, rayon d'action, nombre d'adhérents, finalités,..) sont proches de celles rencontrées sur l'impluvium de Vittel-Contrexéville. En voici un tableau récapitulatif.

CUMA Luzerne de Bresse, Lescheroux (01)	**Usine de déshumidification, Montours (35)**
- Suivi et conception : Chambre d'Agricultures de l'Ain - dimensionnement : 3550 m², 12 cellules de séchage de 1000 m3 et 147 m² - 170 Ha engagés (luzerne et « mélanges suisses ») - CUMA de 13 exploitations - 1500 tonnes séchées par an - séchage en vrac puis reconditionnement en bottes - coût de production (semis, récolte, séchage) : 204 € / tonne de matière sèche - coût de séchage : 167 € /tonne de matière sèche - 1,9 M€ d'investissement - énergies : solaire, méthanisation et biomasse - rayon géographique de 10 Km - planification des chantiers de récolte	- création d'une association : SEGRAFO - usine gérée par une coopérative - uniquement des éleveurs de bovins laitiers - investissement de 480 €/Ha engagé annuellement dans le séchage - totalité de la chaîne de récolte gérée et réalisée par la coopérative - séchage en vrac puis reconditionnement en bottes - planning de fauche - 1700 tonnes de fourrage séchées /an - unique énergie : électricité - coût de séchage : 168 € / tonne de matière sèche - récupération individualisée des fourrages

B. Visite de l'unité de séchage de luzerne à Lescheroux (01)

Tanguy MOREL, conseiller bâtiment à la chambre d'Agricultures de l'Ain : ses remarques par téléphone

- Choix du système de séchage en vrac par rapport au séchage de bottes

1) L'une des principales attentes des adhérents était de **ne pas passer avec des charges trop importantes sur le sol pour ne pas impacter la repousse suivante et préserver la vie microbienne du sol**. Cet objectif a plutôt orienté le choix vers un séchage vrac en raison des lourdes charges qu'impose le système bottes sur les sols lors du passage des plateaux chargés de roundballers. De plus, les récentes auto chargeuses sont conçues pour ne pas trop tasser le sol, notamment grâce aux pneus à basse pression.

2) **Dans un souci de limitation de la consommation électrique, la CUMA Luzerne de Bresse a voulu s'orienter vers le système le moins énergivore : il s'agit du séchage en vrac.** Pour une même quantité de fourrage séché, le système bottes affiche une consommation énergétique supérieure. Aucune donnée chiffrée n'a été annoncée mais les explications sont les suivantes : dans un système vrac, il faut raisonner un séchage des fourrages sur trois jours : le premier jour, on dépose une couche de 1 à 3 m sur les caillebottis et on vise à retirer toute l'eau libre de cette couche.

Le second jour, on dépose une seconde couche, d'un mètre environ, où l'objectif sera de retirer également l'eau libre. Mais avant d'atteindre cette couche, l'air aura traversé la première couche en retirant progressivement l'eau liée des plantes. Le troisième jour, on ajoute encore un mètre de fourrage. La première couche sera déjà sèche (plus de 85% de MS), dans la seconde, l'air retiendra l'eau liée et dans la troisième, l'air emportera l'eau libre. Le dernier jour, on sèche définitivement la troisième couche.
Il y a donc par ce système une valorisation maximale de l'air chauffé propulsé dans le fourrage.
En système bottes, il n'existe pas cette valorisation de l'air, car une fois l'eau libre retirée, il faut continuer à souffler encore plus d'air pour retirer l'eau liée sans qu'elle ait pu se charger en eau libre avant.

3) **Le système de séchage de bottes impose un séchage plus rapide du fourrage** afin d'éviter l'échauffement de la matière. En effet, du fait de la compaction du fourrage dans la botte et du taux d'humidité, l'échauffement peut être plus rapide que dans du vrac. Par conséquent, il faut sécher les bottes dans un délai de moins de 24h ce qui accentue encore la consommation supérieure d'énergie par rapport au vrac.

4) Afin de pouvoir assurer ce séchage plus rapide en bottes, il est préconisé de rentrer le fourrage à un taux d'humidité plus faible que pour le vrac : il faut ainsi atteindre un taux de matière sèche de 60 à 70 % pour les bottes contre 50 à 60 % pour le vrac. **Ce constat oblige de laisser le fourrage au sol quelques heures de plus en système bottes** et peut dégrader la qualité.

5) Le serrage du fourrage à l'intérieur d'une botte n'est généralement pas homogène : le noyau de la botte est plus serré que le pourtour. Ainsi, le séchage n'est pas homogène, le séchage du centre de la botte est plus long. Ceci **peut limiter les gains de qualité du fourrage par séchage** à contrario du séchage vrac où si le déchargement dans les cellules est bien réalisé, le séchage sera homogène et favorise la qualité.

6) Selon Mr MOREL, **le séchage de bottes impose plus de manutention que le séchage de vrac**. Du fait d'un échauffement du fourrage plus rapide en botte, il faut suivre la presse au champ de près avec les remorques afin de placer les bottes au plus vite dans le séchoir. A ce même sujet, le vrac offre plus de liberté car si l'on ne peut pas être en mesure de suivre de près la presse, le fourrage peut rester au sol en andain sans risque d'échauffement et sans perte de qualité car peu de séchage. De plus, le séchage de bottes oblige parfois à retourner la botte dans le séchoir à mi-durée pour la placer sur la seconde face.

