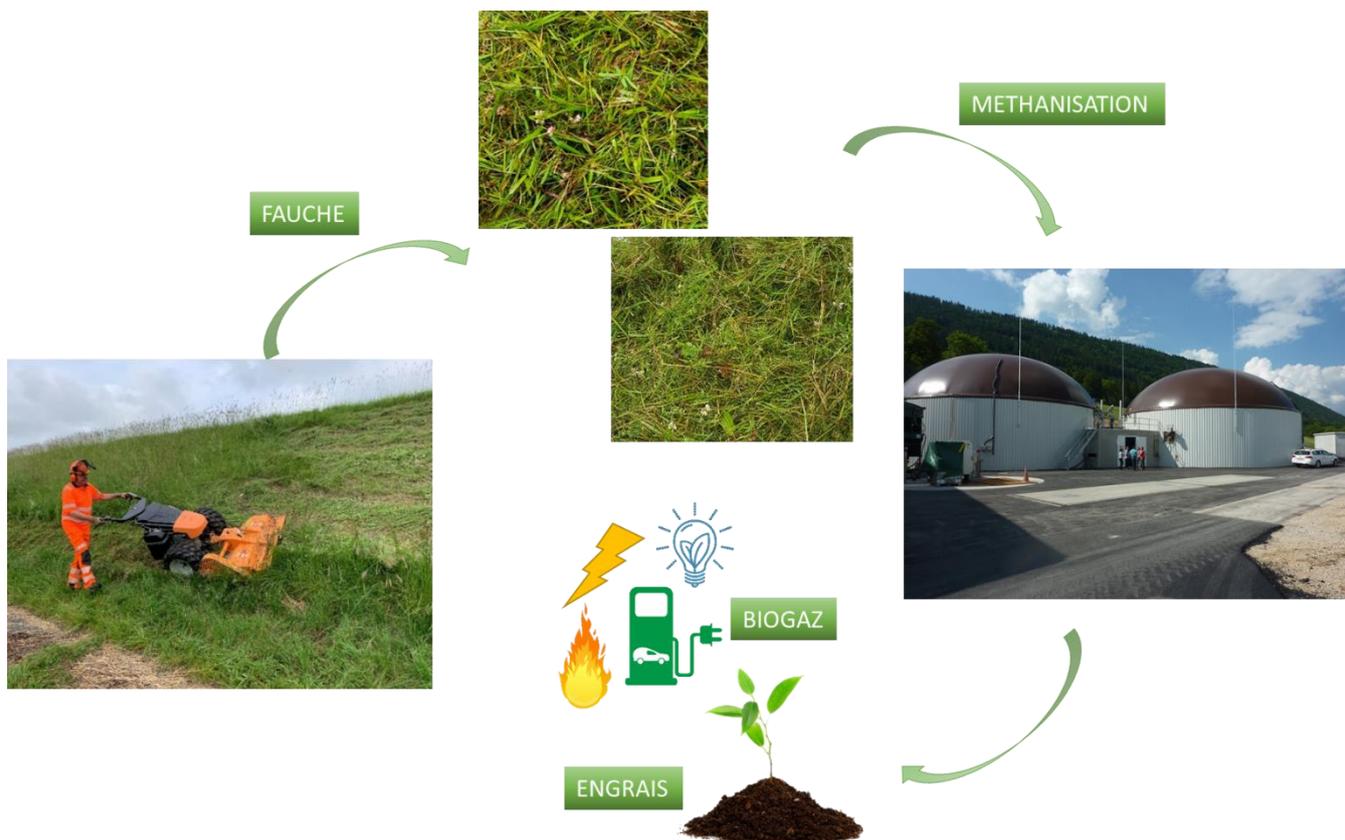




Rapport final du 28 février 2022

Métharoad - Valorisation de la biomasse des fauches des bords des routes dans des installations de biogaz



Source: HEIG-VD et EREP, 2021



Date: 28 février 2022

Lieu: Berne

Prestataire de subventions:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Bénéficiaires de la subvention :

HEIG-VD
Avenue des Sports 20
1401 Yverdon-les-Bains
www.heig-vd.ch

EREP SA
Ch. Du Coteau 28
1123 Aclens
www.erep.ch

HES-SO Fribourg, HEIA-FR, ChemTech
Pérolles 80
1700 Fribourg
www.heia-fr.ch/

Auteur(s):

Xenia Christodoulou, HEIG-VD, xenia.christodoulou@heig-vd.ch
Elise Moatti, EREP, elise.moatti@erep.ch

Suivi du projet à l'OFEN:

Sandra Hermle, sandra.hermle@bfe.admin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN: SI/502089-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Résumé

Les herbes fauchées pour entretenir les bords de routes sont une source de matière organique qui pourrait fournir de la biomasse pour la production d'énergie, mais ce potentiel est sous-exploité en Europe. Sa valorisation suscite pourtant un intérêt croissant car sa production ne génère pas d'émissions supplémentaires de gaz à effet de serre et ne nécessite pas l'utilisation de terres arables. Cette étude évalue la faisabilité de l'utilisation de l'herbe des bords de route comme substrats dans la digestion anaérobie. La teneur en polluants tels que les (micro)plastiques, HAPs et métaux lourds est évaluée pour 5 types de routes en Suisse récoltées sur deux campagnes (juin et septembre 2021), suivi d'une évaluation de leur potentiel en biométhane. Le potentiel énergétique du substrat et son intégration dans le paysage de la méthanisation en Suisse ont été également évalués. La teneur de la matière sèche était en accord avec les changements saisonniers pour tous les types de routes ; 20-30% au printemps et 20-40% après l'été. La teneur en polluants de l'herbe s'est avérée inférieure pour les HAP, les métaux lourds et les microplastiques à la limite de quantification indiquée dans l'ORRChim. Le potentiel du biométhane s'est révélé être de $350 \text{ Nm}^3_{\text{CH}_4}/\text{t}_{\text{MO}}$ en moyenne qui s'est avéré être environ 43% plus élevé que ce qui avait pu être observé dans d'autres études. En termes de tonnage, cela pourrait représenter des quantités de biomasse herbeuse de l'ordre de 39'000 et 58'000 tMF/an, en considérant les routes nationales et cantonales en Suisse. Il s'agit d'une fourchette à considérer avec grande attention, puisque cela variera selon un très grand nombre de paramètres (largeur de bords de routes entretenue, nombre de fauches annuelles et fréquence de l'entretien, période d'intervention, conditions climatiques annuelles et les conditions agronomiques, type et la variété des espèces présentes...).

Summary

Roadside verge-grass is a source of organic matter that could provide biomass for energy production, but this potential is under-exploited in Europe. Its valorization, however; is growing an interest as its production does not generate additional greenhouse gas emissions nor requires the use of arable land. This study evaluates the feasibility of using grass harvested from road verges as a feedstock in anaerobic digestion. The content of pollutants such as micro(plastics), HAPs et heavy metals are assessed for 5 types of roads in Switzerland during two campaigns; in June and in September, followed by an assessment in their biomethane potential. In addition, the energetic potential of the substrate and its integration were evaluated. The dry matter was agreeing with seasonal changes; 20-30% during spring and 20-40% during summer. The content of grass contamination was found to be inferior for HAP, heavy metals and microplastics to the limit of quantification reported in the ORRChim. An obstacle appear for two of the routes regarding the presence of macroplastics suggesting the need of cleaning the routes before grass harvesting, without an added cost assuming a minor restructure in the route cleaning is possible. The biomethane potential was found to be at $350 \text{ Nm}^3_{\text{CH}_4}/\text{t}_{\text{DM}}$ in average which shown to be approximately 43% higher than other studies. In terms of tonnage, this could represent quantities of grass in the range of 39'000 and 58'000 tFM/year, considering national and cantonal roads in Switzerland. This is a range to be considered very carefully, as it will vary according to a very large number of parameters (width of the roadside maintained, number of annual mowings and frequency of maintenance, period of intervention, annual climatic and agronomic conditions, type and variety of species present, etc.).



Take-home messages

- Les niveaux de contamination de l'herbe des bords de routes étaient inférieurs aux limites ORRChim signalées, ce qui garantit qu'elle peut être utilisée comme substrat dans la digestion anaérobie pour la production de biogaz.
- Une certaine restructuration est nécessaire dans le nettoyage des routes pour réduire la contamination par le plastique.
- Le potentiel de biométhane était environ 43% plus élevé que celui observé dans d'autres études en raison de causes multiples possibles ; végétation différente, influence du stockage sur le substrat, etc.
- En termes de tonnage, cela pourrait représenter des quantités de biomasse herbeuse de l'ordre de 39'000 et 58'000 tMF/an, en considérant les routes nationales et cantonales en Suisse. Il s'agit d'une fourchette à considérer avec grande attention, puisque cela variera selon un très grand nombre de paramètres.



Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Résumé..... | 3 |
| Summary | 3 |
| Take-home messages | 4 |
| Table des matières | 5 |
| Liste des abréviations..... | 7 |
| 1 Introduction..... | 8 |
| 1.1 Contexte et arrière-plan..... | 8 |
| Justification du projet..... | 9 |
| 1.2 9 | |
| 1.3 Objectifs du projet..... | 10 |
| 1.4 Procédure et méthode | 10 |
| 1.5 LT1 : Typologie des routes et échantillonnage..... | 11 |
| 1.5.1 Protocole et réalisation pratique des prélèvements | 13 |
| 1.5.1.1. Autoroute | 13 |
| 1.5.1.2. Route cantonale à fort trafic (<i>RC601</i>)..... | 15 |
| 1.5.1.3. Route cantonale à faible trafic (<i>RC604</i>) | 17 |
| 1.6 LT2 : Mesure de la teneur en MS, du potentiel méthanogène et du rapport C/N | 18 |
| 1.6.1 Mesure de la teneur en matière sèche..... | 18 |
| 1.6.2 Détermination de la teneur en C et N..... | 19 |
| 1.6.3 Protocole de détermination du potentiel méthanogène..... | 19 |
| 1.7 LT3 : Détermination de teneurs en (micro)plastiques | 20 |
| 1.8 LT4 : Détermination des teneurs en métaux lourds (HEIG-VD)..... | 21 |
| 1.9 LT5 : Analyses des hydrocarbures aromatiques polycycliques | 21 |
| 1.10 LT6 : Intégration dans le paysage de la méthanisation en Suisse..... | 22 |
| 2 Résultats et commentaires..... | 22 |
| 2.1 Mesure de la teneur en MS, du rapport C/N et du potentiel méthanogène | 22 |
| 2.1.1 Teneur de matière sèche..... | 22 |
| 2.1.2 Rapport C/N..... | 24 |
| 2.1.3 Potentiel méthanogène..... | 25 |
| 2.2 Détermination de teneurs en plastiques..... | 26 |
| 2.2.1 Extraction des plastiques..... | 26 |
| 2.2.2 Analyses ATG..... | 28 |
| 2.2.3 Analyses FTIR | 30 |
| 2.3 Détermination des teneurs en métaux lourds..... | 32 |
| 2.4 Analyses des hydrocarbures aromatiques polycycliques..... | 34 |
| 2.5 Intégration dans le paysage de la méthanisation suisse..... | 35 |



| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.5.1 | Estimations des quantités récoltables le long des bords de routes en Suisse | 35 |
| 2.5.2 | Potentiel de production d'énergie à partir de cette biomasse | 37 |
| 2.5.3 | Intégration dans le paysage du biogaz en suisse | 38 |
| 3 | Conclusions et résumé | 39 |
| 4 | Aperçu et mise en œuvre prochaine | 40 |
| 5 | Coopération nationale et internationale..... | 40 |
| 6 | Communication | 41 |
| 7 | Publications | 41 |
| 8 | Bibliographie..... | 41 |
| 9 | Annexes | 44 |
| 9.1 | Protocole d'échantillonnage de l'herbe fauchée de bords de routes | 44 |
| 9.2 | Thermogrammes des analyses ATG pour la perte de masse et DTG des échantillons pour tous les points d'échantillonnage..... | 45 |
| 9.3 | Spectres FTIR des macroplastiques, y compris les spectres de la référence | 46 |