7) Lorsque la botte a été séchée, son volume a diminué du fait de la perte d'eau (jusqu'à plus de 200l de volume pour des gros roundballers). Or, le serrage du filet ou des ficelles n'a pas évolué pour autant **ce qui laisse une botte moins compacte et donc moins maniable**. Ceci n'est pas pratique en système collectif car il faut encore réaliser un transport de la botte jusqu'à la ferme.

Compte rendu de la visite de l'unité de séchage de la CUMA Luzerne de Bresse : le 28/02/19

Visite réalisée par Pierre PERTHUIZET, vice-président de la CUMA

- **Explications de l'origine du projet : 2010-2011**

Un éleveur de porcs de la commune de Lescheroux installe une méthanisation sur son exploitation → recherche de valorisation de la chaleur co-produite par la génératrice. Une réunion est organisée en partenariat avec la Chambre d'Agricultures de l'Ain pour informer les agriculteurs intéressés de l'opportunité de réaliser un séchage de fourrages

- ➔ Issue de la première réunion : 8 agriculteurs intéressés sur 30 participants

  Ce groupe décide de poursuivre le projet aux côtés de la chambre d'Agricultures qui s'engage à accompagner les intéressés pour le lancement.

- **Période de construction du projet : 2011-2013**

Nombreuses visites sur des unités déjà existantes, collectives et/ou individuelles : visites d'unités de séchage en vrac (dont la ferme expérimentale de Vital Concept) et en bottes + Accompagnement du projet par Yann CHARRIER , conseiller technique en séchage de fourrages chez SGF conseils.

- ➔ Choix d'une unité de séchage de fourrages en vrac avec reconditionnement en bottes carrées sur place (motivations vers ce choix citées précédemment dans l'entretien avec T. MOREL). 3 agriculteurs se sont greffés au projet portant à 11 le nombre d'adhérents – dimensionnement pour 1200 tonnes de fourrage séchées à l'année
- ➔ Lancement des dossiers administratifs et demandes de subventions
- ➔ Engagement de 11 agriculteurs sur une durée de 17 ans et sur une quantité à annoncer en début de chaque campagne + 450 € / Ha engagé de mise de départ

- **Printemps 2013 :**

Lancement de la première campagne de séchage

- **2013 – 2019 :**

Atteinte progressive d'un « rythme de croisière » : 14 agriculteurs sont finalement partenaires – 1700 tonnes de fourrage séchées à l'année + 1100/1200 tonnes de maïs à l'année

Réduction progressive de la surface de luzerne dédiée au séchage au profit de prairies temporaires (essentiellement à base de trèfles blancs et ray-grass) et de prairies naturelles en moindre mesure. Revente du fourrage à environ 180 €/t.

- **Le fonctionnement technique :**

- ➔ Matériel de la CUMA : deux autochargeuses (dont une équipée pour la réalisation d'ensilage), bâtiment de séchage de 3500 m², 6 ventilateurs de 25cv - 48 000m3 d'air par ventilateur, griffe à fourrage suspendue, presse industrielle pour le reconditionnement du fourrage après séchage, système de chauffage de l'air (sources d'énergie abordées plus loin)

- ➔ Moyens humains : un salarié à temps plein en heures annualisées entre Avril et Octobre

➔ Organisation inter-exploitations : Une commission cultures de 4 à 5 membres se réunit régulièrement (jusqu'à plusieurs fois par semaine) à partir du mois de février pour évaluer les surfaces à faucher dans la campagne, en déduit des volumes prévisionnels à sécher (peuvent rentrer 30 à 40 ha par jour). Etablit un planning de fauche pour gérer les approvisionnements au séchoir lors des fenêtres météo idéales pour la fauche / saison de fauche : d'avril à septembre.

➔ Organisation des chantiers de récolte et séchage : Lancement de la fauche par la commission de culture : l'exploitant gère la fauche, le fanage et l'andainage. A partir de la mise en andain (fourrage à au moins 50 % MS), la Cuma prend en charge le fourrage : ramassage effectué par une entreprise avec les autochargeuses de la CUMA, engrangement puis gestion du séchage et reconditionnement en bottes assurés par le salarié. Reprise du fourrage par l'exploitant agricole.

Engrangement réalisé toujours à plus de 50% de matière sèche voire 60% pour le foin

➔ Coût du séchage (du ramassage par l'autochargeuse jusqu'au reconditionnement en bottes) : 125 € / tonne de matière sèche

➔ Sources de chaleur : - méthanisation
- Chaudière à biomasse : 800 Kw (marque BINDER), chauffe aux plaquettes de bois - consommation de 800 m3 / an (en fonctionnement, consommation d'1 m3 de bois plaquette/h)
- Chaleur solaire récupérée par une double toiture en panneaux OSB

➔ Détail du coût des énergies (compris dans le coût de séchage) :
- électricité (griffe + ventilateur) : 7-8 € / tonne de MS
- chaleur de méthanisation : 2-3 € / tonne de MS
- Chaudière : 7-8 € / tonne de MS - 25€ / m3 de plaquettes.
- Chaleur solaire : pas de coût

➔ Les investissements : Total : 1 921 304 € dont 38% de subventions (730 096 € : aide ADEME, Région et département)
- Bâtiment : 1 216 170 €
- Equipement de séchage : 347 284 € (250 000 € pour la chaufferie)
- Ventilateurs : 39 767 €
- Griffe à foin : 44 062 €
- 2 Auto-chargeuses : 120 000 €
- Presse industrielle : 154 021 €

C. Les étapes pour construire le projet

- Déterminer les avantages et inconvénients des différentes sources d'énergie
- Déterminer les avantages et inconvénients des deux modes de présentation (bottes ou vrac) du fourrage
- Les caractéristiques de la matière à sécher (taux d'humidité entrante, tonnage de matière humide, taux d'humidité objectif) afin d'en déduire les quantités d'eau à évaporer.
- Evaluer les volumes de fourrage produits par les agriculteurs partenaires
- En déduire un volume prévisionnel de fourrage à sécher
- La quantité d'énergie nécessaire pour évacuer une tonne d'eau.
- La quantité d'énergie dont on dispose sur une période de temps donné.