Liste des abréviations

HEIG-VD - Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton du Vaud

IGT - Institut de Génie Thermique

CCDR - Centre de compétences du Domaine Routier

OLED - Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets

OFEFP - Office Fédéral de l'Environnement des Forêts et du Paysage

ORRChim - Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques

HAP - Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

BMP - Biochemical Methane Potential (test de potentiel méthanogène)

ICO-OES - Plasma à couplage inductif - spectrométrie d'émission optique

EPA - Agence de protection de l'environnement

FTIR - Fourier-transform infrared spectroscopy

ATG - Analyse thermogravimétrique

PET - Polyethylene Terephthalate (polyéthylène téréphthalate)

MF – Matière fraîche

MS - Matière sèche

MO - Matière organique

ppm - Parts per million (Parties par million)

ppb - Parts per billion (Parties par milliard)

PE - Polyéthylène

PS - Polystyrène

RC604 - Route cantonal à faible trafic

RC601H - Route cantonal à fort trafic-talus contre haut

RC601B - Route cantonal à fort trafic-talus contre bas



1 Introduction

1.1 Contexte et arrière-plan

L'un des trois piliers de la stratégie énergétique 2050 mise en place par la Confédération helvétique concerne l'augmentation de la part de renouvelable dans la production énergétique suisse. La méthanisation permet une production énergétique neutre du point de vue du CO₂, tout en valorisant les déchets organiques. De ce fait, il est pertinent de considérer de nouveaux gisements de substrats pour la méthanisation pour développer les énergies renouvelables. De plus, les ressources de biomasse représentent un grand intérêt énergétique. Elles sont facilement stockables (du moins à court terme pour la biomasse humide) et transportables, et leur utilisation est flexible, ce qui permet de générer de l'électricité, de la chaleur ou encore des carburants renouvelables, ainsi qu'un engrais riche en composés organiques.

L'utilisation de l'herbe fauchée provenant de l'entretien des bords de route comme substrat pour les installations de digestion anaérobie pourrait présenter un grand avantage pour la Suisse pour la production de biogaz ainsi que pour la production d'engrais. Actuellement, la fauche de l'herbe des bords de route n'est pas valorisée et elle est très souvent laissée sur place ou aspirée avant d'être éliminée. Cela s'explique par, (i) des coûts de traitement jugés trop importants, (ii) une crainte des utilisateurs au niveau des teneurs en polluants et indésirables dans les digestat et composts issus de ces herbes de fauches, ou encore (iii) des législations strictes sur le statut de ces herbes (considérées parfois comme déchets plutôt que ressources). Par conséquent, son utilisation permettra de réduire les déchets organiques et d'augmenter la production de biogaz sans avoir besoin de terres supplémentaires pour les cultiver. En outre, sa production n'engendre pas (ou peu) d'émissions de gaz à effet de serre additionnel et ne requiert pas l'utilisation de terres arables.

De plus en plus de pays réfléchissent à valoriser ce gisement par une filière de traitement biologique car il représente de grandes quantités de matière organique. (Cheffins, 2015) a montré que, pour le comté de Lincolnshire (UK) et pour une largeur de fauche de 1,2 m, les unités de méthanisation ont à disposition 750 t par année d'herbes fraîches dans un rayon de 20 km. Ce chiffre grimpe à 3640 t / an pour un rayon de 45 km. (Cheffins, 2015) conclut qu'une valorisation par méthanisation de ces déchets organique est viable économiquement, bien que des aspects sont encore à étudier, notamment au niveau du potentiel méthanogène des herbes de fauche et de leur teneur en polluants. En effet, lors de cette dernière décennie, des études et des projets pilotes sur la méthanisation et le compostage des herbes de bords de routes ont vu le jour. Parmi ces essais pilotes, il est notamment possible de citer ceux dans la région galloise de Powys au Royaume-Uni dans le cadre du projet « *The Living Highways Project* », ceux dans la municipalité de Berger-Odoom au Pays-Bas lors du projet « *DELAND* », ainsi que ceux de plusieurs communes du Grand Ouest en France pour le projet « *COMBINE* », ainsi que le projet européen « *Grass as a Green Gas Resource – GR3* ». Ces derniers sont décrits plus en détails dans un rapport de (Zdanevitch et al., 2018). Pour le projet *GR3*, un rapport exhaustif est disponible en ligne (AA.VV, 2014).

Selon l'Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets - « Liste des déchets se prêtant au compostage et à la méthanisation (liste positive des biodéchets) » (OFEV, 2018), les herbes de fauches provenant de bords de routes ne sont pas valorisables en raison d'une suspicion de trop fortes teneurs en polluants. La raison de cette décision légale repose sur le fait que, pour pouvoir être valorisé en engrais organique, le digestat issu de la méthanisation ne doit pas dépasser certaines teneurs en métaux lourds (Pb, Cd, Cu, Ni, Hg et Zn), en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et en plastiques, selon l'Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim, 2005). Or dans la littérature scientifique, les teneurs en HAP et en métaux lourds mesurées sur des échantillons de plantes prélevées sur les bords de routes sont rarement supérieures aux valeurs limites mentionnées dans l'ORRChim (Bryselbout, C. et al., 2000; Crépineau-Ducoulombier et al., 2004; Ho & Tai, 1988; Khalid et al., 2018; F.-R. Li et al., 2007; Rodríguez-Flores & Rodríguez-Castellón, 1982;



Tankari Dan-Badjo et al., 2008; Viard et al., 2004; Viskari et al., 1997; Zdanevitch et al., 2018). Les teneurs en métaux lourds ont notamment tendance à baisser depuis les années 80.

Au contraire, Il y a très peu d'études portant sur les pollutions plastiques de bords de route. (Zdanevitch et al., 2018) mentionnent une mesure d'environ 1 kg de plastique par km de route en France (à Loudéac en Bretagne). Cela équivaldrait à une teneur massique d'environ 0.25% (par rapport au poids sec de l'herbe de fauche qui pourrait y être récoltée), ce qui est supérieur à la valeur fixée par l'ORRChim (0.1%). En Suisse, un récent rapport mandaté par l'OFEV (Erny et al., 2020) portant sur la pollution de plastique estime que la plus grande source de pollution de plastique en Suisse provient de l'usure des pneus. Selon cette étude, il y aurait annuellement 8 tonnes de microplastiques issus de cette abrasion qui finiraient leur course sur les côtés de la route (et jusqu'à 5 mètres). Les autres sources de solutions plastiques sont les plastiques de l'industrie du bâtiment, les plastiques agricoles, les textiles synthétiques et les déchets sauvages (OFEV, 2020).

Ce travail vise à étudier les niveaux exacts de polluants (HAPs, métaux lourds et plastiques) présents dans l'herbe des bords de route afin de promouvoir son utilisation pour la valorisation par méthanisation et l'utilisation de son digestat comme compostage en Suisse et de la comparer à la législation ORRChim. D'autres paramètres tels que le rapport C/N, la matière fraîche et le potentiel méthanogène sont également étudiés pour permettre une estimation du potentiel énergétique et économique de l'herbe des bords de route en tant que substrat à intégrer dans les unités de méthanisation en Suisse. Les résultats d'un travail effectué par la DGE-DIREN, « *Potentiel de valorisation énergétique de la biomasse herbeuse et ligneuse des bords des routes vaudoises* » par EREP SA et Energie-bois Suisse dans le canton de Vaud (EREP SA & Energie-bois Suisse, 2021), seront également intégrés pour mieux évaluer le potentiel énergétique et économique.

1.2 Justification du projet

Ce projet contribue directement aux objectifs du plan directeur de la recherche énergétique de l'OFEN. En effet, il est question de valorisation de déchets organiques par méthanisation, et donc de bioénergie, qui est mentionnée dans la section « Priorité de la recherche », dans le programme de recherche « Energies Renouvelables » du plan directeur de la recherche énergétique de l'OFEN.

De plus, ce projet contribue à certaines priorités mentionnées dans le plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération 2021–2024, sur lesquelles l'OFEN aligne ses objectifs de recherche, notamment au niveau des ressources (une nouvelle ressource énergétique est considérée), de l'économie nationale (apports d'énergie et de revenus en Suisse) et des aspects réglementaires (remise en question de restrictions législative sur la valorisation des herbes de fauche de bords de routes).

Le potentiel d'application de la solution proposée pourrait être mis très facilement en œuvre en Suisse et dans tous les autres pays possédant des unités de méthanisation de taille industrielle, ainsi qu'ayant recours à la fauche des herbes pour entretenir les routes. En effet, quelques adaptations logistiques de l'entretien des zones vertes de bord de routes seraient suffisantes pour mettre en œuvre l'application étudiée dans ce projet, en acheminant ces déchets aux unités de méthanisation les plus proches. Le potentiel d'application est donc grand, que ce soit en Suisse ou à l'étranger.

Les opportunités commerciales sont donc la prise en charge de déchets de coupe par les unités de méthanisation, qui peuvent les valoriser en énergie et en engrais.

Les autres solutions existantes pour ces herbes de fauches sont :

- L'incinération si les herbes contiennent des déchets ou des plantes invasives ou nuisibles, ce qui est coûteux pour les collectivités et génère significativement moins d'énergie et aucun engrais.
- Le « mulching », c'est-à-dire le fait de laisser le matériel coupé sur place, ce qui à terme est défavorable à la biodiversité de ces milieux, et ne contribue ni à la production d'énergie ni à celle d'engrais.



- Le compostage et l'affouragement de bétail.

1.3 Objectifs du projet

Objectif 1 : Teneurs en polluants dans les herbes fauchées

Les objectifs de ce projet sont de mesurer les teneurs en polluants dans des échantillons représentatifs d'herbes de fauche en bord de routes, notamment :

- 1) Les plastiques et microplastiques ;
- 2) Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ;
- 3) Les métaux lourds (Pb, Cd, Cu, Ni, Hg et Zn).

Objectif visé : Analyse de 30 échantillons d'herbe (5 types de routes × 3 réplicats par route × 2 campagnes d'échantillonnage)

Objectif 2 : Mesure de la digestibilité des herbes de fauche

Le potentiel méthanogène des herbes de fauche de bordure de route ainsi que leur rapport C/N et leur matière sèche seront mesurés sur des échantillons prélevés au début ainsi qu'à la fin de l'été. Ces données serviront à calculer la production potentielle de méthane au niveau suisse à partir de ce substrat, ainsi qu'à déterminer leur proportion en tant que co-substrat des digesteurs en Suisse.

Objectif visé : Analyse de 30 échantillons au moins (5 types de routes × 3 réplicats par route × 2 campagnes d'échantillonnage)

Objectif 3 : Evaluer le potentiel énergétique de ce substrat en Suisse

L'objectif final est d'estimer, sur la base des résultats des objectifs précédents et sur la base d'une estimation globale des quantités de ce gisement en Suisse, l'énergie et l'intégration dans le paysage du biogaz en Suisse.

Objectif visé : Sur la base d'hypothèses, l'objectif est d'estimer la quantité annuelle de ce gisement qui pourrait être récolté lors des fauches de bords de routes sur l'année, puis la production d'énergie contenue dans ce biogaz (selon la voie de valorisation), et finalement d'obtenir un aperçu de l'intégration de ce substrat dans le paysage des installations de biogaz en Suisse.

1.4 Procédure et méthode

Ce projet s'articule autour des lots de travail (LT) suivants :

LT1 : Les typologies des routes ainsi que les points de prélèvement des échantillons à analyser ont été identifiés. Puis, deux campagnes d'échantillonnage ont été effectuées, la première au début de l'été (juin), la seconde à sa fin (septembre).

LT2 : Le potentiel méthanogène de ces échantillons a été mesuré par des tests BMP à l'aide d'unités volumétriques automatisées, ainsi que leur rapport C/N par analyseur CHNS.

LT3 : Les plastiques et microplastiques (entre 5 mm et 50 µm) ont été extraits, quantifiés (nombre, taille, poids) et puis analysés par ATG et FTIR. Les plastiques plus grands que 2 mm ont été identifiés par FT-IR.

LT4 : Les teneurs en métaux lourds ont été mesurées par ICP-OES (Pb, Cu, Ni, Zn et Hg) et ICP-MS (Cd).



LT5 : Les HAP ont été mesurés par GC-MS sur les échantillons d'herbes, ainsi que leur digestat issus des tests BMP.

LT6 : Ces données ont été analysées afin de déterminer la meilleure façon d'intégrer les herbes de fauche de bordure de route dans les installations de méthanisation de Suisse. Les gains en termes de production de méthane ont été estimés à l'échelle du pays.

Les analyses de laboratoire, qui sont toutes réparties entre les LT1 à LT5, sont résumées schématiquement dans la Figure 1 ci-dessous.

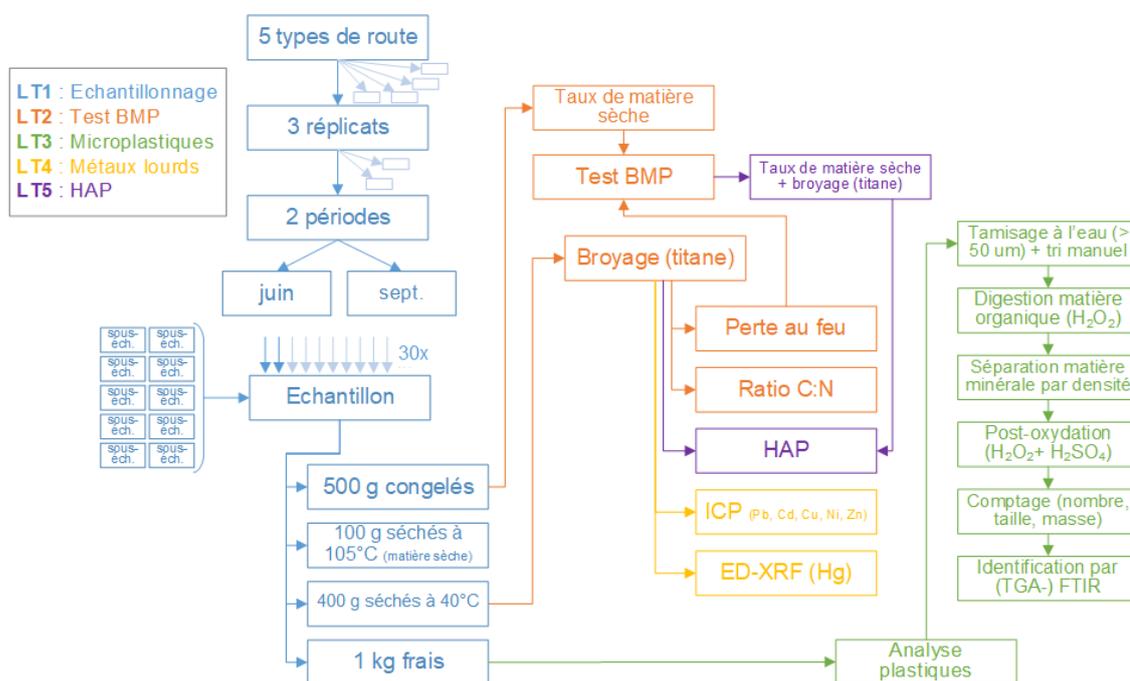


Figure 1 : Schéma des analyses prévues dans le projet, ainsi que leur intégration dans les lots de travail 1 à 5.

1.5 LT1 : Typologie des routes et échantillonnage

En Suisse, la longueur totale du réseau routier est de 87'114 km (chiffres OFS 2021), avec 1'544 km d'autoroutes, 710 km de routes nationales, 17'219 km de routes cantonales et enfin 64'641 km d'autres routes ouvertes au trafic motorisé.

Par soucis de simplicité et de proximité avec le lieu d'analyse des échantillons (HEIG-VD, Yverdon), le choix a été fait de prélever des échantillons le long de routes vaudoises. Une rencontre a été organisée le 12 mai 2021 au Centre d'entretien des routes nationales de Rennaz, dans le canton de Vaud, avec M. Erwin EGGER, référent zones vertes, biodiversité et espèces envahissantes au SIERA (Service intercantonal du réseau autoroutier) et M. Maxime CAPT, géomaticien à la DGMR Entretien (Direction générale de la mobilité et des routes) et responsable du Projet « Ligne Verte », afin de déterminer selon leur expérience les 5 points de prélèvements correspondant à 5 « typologies » ou « tronçons » de routes intéressants et représentatifs à étudier (décrits ci-après) et d'organiser concrètement la campagne de prélèvements des échantillons.

Les 5 points d'échantillonnage retenus, pour les deux campagnes de prélèvements de juin (première campagne) et de septembre (deuxième campagne), sont les suivants :



1. Autoroute (canton de Vaud) : le but est d'obtenir un gradient de répartition du potentiel méthanogène et des polluants entre la zone la plus proche de la chaussée, et le talus surplombant cette même zone, situé à une distance plus éloignée de la chaussée.
 - a. 1 point en zone d'entretien dit « intensif » (*La Veyre zone intensive*) : dans ces zones, la sécurité et la disponibilité figurent à l'avant-plan. Cette zone doit être la plus étroite possible, mais tout de même avoir la largeur nécessaire. Ces zones sont fauchées au minimum 2 fois par année, sur une bande de 2 à 4 m à partir de la chaussée. Période de fauche : courant mai jusqu'en octobre.
 - b. 1 point en zone d'entretien dit « extensif », sur le talus (*La Veyre talus-plat*) : celle-ci comprend tous les espaces verts situés à l'extérieur de la zone d'entretien intensif. Ces zones sont fauchées 1 à 2 fois par année selon les disponibilités des ressources, la nature du terrain et le type de végétation, largeur de bande très variable pouvant aller jusqu'à 30 m. Période de fauche : fin juin jusqu'en novembre.
2. Route cantonale (canton de Vaud) : le but est d'obtenir une idée du potentiel méthanogène et de la quantité de polluants selon la pente du talus et selon l'intensité du trafic routier (points de prélèvements situés à une même distance de la chaussée).
 - a. 1 point en zone d'entretien dit « extensif », sur un talus en pente ascendante (*RC601H*) : dans ces zones, et dans le canton de Vaud, l'entretien n'est pas systématique. Ces zones sont fauchées 1 à 2 fois par année selon les secteurs et le travail du chef d'équipe, sur une largeur de bande très variable pouvant aller jusqu'à 20 m.
 - b. 1 point en zone d'entretien dit « extensif », sur un talus en pente descendante (*RC601B*), sur cette même route.
 - c. 1 point en zone d'entretien dit « extensif », sur un talus plat le long d'une route à proximité à faible trafic (*RC604*)

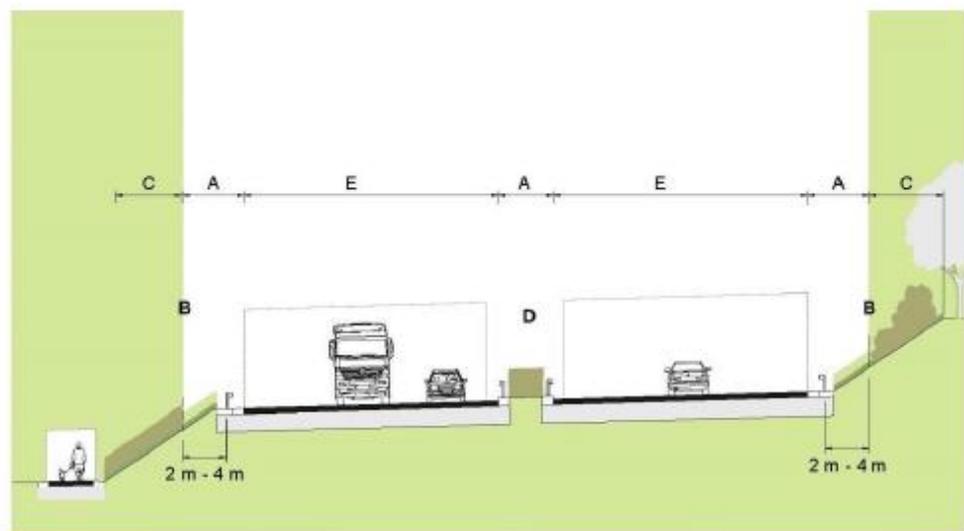


Figure 2 : Illustration de l'espace routier incluant les espaces verts, inspirée de la norme VSS 640660. A : zone d'entretien intensif, B : clôture à faune, C : zone d'entretien extensif D : berme centrale, E : chaussée

De manière générale, un ramassage des déchets (plastiques, métaux) est effectué avant la période de fauche.



1.5.1 Protocole et réalisation pratique des prélèvements

Les échantillons ont été prélevés selon le protocole d'échantillonnage joint en annexe 1.

A la fin de chaque prélèvement, l'échantillon était constitué de 3 sacs étiquetés de 2 kg chacun.



Figure 3 : Matériel d'échantillonnage et 3 sacs de 2 kg chacun constituant en échantillon

1.5.1.1. Autoroute

Deux points de prélèvements (voir § 4.1 : 1a (*La Veyre zone intensive*) = cercle rouge, et 1b (*La Veyre talus plat*) = cercle vert) sont situés sur la zone de l'échangeur de *La Veyre*, jonction entre les autoroutes A9 et A12, sur la bretelle n°12 direction *Chexbres*.



Figure 4 : 2 points de prélèvements sur l'autoroute (zone intensive en rouge, zone extensive en vert)



La première campagne d'échantillonnage a eu lieu le 22 juin 2021. Il est à noter qu'une forte pluie tombait le matin même du prélèvement. Les prélèvements ont été effectués dans la matinée. La deuxième campagne d'échantillonnage a eu lieu le 8 septembre 2021. Ce jour-là, il faisait très beau temps et il était aussi resté sec lors des jours précédents le prélèvement. La machine utilisée pour couper l'herbe est un taille-haie manuel lors de la première campagne d'échantillonnage, et une tondeuse pour la deuxième campagne.

a) Zone intensive (*La Veyre zone intensive*)

Ce point est situé aux coordonnées GPS suivantes : 46.476326/6.859684. Le point de repère STRADA correspondant est « N9 - 27 ».

Il s'agit du bord de la jonction, à proximité de l'entrée d'autoroute direction Lausanne, en zone intensive (le long de la bordure de sécurité). Lors de la première campagne, cette zone avait été fauchée à l'aide d'une épareuse la nuit précédente. Du matériel broyé a donc pu directement être ramassé.



Figure 5 : Illustration pratique de l'échantillonnage au point *La Veyre zone intensive*

b) Talus zone extensive (*La Veyre talus-plat*)

Ce point est situé aux coordonnées GPS suivantes : 46.476461/6.858989. Le point de repère STRADA correspondant est « N9 - 26.950 ».

Il s'agit d'un talus plat en zone extensive, en zone de biodiversité. Le point de prélèvement se situe à environ 10-15 m de la chaussée.

Il s'agit d'une prairie grasse, généralement fauchée du 15.06 au 31.07 puis du 01.09 au 31.10.



Figure 6 : Illustration pratique de l'échantillonnage au point La Veyre talus plat

1.5.1.2. Route cantonale à fort trafic (RC601)

Deux points de prélèvements sont situés le long de la RC 601 - Route de Berne (voir § 4.1 : 2a (RC601H) = cercle rouge et 2b (RC601B) = cercle vert). Il s'agit d'une route cantonale de catégorie *Routes cantonales principales du réseau de base (B), route principale*.