D. Choix d'un système de séchage

Afin de favoriser la qualité du fourrage (il s'agissait de l'attente principale énoncée par Agrivair pour ce projet), il a été jugé que le système de séchage le plus adapté pour atteindre cet objectif est le séchage en vrac. De plus, il a été démontré que ce système semble être le plus adapté à un projet collectif, comme celui de l'impluvium de Vittel-Contrexéville : le rayon de répartition des exploitations, inférieur à 10 km (limite souvent énoncée dans la bibliographie pour la viabilité d'un projet), ne présente pas de limite au traitement des fourrages en vrac.

Pour répondre à ce projet, il est nécessaire de mettre en place certains moyens matériels, dont notamment celui de récolte. Il s'agirait dans ce cas d'une ou plusieurs auto chargeuses. Le tableau ci-dessous présente les tarifs à appliquer selon le barème d'entraide de la chambre d'Agricultures de Meurthe et Moselle (que l'on suppose similaire à celui des Vosges).

Il faut considérer que ces prix peuvent être largement fluctuants en fonction de la distance à parcourir jusqu'au lieu de dépôt et du tonnage de fourrage à l'hectare.

1) Coût du ramassage du fourrage au champ

Auto chargeuses

	Valeur d'achat	Débit de chantier et Puissance de traction	Utilisation annuelle	Charges fixes	Entretien Réparations	Coût outil seul	Coût avec traction + MO + carburant
	€		ha/an	€/ha	€/ha	€/ha	€/ha
Sans couteaux pour le foin 25 m3	18 000 €	0,75 ha/h 120 ch	40	42.30 €	2.20 €	44.50 €	104.00 €
			50	33.80 €		36.00 €	95.00 €
Sans couteaux pour le foin 35 m3	25 000 €	1,25 ha/h 120 ch	65	36.20 €	2.20 €	38.40 €	74.00 €
			80	29.40 €		31.60 €	67.00 €
Avec couteaux pour ensilage 55 m3	77 000 €	1,75 ha/h 170 ch	150	48.30 €	6.50 €	54.80 €	85.00 €
			200	36.20 €		42.70 €	73.00 €
Avec couteaux pour ensilage 70 m3	95 000 €	2 ha/h 190 ch	200	44.70 €	6.50 €	51.20 €	79.00 €
			250	35.70 €		42.20 €	70.00 €

COUTS des OPERATIONS CULTURALES 2018 des MATERIELS AGRICOLES - Région GRAND EST

E. Besoin en énergie

Calculer le besoin en énergie : les étapes

- Déterminer les volumes / tonnages de fourrages à sécher
- Définir un taux d'humidité à l'entrée et un taux d'humidité objectif de sortie
- En déduire un volume d'eau à extraire
- En déduire un besoin de volume d'air à pulser à une température donnée
- Définir la puissance nécessaire des ventilateurs et l'énergie thermique nécessaire pour réchauffer l'air

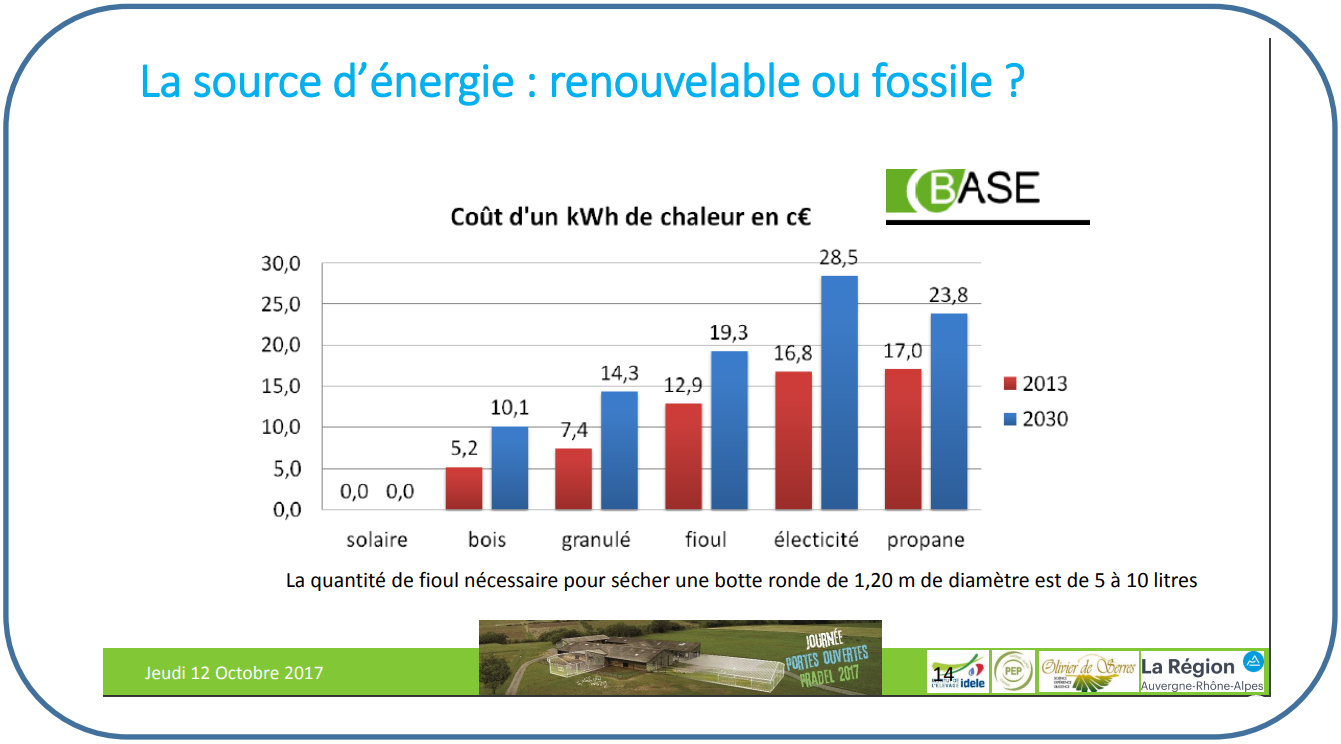
b) Références sur les performances des séchoirs