Figure 7 : 2 points de prélèvements sur la route cantonale à fort trafic (talus ascendant en rouge, talus descendant en vert)

Utilisée quotidiennement par plus de 27'000 véhicules, la route de Berne (RC 601) est l'axe principal de l'agglomération Lausanne-Morges qui connaît la plus importante charge de trafic aux heures de pointe, avec plus de 30'000 véhicules par jour. Cette route sert au transit des habitants de la Broye et du Jorat pour accéder à l'agglomération lausannoise et à l'autoroute A9. Elle revêt aussi une fonction de desserte pour un certain nombre de zones riveraines, aujourd'hui en développement.



La première campagne d'échantillonnage a eu lieu le 9 juin 2021. Il est à noter que la veille et la nuit même, de la pluie est tombée. Les prélèvements ont été effectués dans la matinée. La deuxième campagne d'échantillonnage a eu lieu le 1 septembre 2021. Ce jour-là, il faisait très beau temps et il était aussi resté sec lors des jours précédents le prélèvement. La machine utilisée pour couper l'herbe est une broyeuse manuelle lors de la première campagne d'échantillonnage, et un robot-broyeur (Robot Green Mulchy) pour la deuxième campagne.

a) Talus contre haut (*RC601H*)

Ce point est situé aux coordonnées GPS suivantes : 46,7805784/6.9212912. Le point de repère STRADA correspondant est « Axe 4500. 3925 + 125m ». Le distance par rapport à la chaussée est d'environ 5 m. Il s'agit d'un talus contre haut, c'est-à-dire d'un talus avec une pente ascendante.



Figure 8 : Illustration pratique de l'échantillonnage au point *Talus contre haut (RC601H)*

b) Talus contre bas (*RC601B*)

Ce point est situé aux coordonnées GPS suivantes : 46,7782199/6.9188068. Le point de repère STRADA correspondant est « Axe 4500. 3900 – 10m ». Le distance par rapport à la chaussée est d'environ 5 m (avec une banquette de 1.8 m). Il s'agit d'un talus contre bas, c'est-à-dire d'un talus avec une pente descendante.

La végétation se compose de graminées relativement sèche et ligneuse.

Normalement, ce talus est fauché une fois par an, entre fin août et mi-septembre. Comme il s'agit de zone de biodiversité, ces talus sont fauchés plus tard et le matériel est laissé sur place.



Figure 9 : Illustration pratique de l'échantillonnage au point *Talus contre bas* (RC601B)

1.5.1.3. Route cantonale à faible trafic (RC604)

Un point de prélèvement est situé le long de la RC 604 (voir § 4.1 : 2c (RC604) = cercle bleu). Il s'agit d'une route cantonale de catégorie Routes cantonales secondaires du réseau d'intérêt local (IL), route secondaire. Le point est situé à proximité de la commune d'Oleyres.

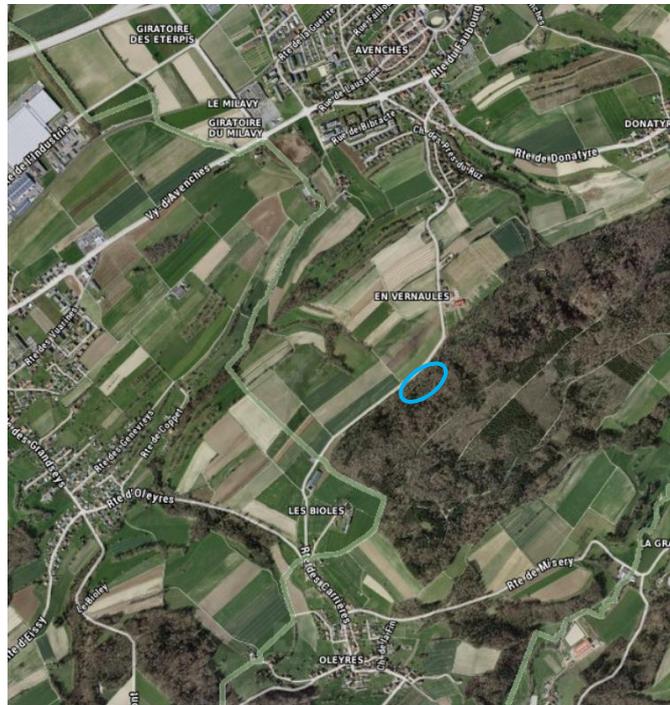


Figure 10 : 1 point de prélèvement sur la route cantonale à faible trafic (talus plat, en bleu)

Ce point est situé aux coordonnées GPS suivantes : 46,8655131/7.0407222. Le point de repère STRADA correspondant est « 150 + 37m ». Le distance du talus par rapport à la chaussée est d'environ 5 m.



Figure 11 : Illustration pratique de l'échantillonnage au point *Talus plat (RC604)*

1.6 LT2 : Mesure de la teneur en MS, du potentiel méthanogène et du rapport C/N

Les travaux suivants ont été exécutés par la HEIG-VD / IGT.

1.6.1 Mesure de la teneur en matière sèche

Le matière sèche (MS) était calculée selon la norme EN 14346. Le calcul de la teneur en matière sèche des 30 échantillons (*5 types de routes × 3 réplicas par route × 2 campagnes d'échantillonnage*) à analyser a été mené selon les étapes suivantes :

1. Prendre un récipient, avant d'en déterminer la masse, le porter à $105 \text{ °C} \pm 3 \text{ °C}$ et le maintenir à cette température durant 30 min, puis le laisser refroidir;
2. Peser, à 0.01g près, le récipient sec, relever la mesure (m_a) ;
3. Peser dans le récipient une quantité appropriée de matière de façon à obtenir un poids de résidu d'au moins 0.5 g, peser le récipient chargé à 0,01g près, relever la mesure (m_b) ;
4. Introduire le récipient contenant l'échantillon dans l'étuve réglée sur ($105 \pm 3 \text{ °C}$) et l'y laisser jusqu'à ce que le résidu apparaisse sec, ce qui nécessite généralement une nuit entière ;
5. Sortir le béccher de l'étuve, après refroidissement, peser le récipient et son contenu une première fois (m_c). Le résidu sec ($m_c - m_a$) doit être considéré constant si la masse obtenue au bout d'une heure supplémentaire de séchage ne diffère pas de plus de 0.5% de la valeur précédente ou de 2 mg (valeur la plus élevée). Sinon, répéter l'opération de séchage ;
6. Calculer la teneur en matière sèche (w_{dr}) ou la teneur en eau (w_w) en pourcentage en masse ou en gramme par kilogramme selon les équations :

Équation 1

$$w_{dr} = \frac{(m_c - m_a)}{(m_b - m_a)} \times f$$



Équation 2

$$w_w = \frac{(m_b - m_c)}{(m_b - m_a)} \times f$$

Où w_{dr} = la teneur en matière sèche de l'échantillon de boues, en % ou g/kg ;

w_w = la teneur en eau de l'échantillon de boues, en % ou g/kg ;

m_a = la masse du bécher vide, en gramme (g) ;

m_b = la masse du bécher contenant l'échantillon de boue, en gramme (g) ;

m_c = la masse du bécher contenant la matière sèche de l'échantillon de boue, en gramme (g) ;

f = facteur de conversion égal à 100, pour les résultats exprimés en pour cent et égal à 1000 pour l'expression en gramme par kilogramme (g/kg)

Les analyses pour calculer le matière sèche étaient réalisées en triplicata ; la valeur moyenne est calculée et consignée avec une précision de ± 0.1 g.

1.6.2 Détermination de la teneur en C et N

La détermination de la teneur en carbone (C) et en azote (N) était effectuée sur les 30 échantillons (5 types de routes \times 3 réplicas par route \times 2 campagnes d'échantillonnage), séchées à 40° C et analysées par un analyseur CHNS (*Flash 2000 Fisher Scientific*, pression des gaz, He = 2,5 bar et O₂ = 3,0 bar ; température des fours). Le calcul de la teneur en C et N, a été mené selon les équation suivantes :

Équation 3

$$C_d = C_{ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

Équation 4

$$N_d = N_{ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

Où d est la base sèche, ad est tel que déterminé, M_{ad} est la teneur en humidité de l'échantillon d'analyse général au moment de l'analyse.

1.6.3 Protocole de détermination du potentiel méthanogène

Le potentiel méthanogène de chaque échantillon prélevé était mesuré avec un test BMP (pour BioMethane Potential) selon les critères définis par le groupe de travail international dirigé par Prof. Christof Holliger de l'EPFL, et qui constituent une amélioration de la norme VDI 4630 (travail auquel l'IGT a participé). Pour cette analyse, l'IGT est équipé d'un système volumétrique automatique (Nautilus, de Anaero Technology, UK). Les 30 échantillons (5 types de routes \times 3 réplicas par route \times 2 campagnes d'échantillonnage) ont été stockés à -20 °C, puis répartis en 4 batch de tests de 15 réacteurs. Les boues de digestion de la STEP d'Yverdon-les-Bains serviront d'inoculum pour ces tests qui se sont déroulés en conditions mésophiles (37 °C). L'inoculum doit répondre aux conditions suivantes pour pouvoir être utilisé dans le test BMP ; pH 7 - 8.5, concentration d'AGV <1 g éq. acide acétique/L, concentration de NH₄⁺ > 2.5 g N-NH₄/L et une alcalinité de > 3 g éq. CaCO₃/L. De la cellulose (contrôle positif) était testée avec chaque batch afin de vérifier le bon fonctionnement de l'analyse. La matière sèche était déterminée



sur les échantillons décongelés, l'inoculum et la cellulose, tandis que la perte au feu étaient mesurées sur les échantillons séchés à 40 °C puis broyés.

Les 30 digestats d'herbe étaient séchés (à 40 °C) puis réservés pour l'analyse des HAP (LT5). Ce plan de travail est résumé dans la Figure 1.

1.7 LT3 : Détermination de teneurs en (micro)plastiques

Le protocole utilisé pour l'extraction et quantification des microplastiques présents dans les échantillons d'herbe de fauche est le suivant (Q. Li et al., 2019) qui a été exécuté par HEIG-VD / IGT :

Comme le montre la Figure 12, l'herbe était retirée par tamisage à l'eau en utilisant 3 mailles de tamis différentes : 5 mm, 2 mm et 50 µm. Après un rinçage intensif à l'eau, les plastiques n'ayant pas passé le 1^{er} tamis (5 mm) étaient triés manuellement et étaient considérés comme (macro)plastiques. Les fractions entre 5 mm et 50 µm étaient considérées comme microplastiques. Si trop d'herbes passent à travers les tamis, les fractions étaient ré-tamisées et/ou triées à la main. La matière organique des fractions tamisées et sans herbes étaient digérées utilisant H₂O₂. Les matières minérales étaient séparées par densité, avec une solution saturée en ZnCl₂, qui permet de conserver les plastiques lourds tels que le PET (voir Figure 12).

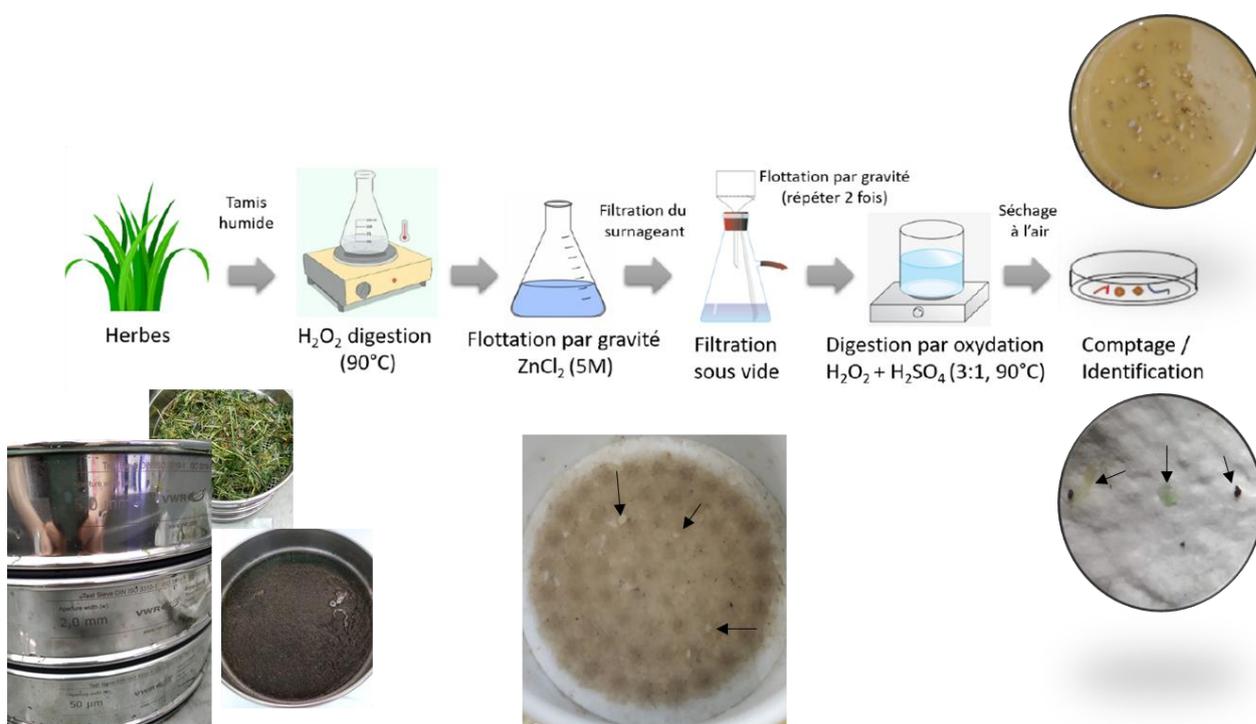


Figure 12 : Méthodologie et images représentatives de microplastiques trouvés dans les herbes (<50 µm)

Les microplastiques ainsi récupérés et après filtrations étaient triés manuellement, si possible. Puis, les substances sur les filtres étaient digérées utilisant H₂O₂ et H₂SO₄ pour éliminer la matière organique qui pourrait rester de la première digestion. Les particules de plastiques étaient ensuite comptées, mesurées (taille) pesées, et analysées par un ATG (Yu et al., 2019). Les analyses ATG (Setsys Evolution - Setaram) ont été effectués en augmentant la température de 20 °C à 650 °C par minute et en maintenant la température à 650 °C pour 60 secondes.



Finalement, les particules de plastiques > 2 mm étaient identifiées par FT-IR (Nicolet IS – Thermo Scientific) et utilisées comme une référence. Tous les analyses des plastiques par ATG et FTIR ont été réalisées au Centre de compétences du Domaine Routier (CCDR).

1.8 LT4 : Détermination des teneurs en métaux lourds (HEIG-VD)

Les métaux lourds étaient mesurés à partir des échantillons séchés à 40 °C et broyés utilisant des têtes de broyage en titane pour éviter toute contamination de métaux lourds. Les échantillons étaient préparés en sachets et étaient envoyés aux laboratoires de WESSLING pour la mesure de Hg avec une limite de quantification de 0.5 ppm et au laboratoire de CEMBL EPFL pour les mesures de Pb, Cu, Ni et Zn avec une limite de quantification de 2.5 ppm et pour la mesure de Cd pour une limite de quantification de 0.5 ppb.

Les échantillons de 10-15 g étaient envoyées au laboratoire WESSLING pour analyser le contenu en Hg. Les échantillons de 3-5 g étaient envoyées au laboratoire CEMBL de l'EPFL pour analyser le contenu en Pb, Cd, Cu, Ni et Zn. Par campagne :

- 3 échantillons sur la zone *RC604*
- 3 échantillons sur la zone *RC601B*
- 3 échantillons sur la zone *RC601H*
- 3 échantillons sur la zone *La Veyre zone intensive*
- 3 échantillons sur la zone *La Veyre talus-plat*

Au laboratoire CEMBL les échantillons étaient sous-traités. Les échantillons étaient digérés dans du HNO₃ par un traitement aux microondes (Micro-Onde Anton Paar Multi Wave Pro) à 200°C pendant 5 minutes, puis mesurés par ICP-OES 9000 Shimadzu et ICP-MS Triple Quad 8900 Agilent (pour le Cd). La mesure de Hg a été effectuée par WESSLING par ICP-OES après avoir été extrait avec l'eau régale.

1.9 LT5 : Analyses des hydrocarbures aromatiques polycycliques

La concentration en HAP était déterminée dans les laboratoires du Service d'Analyses Chimiques de l'HEIA-FR. La méthode d'analyse utilisée pour le dosage des HAP dans ce projet est dérivée de celle décrite par l'office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (OFEP) dans les instructions relatives aux analyses environnementales (Dettwiler et al., 2001) et de la note d'application Thermo Scientific AN313 (Jinshui et al., 2021). Il s'agit d'une extraction par liquide pressurisé (ASE) suivi d'une analyse par chromatographie gazeuse (GC) couplée à un spectromètre de masse (MS).

Pour chaque échantillon le résultat était donné en quantité totale des 16 HAP selon la liste EPA et mentionné dans la section 2.2.1 de l'ORRChim. Deux types d'échantillons y étaient analysés : des échantillons d'herbes coupées, ainsi que les digestats des tests BMP. Contrairement aux plastiques et aux métaux lourds, les HAP pourraient être partiellement dégradés au cours de la digestion anaérobie. De ce fait, il nous paraît pertinent de mesurer ces derniers, avant et après digestion. Il y aura donc :

- 30 échantillons d'herbes
- 30 échantillons de digestat post-BMP, ainsi que leurs blancs respectifs (c.-à-d. les réacteurs ne contenant que de l'inoculum), soit 4 (tests) x 3 (blanc) = 12 échantillons.

Avant d'être envoyé à l'HEIA-FR pour analyse, chaque échantillon sera séché à 40 °C, broyé avec une tête en titane.



1.10 LT6 : Intégration dans le paysage de la méthanisation en Suisse

Les données générées par les analyses effectuées dans les LT2 à LT5 permettent de déterminer quelle est la façon la plus optimale d'intégrer cette ressource en tant que co-substrat dans divers types d'unités de méthanisation présents en Suisse (agricoles et industrielles). Les digesteurs de STEP ne sont pas considérés ici, car leur digestat n'est pas valorisable en tant que fertilisant organique. Cette intégration devra garantir des conditions stables de digestion, tout en assurant que le digestat produit puisse être valorisé en engrais organique selon l'*ORRChim*.

Dans un premier temps, il s'agit d'estimer les quantités de biomasse herbeuse récoltables le long des bords de routes en Suisse. En considérant les caractéristiques physico-chimiques et le potentiel méthanogène moyen provenant des analyses effectuées dans les LT2 à LT5, il s'agit ensuite d'estimer la production d'énergie qui pourrait provenir de la digestion de cette biomasse.

Dans un troisième temps, une appréciation sur l'intégration de ce substrat dans le paysage des installations de biogaz en Suisse sera dressée.

2 Résultats et commentaires

2.1 Mesure de la teneur en MS, du rapport C/N et du potentiel méthanogène

2.1.1 Teneur de matière sèche

La Figure 13 représente les taux de matières sèches des herbes prélevées sur les différentes routes lors des 2 campagnes. Toutes les routes présentent des taux différents : les herbes prélevées lors des deux campagnes de fin de printemps (juin) ont un taux de matière sèche moyenne 20 à 30 %, ce qui est assez faible, alors que les herbes prélevées en fin d'été ont un taux de matière sèche de 20 à 40 %.

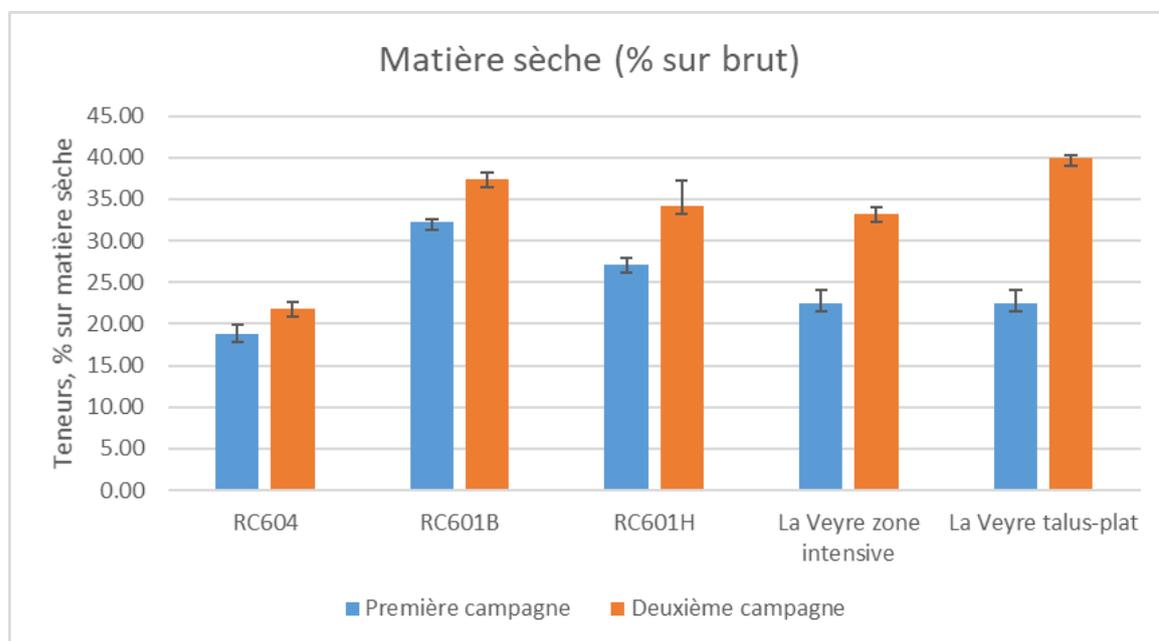


Figure 13 : Taux de matière sèche des différents échantillons d'herbes sur les 2 campagnes (n=3). *RC604* (Route cantonal à faible trafic), *RC601H* (route cantonal à fort trafic-talus contre haut), *RC601B* (route cantonal à fort trafic-talus contre bas),

Les points d'échantillonnage de *RC604* et *RC601B* sont ceux qui présentent les teneurs en matière sèche le plus homogènes, ils sont respectivement d'environ 20% et 35%, avec une augmentation de teneurs d'environ 15% entre la première et la deuxième campagne. Les échantillons des deux campagnes étaient identiques (à l'œil nu) et contenaient des quantités similaires de sable et de petites feuilles. La route *RC604* avait les herbes épaisses alors que la route *RC601B* avait les herbes fines. La route de la *RC601H* suit la même tendance en teneur de matière sèche que celles discutées précédemment avec une augmentation d'environ 25%. Cette route semblait plus similaire de la route *RC601B* avec les herbes fines mais elle avait moins de terre.

Les routes de *La Veyre zone intensive* et *La Veyre talus-plat* présentent deux taux très différents mais cohérents avec la saison. Cela signifie qu'au début de l'été, l'herbe a été échantillonnée alors qu'elle était fraîche et verte, alors qu'à la fin de l'été, la majorité des herbes était déjà sèche avant d'être fauchée. Il est important de noter les conditions météorologiques car ces conditions météorologiques ont un impact sur la détermination de la matière sèche. La nuit et le matin avant l'échantillonnage il pleuvait beaucoup pendant la première campagne alors que pour la seconde campagne il faisait sec et beau. Et par conséquent, les herbes prélevées lors de la campagne de début d'été ont un taux de matière sèche de 22.5%, ce qui est assez faible, alors que les herbes prélevées en fin d'été ont un taux de matière sèche de 33 à 40%. Les échantillons de cette route pendant la première campagne avaient des herbes larges et fines mélangées avec une petite quantité de feuilles et de pailles. Au contraire, lors de la deuxième campagne, les échantillons étaient composés des herbes plus fines et sèches, de feuilles, de pailles fines et de terres.