Une fois que l'on connaît la quantité d'eau à évaporer, il est nécessaire de connaître la performance du séchoir. C'est à dire la quantité d'énergie nécessaire pour évaporer 1 tonne d'eau. De nombreuses références sont disponibles dans la bibliographie (thèses, études, études de cas,...). Voici quelques exemples.

Matières à sécher	Besoin en énergie thermique	Références
Bois	1,5kWh/kg d'eau – feuillus 1kWh/kg d'eau – résineux 1,5 à 2kWh/kg d'eau – plaquette	Critt bois lorraine Critt bois lorraine WEINGARTMANN (1991)
Maïs	1,16 kWh/kg d'eau 1,15 kWh/kg d'eau	Arvalis (séchoir colonne fixe) Agro-biogaz (sur site)
Fourrages	1,16 kWh/kg d'eau	Segrafo
Céréales	1,1 à 1,3 kWh/kg d'eau	Coop de France (2011)

F. Choix d'une énergie

1) Coûts observés de différentes énergies



Jérémie JOST, Institut de l'élevage / REDCAP, Séchage en grange en caprin : Etat des lieux des possibilités en élevage de chèvres !

2.4. DEFINITION ET PRINCIPE GENERAL D'UNE POMPE A CHALEUR

Une pompe à chaleur (PAC) permet de transférer de l'énergie d'un niveau à basse température vers un niveau à température plus élevée. Ce transfert consomme de l'énergie, mais l'énergie totale restituée par la PAC est supérieure à l'énergie fournie au système, ce qui permet donc une économie globale d'énergie primaire, ainsi qu'une diminution des émissions polluantes, à quantité égale d'énergie finale produite. Une PAC (cf. Ill. 3) diminue donc la température du milieu qui fournit l'énergie (source froide) et augmente la température du milieu qui reçoit l'énergie (source chaude). Les deux sources pouvant être valorisées, un dispositif de PAC peut donc assurer simultanément et/ou successivement des besoins de chauffage et/ou climatisation ou rafraîchissement. La chaleur est prélevée au milieu extérieur par un échangeur (évaporateur) dans lequel un fluide frigorigène se vaporise à basse température. Le compresseur (entraîné par un moteur électrique) comprime cette vapeur à haute pression. Par l'échange thermique entre le condenseur et le milieu intérieur (= production de chaleur), la vapeur repasse à l'état liquide. Le détendeur assure le passage du fluide liquide de la haute pression à la basse pression, ce qui en abaisse la température

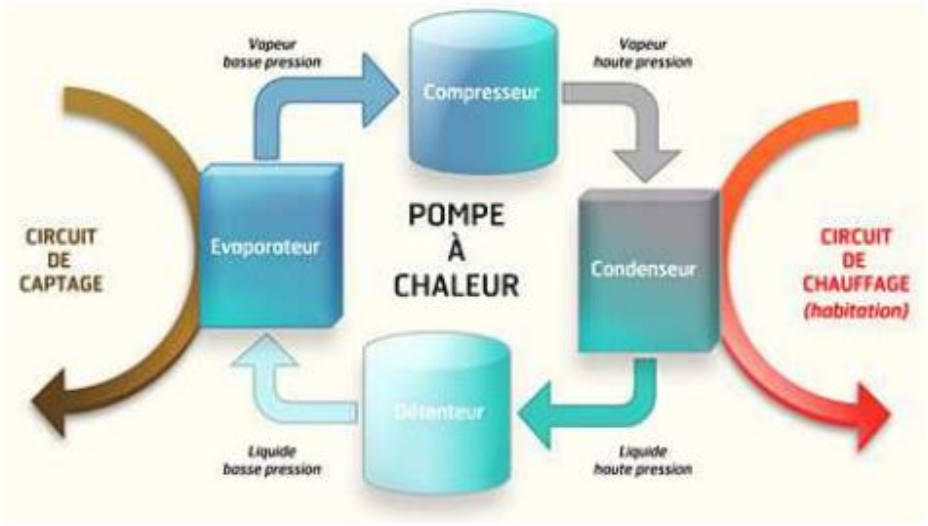
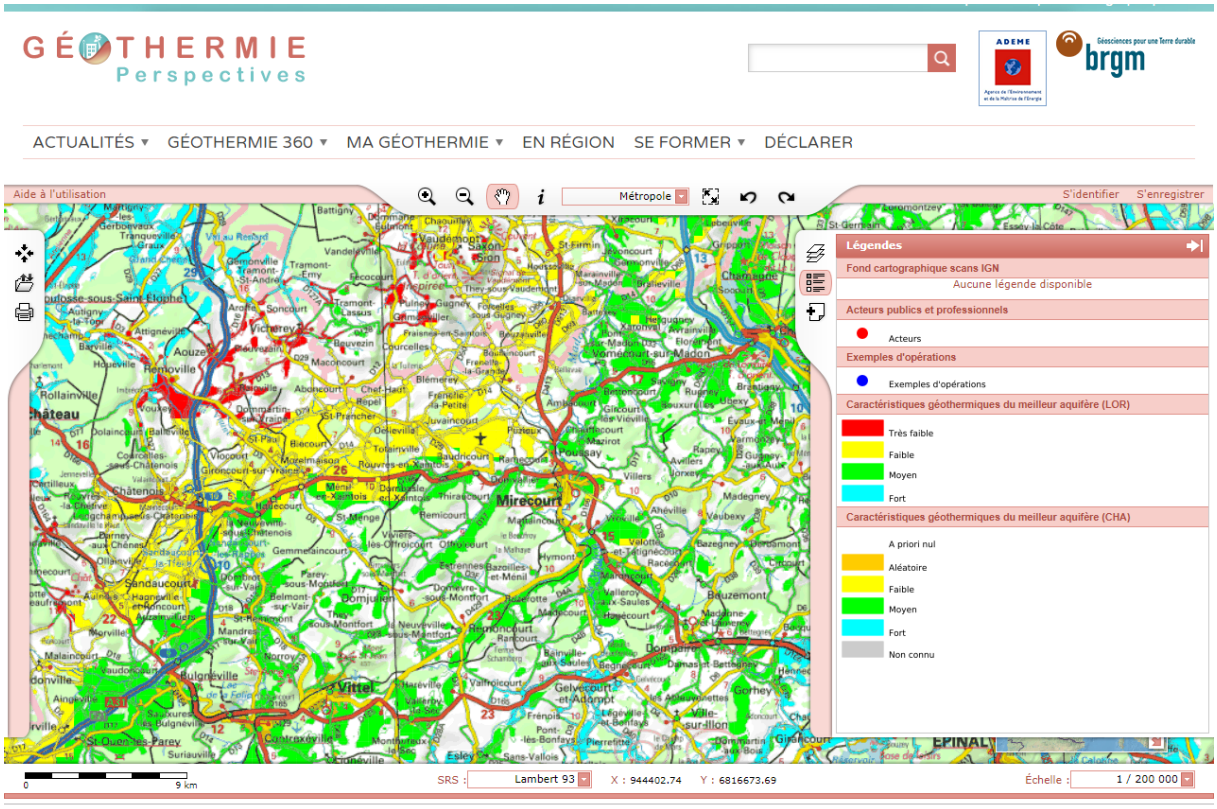


Illustration 3 : Schéma de fonctionnement général d'une PAC (www.energie-edessa.com)

2) <u>Et la géothermie dans tout ça ?</u>



Choix d'un emplacement :

Méthodologie de calcul des coûts de revient du séchage de fourrage pour les méthodes en vrac et en bottes dans l'impluvium de Vittel – Contrexéville

Etant donné que la différence de processus entre ces deux systèmes de séchage de fourrage intervient suite à la mise en andain au champs, nous allons effectuer les calculs de coût de revient à partir de cette étape, sans la prendre en compte. L'arrêt des calculs se fera suite à la remise en ferme des fourrages suite au séchage.

UTILISER LE BAREME D ENTRAIDE DES CHAMBRES D AGRICULTURE

➢ **Calcul pour le séchage en vrac :**

- Coût horaire de l'autochargeuse + traction (environ tracteur de 200cv nécessaire) + main d'œuvre puis rapporter ce coût à la tonne de matière sèche en utilisant le débit de chantier, dépendant lui-même de la distance à parcourir entre le séchage et la parcelle
- Coût du séchage : comprenant l'amortissement des installations (charges structurelles) : bâtiment, griffe, ventilateurs, + charges opérationnelles : électricité, chauffage de l'air, main d'œuvre
  POUR CE POSTE POSSIBILITE DE SE BASER SUR L'UNITE VISITEE DANS L'AIN
- Reconditionnement : à ne prendre en compte que s'il y a un pressage du vrac prévu pour renvoyer sur les fermes. Dans ce cas, rajouter prix du transport (tracteur, remorque à balles, main d'œuvre)
- Si pas de reconditionnement, évaluer le coût à partir du coût horaire de l'autochargeuse + tracteur + main d'œuvre.

➢ **Calcul pour le séchage en bottes :**

- Coût unitaire à la botte du pressage (avec tracteur et main d'œuvre) puis rapporter ce coût à la tonne de matière sèche (une botte = 500 Kg)
- Coût du transport des bottes de la parcelle au séchage : coût horaire d'une remorque avec chauffeur et tracteur / utiliser le débit de chantier (bottes rentrées à l'heure) pour faire le rapport à la botte (va dépendre de la distance à parcourir)
- Coût du séchage : utiliser des références si existantes (ex : SEGRAFO, chambres d'agricultures de l'Orne) car difficile à estimer sans projet concret
- Coût horaire d'un chargeur télescopique pour la manutention (chargement + déchargement + retournement des bottes)
- Coût horaire d'une remorque avec chauffeur et tracteur pour retour à la ferme. A ramener à la botte puis à la tonne de matière sèche.

Estimation économique du séchage de fourrage pour les méthodes en vrac et en bottes

Clémentine FROGNEUX, Henri DUCHAUX, INRA SAD-ASTER

Hypothèses pour le calcul :

La comparaison se base sur 1ha de coupe de foin de prairie multi-espèces. On considère le rendement de cette première coupe à 4.7 TMF (4 TMS à 85%MS)/ha.