La route de *La Veyre talus-plat* est celle qui présente la plus forte augmentation de matière sèche d'environ 78%. Au début de l'été les échantillons étaient composés d'herbes larges et épaisses avec une grande quantité de fleurs et de pailles larges fraîches. En fin d'été, la nature des échantillons a visiblement changé : les herbes étaient plus fines avec une quantité accrue d'herbe séchée et de paille séchée.

Ce paramètre est un élément important et doit être prise en compte par un exploitant de biogaz dans le calcul du taux d'incorporation de ces herbes dans le digesteur.



2.1.2 Rapport C/N

La Figure 14 représente le rapport C/N des différents échantillons d'herbes sur les deux campagnes.

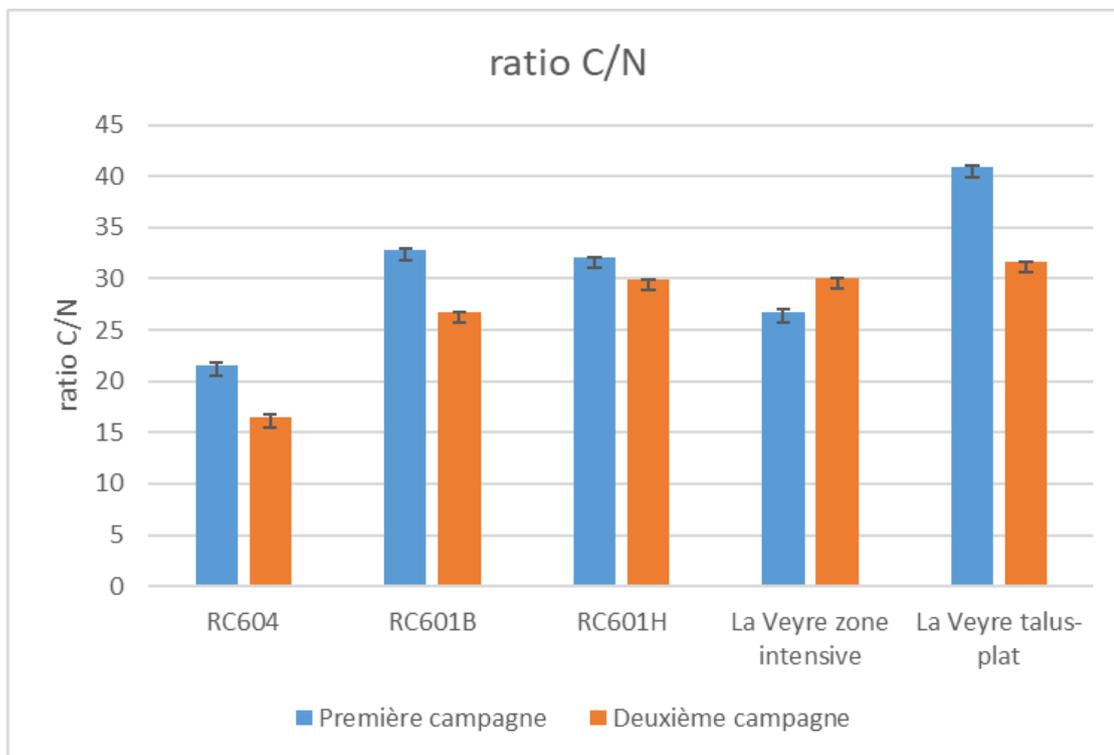


Figure 14 : Ratio de C/N des différents échantillons d'herbes sur les 2 campagnes (n=3). RC604 (Route cantonal à faible trafic), RC601H (route cantonal à fort trafic-talus contre haut), RC601B (route cantonal à fort trafic-talus contre bas),

Les herbes prélevées lors de la première campagne présentaient un ratio C/N de 21/1 à 40/1, alors que le ratio de la deuxième campagne était de 16/1 à 31/1.

L'herbe et les autres végétaux verts ont tendance à avoir une proportion plus élevée d'azote et donc un ratio de C/N plus faible que les herbes/feuilles sèches. Les tontes des herbes ont normalement un rapport C/N de 15-25/1 (forte concentration d'azote) alors que la paille et les feuilles sèches ont un rapport C/N variable de 30-100/1 (Dickson et al., 1991).

Les données obtenues lors de la première campagne (Figure 14) montrent une variation du rapport C/N de 16-32/1 qui est en désaccord avec la littérature car les échantillons contenaient principalement de l'herbe et des fleurs, à l'exception du point d'autoroute *La Veyre zone intensive*. Cela peut s'expliquer par le fait que l'échantillon de la route, *La Veyre zone intensive*, de la seconde campagne contenait plus de pailles et de feuilles sèches que le premier, ce qui a entraîné une plus faible proportion d'azote et donc un rapport C/N plus élevé. L'inverse a été observé pour le point d'autoroute *La Veyre talus-plat* qui présentait plus de pailles sèches dans l'échantillon de la première campagne que dans celui de la deuxième.

Les données du rapport C/N peuvent nous donner un aperçu du processus de décomposition. Les échantillons dont le rapport C/N est compris entre 20/1 et 30/1 (rapport considéré comme idéal) se décomposeront rapidement et complètement (Dickson et al., 1991). Cependant, les échantillons dont le rapport est plus élevé mettent plus de temps à se décomposer. Et plus le rapport est faible, plus la décomposition de la matière organique est rapide.



2.1.3 Potentiel méthanogène

Les points de *La Veyre zone intensive* et *La Veyre talus-plat* de l'autoroute ont un BMP sur la matière fraîche plus faible pour les échantillons prélevés lors de la première campagne (64 NL CH₄/kg MF et 86 NL CH₄/kg MF, respectivement) par rapport à la deuxième campagne (90 NL CH₄/kg MF et 120 NL CH₄/kg MF, respectivement) où les deux points ont une augmentation d'environ 40% du BMP. La route *RC604* suit également la même tendance que les routes mentionnées précédemment, avec une augmentation du BMP de 14% pour les échantillons prélevés lors de la seconde campagne (63 NL CH₄/kg MF). Au contraire, le parcours *RC601B* a connu une diminution d'environ 2,5% du BMP entre la première (113 NL CH₄/kg MF) et la deuxième campagne (110 NL CH₄/kg MF), alors que le point *RC601H* est resté à la même valeur (95 NL CH₄/kg MF). Le BMP des herbes provenant de tous les points d'échantillonnage est plus élevé que le potentiel méthanogène rapporté dans le projet « *COMBINE* » pour l'ensilage d'herbe (environ 50 à 90 NL CH₄/kg MF), ce qui suggère que l'herbe des bords de route (ou de l'herbe en général) pourrait servir de meilleur substrat pour la production de biogaz (Brown et al., 2020; Hensgen et al., 2015; Purwin, 2014; Triolo et al., 2012).

Tableau 1 montre le potentiel méthanogène pour les 5 points d'échantillonnage des deux campagnes sur la base de la matière organique (MO).

Les points de *La Veyre zone intensive* et *La Veyre talus-plat* de l'autoroute ont un BMP sur la matière fraîche plus faible pour les échantillons prélevés lors de la première campagne (64 NL CH₄/kg MF et 86 NL CH₄/kg MF, respectivement) par rapport à la deuxième campagne (90 NL CH₄/kg MF et 120 NL CH₄/kg MF, respectivement) où les deux points ont une augmentation d'environ 40% du BMP. La route *RC604* suit également la même tendance que les routes mentionnées précédemment, avec une augmentation du BMP de 14% pour les échantillons prélevés lors de la seconde campagne (63 NL CH₄/kg MF). Au contraire, le parcours *RC601B* a connu une diminution d'environ 2,5% du BMP entre la première (113 NL CH₄/kg MF) et la deuxième campagne (110 NL CH₄/kg MF), alors que le point *RC601H* est resté à la même valeur (95 NL CH₄/kg MF). Le BMP des herbes provenant de tous les points d'échantillonnage est plus élevé que le potentiel méthanogène rapporté dans le projet « *COMBINE* » pour l'ensilage d'herbe (environ 50 à 90 NL CH₄/kg MF), ce qui suggère que l'herbe des bords de route (ou de l'herbe en général) pourrait servir de meilleur substrat pour la production de biogaz (Brown et al., 2020; Hensgen et al., 2015; Purwin, 2014; Triolo et al., 2012).



Tableau 1 : Valeurs des relatifs BMP sur la matière organique (MO) des substrats testés (n=3). *RC604* (Route cantonal à faible trafic), *RC601H* (route cantonal à fort trafic-talus contre haut), *RC601B* (route cantonal à fort trafic-talus contre bas),

| Routes | Première campagne | | Deuxième campagne | |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | BMP (NL CH ₄ /kg MF) | BMP (NL CH ₄ /kg MO) | BMP (NL CH ₄ /kg MF) | BMP (NL CH ₄ /kg MO) |
| <i>RC604</i> | 55.2 ± 6.7 | 345.2 ± 42 | 63.4 ± 8.4 | 342.1 ± 45.3 |
| <i>RC601B</i> | 113.7 ± 13.9 | 422.5 ± 51.8 | 110.4 ± 9.6 | 349.8 ± 30.3 |
| <i>RC601H</i> | 95.6 ± 1.3 | 392.6 ± 5.4 | 95.6 ± 6.7 | 339.1 ± 23.8 |
| <i>La Veyre zone intensive</i> | 64.5 ± 1.6 | 315.9 ± 8 | 90.8 ± 10.1 | 312.4 ± 34.7 |
| <i>La Veyre talus-plat</i> | 86.8 ± 5.9 | 414.2 ± 28.1 | 120.7 ± 11.8 | 337.4 ± 33 |

Le BMP sur la MO était compris entre 315 et 422 NL CH₄/kg pour la première campagne d'échantillonnage, les échantillons provenant de *La Veyre talus-plat* et de *RC601B* ayant la valeur la plus élevée. Pour la deuxième campagne, tous les échantillons étaient compris entre 312 et 350 NL CH₄/kg. Toutes ces valeurs présentent un BMP plus fort qui permet de les comparer à la littérature comme les valeurs rapportées par (Triolo et al., 2012) à 200 NL CH₄/kg et par (Brown et al., 2020) à 191 NL CH₄/kg. La différence de valeur de BMP trouvée dans cette étude pourrait être due au stockage et à la préservation des herbes. (Purwin, 2014) a étudié l'impact du stockage et de la conservation sur la perte de matière organique qui réduit le potentiel de biométhane du substrat. Il a noté que sans l'utilisation d'additifs, la perte de matière organique pendant la conservation était accrue. La plupart des études mentionnées avaient un certain type de stockage entre 3 et 5 mois, ce qui pourrait avoir un impact sur les valeurs de BMP. Cependant, il est important de considérer que ces études n'ont pas été réalisées en Suisse et que la végétation peut être différente et donc leur contenu en cellulose, lignine, etc. qui aura un impact direct sur la valeur BMP.

(Brown et al., 2020) ont conclu dans une étude récente que les herbes fauchées des bords de route constituent un bon substrat pour la méthanisation, avec un BMP de 191 NL CH₄/kg MO, avec un effet bénéfique de co-digestion avec les substrats agricoles, et qui peut être facilement stocké par ensilage (sans baisse du potentiel méthanogène). Cette étude conclut qu'une valorisation de ces déchets par digestion anaérobie serait attractive financièrement pour les digesteurs agricoles, tout en limitant le coût d'entretien et tout en favorisant la biodiversité des bords de routes.