On compare les deux méthodes sur des parcelles éloignées de 15 km de l'unité de séchage (jusqu'à 10 km de distance, les retours d'expériences nous apprennent que le séchage en vrac est généralement la meilleure solution, au-delà c'est à voir au cas par cas). On considère 200 ha à faire sécher (tous à 15 km de distance pour faciliter la comparaison)

Comparaison économique en fonction des étapes, suite à la mise en andain :

1) Etape au champ

❖ Séchage en bottes

Investissement matériel :

- Presse à balle ronde 120*180 cm à chambre variable : **42 000 €** [1]
  Une presse à chambre fixe est déconseillée car elle ne permet pas d'obtenir un serrage homogène du foin et donc un séchage uniforme [2]. La densité de la botte doit être comprise entre 130 kgMS/m3 et 150 kgMS/m3 (ce qui fait des bottes d'environ 460 kg).
- Plateau de 12 m de long (capacité 20 t) : **15 100 €** [1]
- Fourche pour tracteur avec bâti (ou pince pour ne pas créer de passage préférentiel de l'air lors du séchage [3]): **11 300 €**
  Le coût est de 5 000 à 20 000 € à dire de techniciens, on se base sur un prix de chargeur frontal 3 fonctions [1]. On part de la supposition que le télescopique n'est pas utilisé à cette étape, car peu adapté aux longues distances (trajet sur 15 km).
- Tracteur 120 ch (pour tracter le plateau) : **64 000 €**

➔ Investissement sans tracteur : 68 400 €
➔ Investissement avec tracteur : 132 400 €

Coûts opérationnels :

- Fonctionnement de la presse (coût traction + main d'œuvre + carburant + dépréciation matériel) : **36 €/ha** [1]
- Chargement des bottes (coût traction + …) : **13 €/ha**
  Le temps de chargement pour 10 bottes est estimé à 20 mn, avec un coût horaire de 40 € [1].

➔ Coûts opérationnels : environ 50 € /ha

❖ Séchage en vrac

Investissement matériel :

- Autochargeuse pour ensilage avec couteaux de 70m3 : **95 000 €** [1]
  A dire d'agriculteur, des autochargeuses plus petites et non spécifique à l'ensilage existent mais ne seraient pas adaptées à une unité collective de séchage qui implique une surface et des distances

de trajet importantes. Les couteaux ne sont laissés que sur 30-40 cm pour éviter de trop tasser le fourrage.

- Tracteur 190 ch (pour tracter autochargeuse 70 m3) : **117 000 €** [1]

➔ Investissement sans tracteur : 95 000 €

➔ Investissement avec tracteur : 222 000 €

Coûts opérationnels :

- Fonctionnement de l'autochargeuse (coût traction + …) : **79 €/ha** [1]
  Prévision de fonctionnement de 200 ha/an.

➔ Coûts opérationnels : environ 80 € /ha

2) <u>Transports du fourrage vers l'unité et optimisation logistique</u>

❖ Séchage en bottes

4,7 TMF /ha peuvent être récoltées en première coupe. Le poids de la botte est estimé aux alentours de 450 kg pour respecter une densité de la botte comprise entre 130 kgMS/m3 et 150 kgMS/m3 (représentant une botte 120*180 à 400 – 460 kg), valeurs idéales pour réaliser du séchage en bottes [3]. On estime donc pouvoir faire 10 balles rondes/ha.

Un plateau de 12 m peut contenir 23 bottes de 120*180 cm, ce qui représente environ 2.3 ha / trajet.

Un tracteur 120 ch (utilisé 500 h/an) a un coût opérationnel de 20.20 €/h (coût traction +…) [1]. Pour acheminer le foin de 200 ha à 15 km de distance, en roulant en moyenne à 20 km/h (cette valeur laisse une marge de sécurité en cas de traversées nombreuses de villages, chemins en champs… mais pourrait être plus élevée en réalité), il faut faire 87 trajets de 45 mn = environ 65 h. Le coût opérationnel est donc d'environ 1 318 € / 200 ha, soit 6.59 €/ha.

On considère que le trajet retour à vide du plateau est en moyenne plus rapide de 5 mn. 87*40 mn = 58h. Le coût opérationnel retour est donc de 1 172 €/ 200 ha, soit 5.86 €/ha.

Le coût opérationnel du transport est donc de **12.45 €/ha.**

❖ Séchage en vrac

Le fourrage à sécher en vrac peut être rentré au bâtiment de séchage à 50-60 % de MS. A 55 % de MS, une autochargeuse de 31.3 m3 peut charger environ 4 500 kg [4], soit 144 kg/m3. Une autochargeuse pleine de 70 m3 peut donc charger environ 10 t de fourrage, ce qui représente plus de 2 ha / trajet (2.14). [4] [5]

Un tracteur 190 ch (utilisé 500 h/an) a un coût opérationnel de 37.30 €/h (coût traction +…) [1]. Pour acheminer le foin de 200 ha à 15 km de distance, en roulant en moyenne à 20 km/h (cette valeur laisse une marge de sécurité en cas de traversées nombreuses de villages, chemins en champs… mais pourrait être plus élevée en réalité), il faut faire 93 trajets de 45 mn = environ 70 h. Le coût opérationnel est donc d'environ 2 611 € / 200 ha, soit 13 €/ha.

On considère que le trajet retour à vide de l'autochargeuse est en moyenne plus rapide de 5 mn. 93*40 mn = 62h. Le coût opérationnel retour est donc de 2 313 €/ 200 ha, soit 11.5 €/ha.

Le coût opérationnel du transport est donc de **24.5 €/ha.**

3) <u>Etape de disposition du fourrage dans le séchoir</u>

❖ Séchage en bottes

Investissement matériel et infrastructure :

- Unité de séchage : Les valeurs sont très variables selon l'installation, difficile à prévoir, à considérer à part dans la comparaison économique. Pour avoir une idée de l'ordre de grandeur, un séchoir réalisé en auto-construction pour une seule exploitation a un coût d'investissement de l'ordre de 10-40 000 € (notamment si réhabilitation anciens bâtiments), alors qu'un séchoir rapide avec 2 cycles par jour pour une exploitation a un coût d'investissement de l'ordre de 120 000 € [2].
- Télescopique qui resterait sur place : **62 500 €** [1]

➔ Investissement : 62 500 € + ?

Coûts opérationnels :

- Déchargement du plateau et disposition des bottes dans le séchoir avec le tracteur à fourche/ télescopique et déchargement (1 mn par botte), avec un coût opérationnel de 42.9 €/h [1] du télescopique : 7.15 €/ha. On considère les coûts équivalents pour le chargement après séchage, faisant un total de **14.3 €/ha**
- La manutention des bottes est chronophage dans le cas de séchage en bottes [3]. On considère un coût similaire au chargement/déchargement des bottes pour placer les bottes, les retourner, etc… : **14.3 €/ha**

➔ Coûts opérationnels : environ 30 €/ha

❖ Séchage en vrac

Investissement matériel et infrastructure :

- Unité de séchage : ? Les valeurs sont très variables selon l'installation, difficile à prévoir, à considérer à part dans la comparaison économique. L'investissement par la CUMA Luzerne de Bresse était à hauteur de 1 647 283 € [6].

➔ Investissement unité de séchage : ?

Coûts opérationnels :

- Les charges opérationnelles correspondant à l'énergie pour sécher la luzerne vont de 5 à 30 €/TMS [6]. On considère que la valeur basse correspond au cas où seules la griffe et les ventilateurs sont en fonctionnement. Cela correspond à 5.9 €/TMF, soit un peu moins de 27 €/ha. Etant donné que les coûts du ventilateur font partie des 27€/ha, on estime que la mise en place du fourrage dans le séchoir coûte au maximum **15 €/ha**.

➔ Coûts opérationnels : environ 15 €/ha

4) <u>Etape de séchage du fourrage dans le séchoir</u>

❖ Séchage en bottes

Coûts opérationnels :

Coût du séchage (électricité + combustible) : de 30 à 50 €/TMS [8], soit **120 à 200 €/ha** (on considère 4 TMS). ((trouver les besoins en chaleur, si chaleur de la métha ce n'est peut-être pas limitant))

- Séchage en vrac

Coûts opérationnels :

Coût du séchage (électricité + combustible) : de 5 à 7 €/TMS [8], soit **20 à 28 €/ha** (on considère 4 TMS).

5) <u>Etape de retour du fourrage dans les fermes</u>

- Séchage en bottes

Coûts opérationnels :

Les coûts opérationnels sont similaires à l'étape de transport du fourrage jusqu'à l'unité de séchage (aller plateau vide, retour plateau chargé), soit **12.45 €/ha.**

- Séchage en vrac

Si pressage en sortie :

Investissement matériel :

Si pressage en sortie :

- Presse industrielle [6] : **150 000 €** (possibilité de réduire les coûts en utilisant une presse agricole, technologie en développement [7]).
- Plateau de 12 m de long (capacité 20 t) : **15 100 €** [1]

Coûts opérationnels :

Les coûts opérationnels sont similaires à l'étape de transport du fourrage jusqu'à l'unité de séchage pour du séchage en bottes (aller plateau vide, retour plateau chargé), soit **12.45 €/ha.**

Si pas de pressage en sortie :

Possibilité sinon de rapporter le fourrage en vrac dans l'autochargeuse et de presser avec une presse classique, mais risque de perdre les feuilles et autres parties à haute valeur du fourrage du fait d'une manutention plus importante.

Coûts opérationnels :

Les coûts opérationnels sont similaires à l'étape de transport du fourrage jusqu'à l'unité de séchage pour du séchage en vrac (aller vide, retour chargé), soit **24.5 €/ha.**

Possibilité de distribuer le fourrage en vrac à l'auge, dans ce cas nécessité investissement dans un silo et dans un bol mélangeur ou une griffe.

Résumé des coûts opérationnels :

- Séchage botte : pressage + transport + séchage + retour ferme = 225 à 305 € /ha soit **56 à 76 € / tonne de MS**
- Séchage vrac : ramassage + autochargeuse + séchage + retour ferme en bottes = 152 à 160€ / Ha soit **38 à 40 € / tonne de MS**
- Séchage vrac : ramassage + autochargeuse + séchage + retour ferme en vrac = 164 à 172€ / Ha soit **41 à 43€ / tonne de MS**

Tableau résumé des coûts hors coûts investissement bâtiment de séchage **:**

	SECHAGE EN BOTTES		SECHAGE EN VRAC	
Etapes	**coûts opérationnels en € /ha**	**Investissement en €** (hors coûts installation)	**coûts opérationnels en € /ha**	**Investissement en €** (hors coûts installation)
Manutention au champ	49	132 000	79	222 000
Transport fourrage vers unité	12.5		24.5	
Manutention du fourrage dans l'unité	30	62 500	15	
Séchage du fourrage *	160		24	
Retour du foin à la ferme **	12.5		12.5	165 100
TOTAL	**264 €/ha**	**194 500 €**	**155 €/ha**	**387 100 €**

* valeurs moyennes

** hypothèse de pressage du foin en vrac en sortie de l'unité de séchage

Sources de la partie estimation économique

[1] APCA-CRAGE, FRCUMA Grand Est, « Coûts opérations culturales 2018 (barème d'entraide des chambres d'agriculture) »

[2] Chambre d'agriculture d'Ariège, « Le séchage en balles rondes ». *En ligne*. Disponible sur https://ariege.chambre-agriculture.fr/actualites/toutes-nos-actualites/detail-de-lactualite/actualites/le-sechage-en-balles-rondes/ (consulté le 10/04/19)

[3] SEGRAFO Ouest, « Le séchage en bottes ». 2011

[4] J. MARCEAU, « évaluation de la performance de récolte de foin en vrac ». 2014, diapo 18.