Le potentiel méthanogène a montré une variation saisonnière, avec les coupes d'été (juillet), l'herbe de bord de route ayant un BMP (NL CH₄/kg MO) plus élevé que les coupes d'automne (fin d'été). Ainsi, cela correspond à la littérature. (Purwin, 2014) ont étudié la composition chimique des herbes de fauches, ainsi que leur potentiel méthanogène. L'herbe issue de la première fauche produit plus de méthane que celle issue d'une fauche tardive (288 contre 215 NL CH₄/kg MO), car les teneurs en cellulose diminuent au cours de la saison (passant de 36 à 23% de la matière sèche).

2.2 Détermination de teneurs en plastiques

2.2.1 Extraction des plastiques

Les macroplastiques (> 5 mm) dans les herbes ont été récupérés manuellement pendant le tamisage à l'eau comme décrit dans la section 1.7. Figure 15 présente l'ensemble des macroplastiques trouvés lors des deux campagnes.

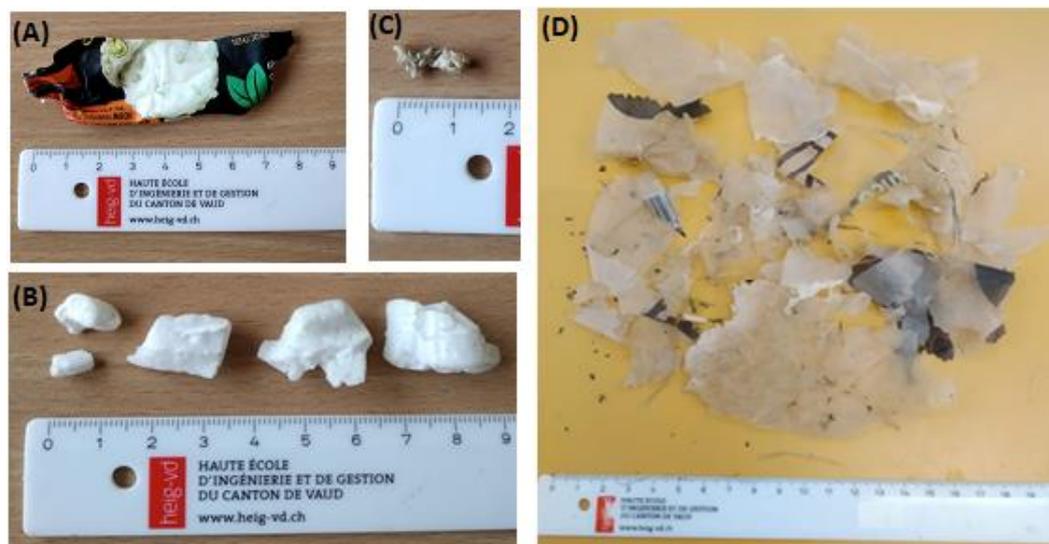


Figure 15: Images de macroplastiques (> 5 mm) trouvés dans les herbes pendant les deux campagnes ; (A) RC601B (première campagne), (B) RC601B (deuxième campagne), (C) RC601H (deuxième campagne) et (D) La Veyre zone intensive (deuxième campagne)

Du macroplastique (> 5 mm) n'a été trouvé que sur trois points d'échantillonnage lors des deux campagnes ; RC601B, RC601H et La Veyre zone intensive. Tableau 2 indique le poids, la taille et le pourcentage de macroplastiques trouvés. La valeur maximale admise par l'ORRChim est de 0.1% (ORRChim, 2005) en rendant supérieures toutes les routes qui se sont avérées avoir une pollution plastique, à l'exception de la route RC601H.

Tableau 2 : Poids et tailles de plastiques (> 5mm) trouvés dans les herbes. RC604 (Route cantonal à faible trafic), RC601H (route cantonal à fort trafic-talus contre haut), RC601B (route cantonal à fort trafic-talus contre bas),

| Routes | Première campagne | | | Deuxième campagne | | |
|-------------------------|-------------------|-------------|------|-------------------|---|------|
| | mg | taille | % | mg | taille | % |
| RC604 | - | - | - | - | - | - |
| RC601 B | 990 | 9.0 x 2.5cm | 3.31 | 60 | 2.5cm x 1.1cm x 0.6cm 0.7cm x 1.2cm x 1.0cm 1.2cm x 0.6cm x 0.6cm 2.0cm x 1.7cm x 0.5cm 0.7cm x 0.5cm x 0.3cm | 0.19 |
| RC601 H | - | - | - | 10 | 0.9cm x 0.2cm x 0.2cm | 0.03 |
| La Veyre zone intensive | - | - | - | 1500 | De nombreuses pièces de différentes tailles (voir Figure 15) | 4.98 |
| La Veyre talus-plat | - | - | - | - | - | - |

La source de la pollution plastique était principalement des déchets sauvages, surtout les emballages alimentaires et le sagex, comme on peut le constater dans Figure 15 ce qui concorde avec le rapport



publié par l'OFEV (OFEV, 2020). Ces analyses confirment la nécessité de nettoyer les routes à faucher des plastiques avant le fauchage ou avant leur introduction dans le méthaniseur pour améliorer la qualité du engrais. La Confédération suisse a dépensé 347 millions pour l'entretien des 1858.9 kilomètres de routes nationales en 2018 (Le Nouvelliste, 2019) ce qui signifie qu'il existe déjà des services en place qui font de nettoyage, de service hivernal, d'entretien des espaces verts, des équipements d'exploitation et de sécurité. En supposant qu'une restructuration légère soit possible, le nettoyage des routes à faucher ne devrait pas entraîner de nouveaux coûts (ou des coûts élevés).

Les microplastiques présents dans les herbes, ont été extraits comme décrit dans la section 1.7, et leurs poids notés avant de les envoyer pour l'analyse thermogravimétrique (ATG). Des microplastiques ont été détectés dans certains des échantillons d'herbe et se présentaient sous différentes formes : fragments et fibres. Figure 16 illustre les fragments et les fibres des microplastiques qui ont été extraits de l'herbe.

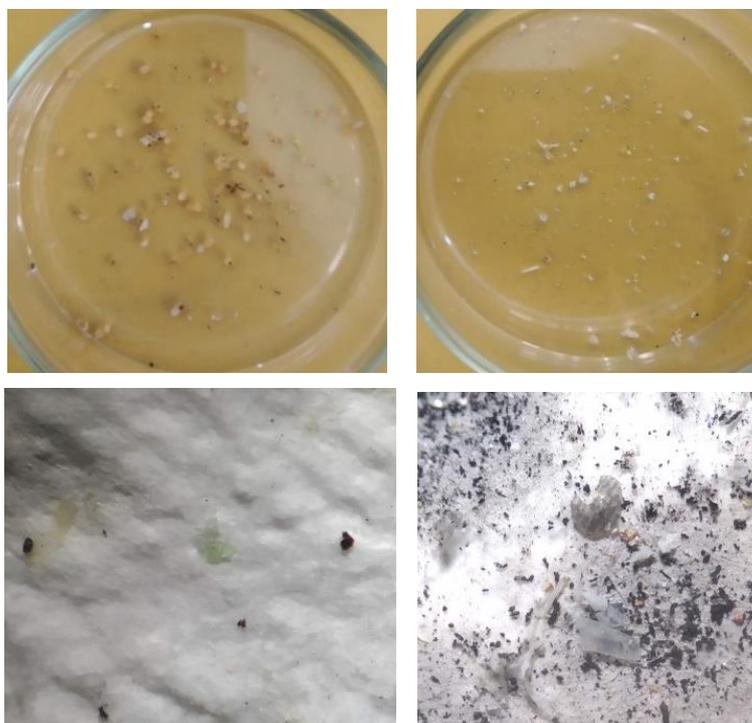


Figure 16 : Images représentatives de microplastiques trouvés dans les herbes pendant les deux campagnes (< 50 μm)

Différentes couleurs de microplastiques ont été observées dans les échantillons d'herbe, notamment le blanc, le noir, le vert et le jaune/beige (Figure 16).

2.2.2 Analyses ATG

Les thermogrammes de polyéthylène (PE) et polystyrène (PS) des macroplastiques (> 5 mm), les matériaux d'emballage et de sagex, trouvés dans l'herbe sont présentés dans la Figure 17. Ces résultats ont été utilisés comme références pour les analyses des microplastiques (< 50 μm).

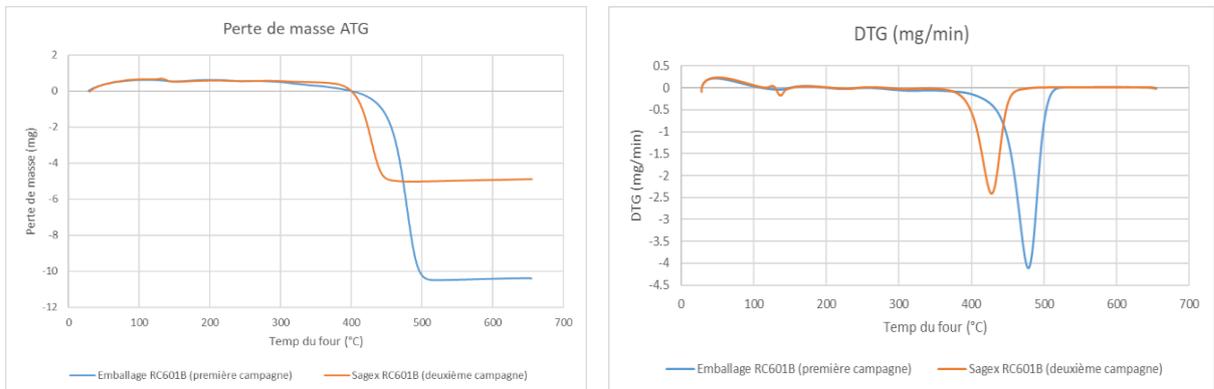
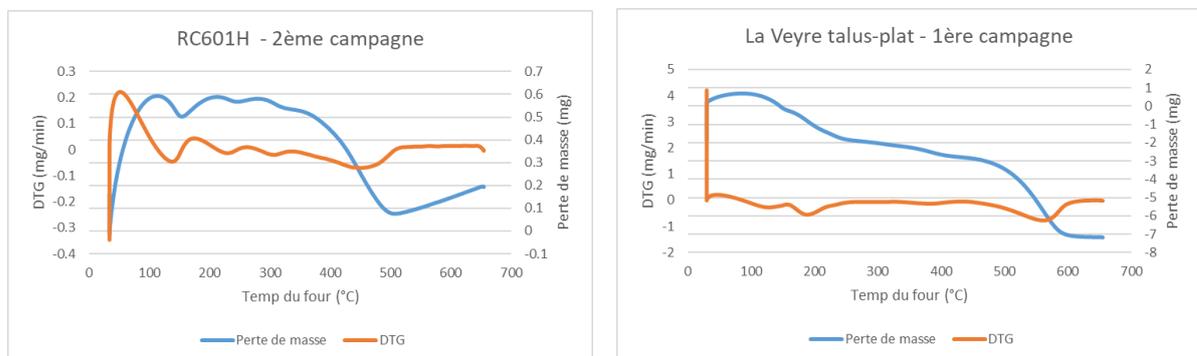


Figure 17 : Thermogrammes des analyses ATG pour la perte de masse (gauche) et DTG (droite) des macroplastiques (> 5 mm)

L'emballage, a la même courbe de tendance que le PE (Yu et al., 2019), et le sagex, qui a la même courbe de tendance que le PS (Yu et al., 2019), se sont dégradés en une seule étape. PE et PS ont commencé à se décomposer à 386 °C, 365 °C ont terminé leur décomposition à 518 °C et 475 °C, et ont connu la perte de poids la plus brutale à 478 °C et 427 °C, respectivement (Figure 17). Les deux polymères se sont presque complètement décomposés laissant environ 18% de résidu de masse de l'emballage (PE) et environ 16% de résidu de masse du sagex (PS). Même si les deux polymères ont une température de décomposition différente, il y avait trop de chevauchement sur les températures de décomposition entre eux pour les identifier positivement sur la base des seules données ATG. Par conséquent, pour caractériser les microplastiques avec précision, il est nécessaire de détecter les produits de décomposition thermique pour ajouter un pouvoir discriminant.