[5] La France Agricole, dossier « une question de distance ». *En ligne*. Disponible sur http://www.lafranceagricole.fr/remorque-autochargeuse-une-question-de-distance-1,0,3440507726.html (consulté le 10/04/19)

[6] Document de rentabilité du projet de séchage collectif de Lescheroux sur 1500 tonnes séchées, fourni par M. PERTHUIZET, vice-président de la CUMA Luzerne de Bresse, en février 2019.

[7] SEGRAFO [entretien téléphonique], 10/04/19

[8] ADEME, « utilisation rationnelle de l'énergie pour le séchage des grains et des fourrages », 2011, p.20.

QUALITE DU FOURRAGE

Appel le 10/04/19 SEGRAFO

Qualité du fourrage :

Ils ne travaillent plus sur le séchage en bottes du fait des mauvais retours qu'ils ont eus depuis quelques années, liés au temps de manutention et à la difficulté à obtenir des bottes à humidité homogène. En effet, si l'humidité inter-bottes n'est pas homogène, cela implique une surconsommation d'énergie pour sécher les bottes restantes les plus humides (du coup sûrement pas un pb si chaleur de la méthanisation).

Selon eux, la moindre qualité du séchage en bottes comparé au séchage en vrac s'explique par le fait que le fourrage ne peut être rentré qu'à 60-70 % d'humidité, après un pré-fanage au champs, tandis que le fourrage séché en vrac peut être rentré à 50 % d'humidité, conservant ainsi mieux sa valeur nutritionnelle.

Ils n'ont pas connaissance d'expérimentation ayant comparé la qualité d'un même fourrage séché en bottes et en vrac. Ils seraient cependant preneurs de cette information, car malgré leur préférence de la technique en vrac, ils ont beaucoup de demandes concernant le séchage en bottes, notamment pour des petites unités.

Investissement :

Une presse à poste fixe pour reconditionner le fourrage après séchage en vrac peut coûter dans les 150 000 €. Cependant des techniques devraient sortir très prochainement pour reconditionner avec une presse agricole mobile classique (l'entreprise SECHAGE CONCEPT investit dans cette nouvelle technologie).

Appel le 10/04/19 Pierre AEBY, responsable du secteur Production végétale à Grangeneuve, institut agricole de l'Etat de Fribourg, Suisse

Qualité du fourrage :

Ils ne disposent pas de données comparatives entre un même foin séché en botte et en vrac au niveau de leur institut. Cependant, le seuil inférieur du taux de matière sèche des fourrages explique que le séchage en vrac permet d'obtenir un foin de meilleure qualité à nos latitudes. A l'inverse de l'Italie où les conditions météorologiques permettent de sécher au champ un foin mis en andain à 75 % de MS, nos conditions météorologiques ne permettent pas de préfaner en andains, ce qui entraine une perte plus importante de matières fourragères (feuilles des légumineuses notamment, pour tout type de prairie). Pierre AEBY considère le séchage en bottes plus comme une finition du séchage, alors que le séchage en vrac permet de sécher une matière plus humide donc plus riche, en un temps plus court ce qui conserve les nutriments.

Investissement :

La plupart de leurs éleveurs investissent dans du séchage en vrac car les coûts d'investissement d'un bâtiment neuf sont plus faibles pour du vrac. Par contre il pourrait être intéressant économiquement de réhabiliter un ancien bâtiment en unité de séchage en bottes.

Appel le 12/04/19 David Brus de la chambre d'agriculture d'Ariège

Qualité du fourrage :

N'a pas connaissance de données chiffrés, chez eux très peu d'éleveurs utilisent le séchage en balles rondes. Me conseille de contacter la CA du Lot

Investissement :

Il ne connaît pas de grosse unité de séchage en collectif en bottes. Selon lui, il faut être au maximum 4 exploitations agricoles, sinon la gestion est très compliquée et les dépenses énergétiques risqueraient d'augmenter de façon exponentielles. Il y a possibilité de sécher 2 ha de fourrage en 24h. La gestion n'est pas la même que pour du séchage en vrac. Le séchage en balles permettra de sécher généralement uniquement la première coupe. Il faudrait également privilégier des fourrages à plusieurs espèces, pour que l'infiltration soit plus homogène dans les bottes.

Appel le 12/04/19 Thierry GAYRAL de la chambre d'agriculture du Lot

Qualité du fourrage :

Ils ne disposent pas de donnée de qualité de fourrage séché en bottes, ne disposent que des valeurs moyennes d'un fourrage « ventilé ». à priori pas de projet de lancer une étude pour évaluer les différences de qualité.

Investissement :

Il ne connaît pas d'unité en collectif en séchage en bottes. La plupart des éleveurs qui se lancent dans cette technique réutilisent des bâtiments, ça permet d'avoir des coûts d'investissement moindres (mais des coûts énergétiques bien plus élevés que pour du vrac).