Après l'extraction des microplastiques, tous les fragments et fibres ont également été analysés par ATG. Pour les échantillons provenant de *RC601H* (deuxième campagne) et de *La Veyre talus-plat* (première campagne), nous constatons une augmentation du signal à la plage de températures qui nous intéresse (autour de 360-530 °C pour tous les plastiques). Cependant le signal n'est pas assez net pour confirmer que le pic correspond à du plastique (Figure 18). La perte de poids la plus importante a été enregistrée à 437 °C pour *RC601H* avec 0.06 mg de PS et à 570 °C pour *La Veyre talus-plat* (première campagne) avec 6.26 mg de plastique (Tableau 3).



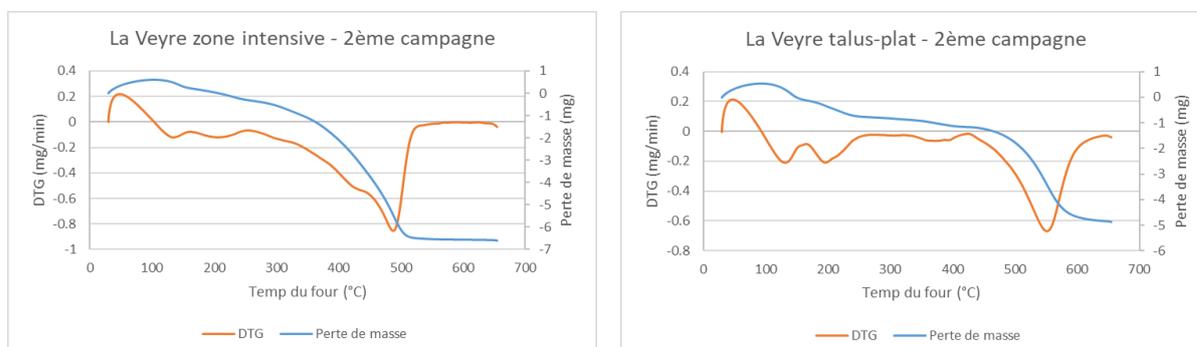


Figure 18 : Thermogrammes des analyses ATG pour la perte de masse et DTG des microplastiques (< 50 µm) extraits

Sur l'échantillon *La Veyre zone intensive* (deuxième campagne), il y a un pic plus net mais qui n'a pas la même forme au début que ceux du plastique. On dirait qu'il est en deux parties, il y a peut-être donc un mélange avec des autres polymères mais pour celui-ci, il s'agit possiblement de plastique (Figure 18). La perte de poids la plus importante a été enregistrée à 501 °C pour 6.15 mg de plastique (Tableau 3). En outre, on peut observer un pic bien net sur le graphique de l'échantillon de *La Veyre talus-plat* (deuxième campagne) mais ce pic se situe au-delà de notre plage de température, donc qu'il ne s'agit pas d'un des plastiques que nous avons comme référence (Figure 17) mais d'autres analyses seraient nécessaires pour découvrir ce que cela pourrait être. Les échantillons dont les données ATG ne correspondaient pas à la courbe des microplastiques ne sont présentés qu'en annexe (voir 9.1).

Tableau 3 : Poids des microplastiques (< 50 µm) trouvés dans les herbes. *RC604* (Route cantonal à faible trafic), *RC601H* (route cantonal à fort trafic-talus contre haut), *RC601B* (route cantonal à fort trafic-talus contre bas),

| Routes | Première campagne | | Deuxième campagne | |
|--------------------------------|-------------------|-------|-------------------|--------|
| | mg | % | mg | % |
| <i>RC604</i> | - | - | - | - |
| <i>RC601 B</i> | - | - | - | - |
| <i>RC601 H</i> | - | - | 0.06 | 0.0002 |
| <i>La Veyre zone intensive</i> | - | - | 6.15 | 0.02 |
| <i>La Veyre talus-plat</i> | 6.26 | 0.021 | 0.66 | 0.002 |

La quantité de microplastiques trouvée et qualifiée par ATG est inférieure à la quantité de plastiques rapportée par *ORRChim* (0.1%) (Tableau 3). Cependant, en combinant les macro et microplastiques trouvés, la limite *ORRChim* est dépassée pour *RC601B* pour environ 3200 % et 90 % pour la première et la seconde campagne respectivement, et de *La Veyre zone intensive* a dépassé environ 4900 % pour la deuxième campagne. Ceci renforce encore la nécessité de mettre en place le nettoyage des parcours pour limiter au maximum la contamination avant l'entrée de l'herbe dans le méthaniseur (voir section 2.2.1 Extraction des plastiques). Par contre, *RC604*, *RC601H* et de *La Veyre talus-plat* sont restés en dessous de la limite *ORRChim*.

2.2.3 Analyses FTIR

Les macroplastiques (> 5 mm) trouvés sur les trois points d'échantillonnage lors des deux campagnes ; *RC601B*, *RC601H* et *La Veyre zone intensive*, ont été soumis à des analyses FTIR pour mieux les caractériser et les qualifier. Figure 19 montre les spectres pour les macroplastiques (> 5 mm).

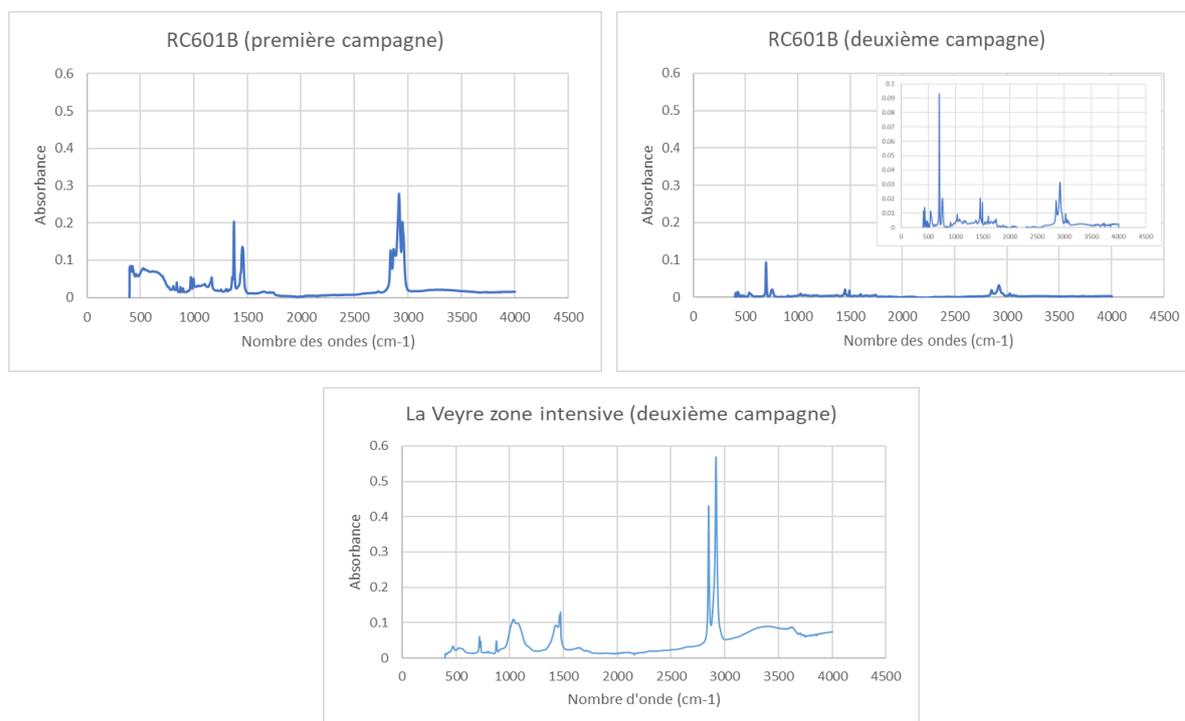


Figure 19 : Spectres FTIR pour les macroplastiques (> 5 mm) trouvés lors des deux campagnes.

Les spectres de la *RC601B* (deuxième campagne) et de *La Veyre zone intensive* (deuxième campagne) présentent des absorptions similaires dominées par des groupes cétoniques (alentours 2950, 2900 cm^{-1}) et des groupes aromatiques ou alcane (1450, 1380, 900 cm^{-1}). Pour *RC601B* (première campagne), les principaux groupes d'absorption étaient les composés aromatiques et les alcènes. L'étirement C-H, les vibrations du squelette et la flexion C-H hors du plan de l'hydrocarbure aromatique mononucléaire dans les composés aromatiques ont provoqué les pics d'absorption aux alentours de 3070, 1500 et 700 cm^{-1} . Les bandes d'environ 1630, 910 et 770 cm^{-1} étaient les bandes caractéristiques de l'alcène, ce qui correspondent à l'étirement de =C-H, C=C et à la flexion de =C-H.

Les trois spectres correspondent aux différents plastiques, comme cela a également été montré dans la 2.2.2 Analyses ATG.

- Le spectre de *RC601B* (première campagne) correspond au spectre du polypropylène
- Le spectre de *RC601B* (deuxième campagne) correspond au spectre du polystyrène
- Le spectre de *La Veyre zone intensive* (deuxième campagne) correspond au spectre du polyéthylène.

Les spectres des standards des plastiques sont présentés en annexe (voir annexe 9.3).

Après l'extraction des microplastiques, les particules trouvées sous forme de petites boules de couleur jaune ont également été analysées par FTIR (Figure 20). Ce spectre est identique au spectre du glyoxal dans l'eau (voir annexe 9.3). Le glyoxal est un composé solide de couleur jaune proche de son point de fusion (15°C). Le glyoxal peut être un produit issu des différentes étapes de l'extraction des microplastiques. Des recherches plus approfondies doivent être menées pour comprendre sa production ; cependant, l'objectif de ce projet n'entre pas en conflit avec celui-ci et n'a donc pas été approfondi.

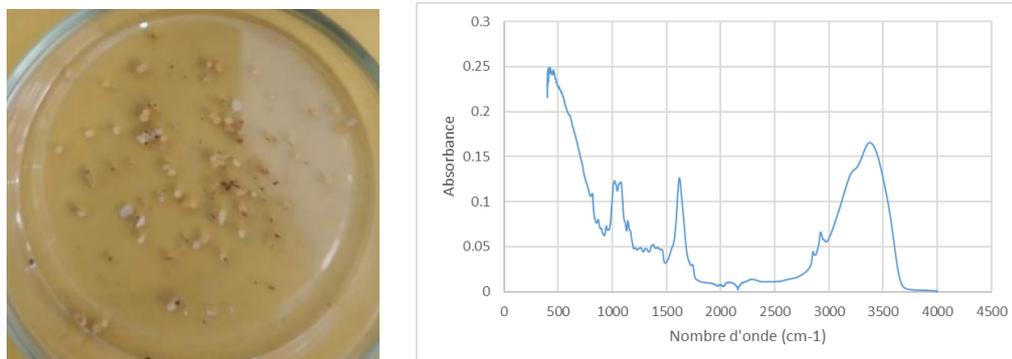


Figure 20 : Image des particules trouvées lors de l'extraction des microplastiques (< 50 µm) (à gauche) et leur spectre FTIR (à droite)

2.3 Détermination des teneurs en métaux lourds

Les concentrations en métaux lourds mesurées sur les herbes sont reportées site par site et comparées aux valeurs limites prescrites par la norme *ORRChim* (ORRChim, 2005), rappelées dans le tableau suivant. En effet, ces valeurs s'appliquent à l'ensemble des amendements organiques.

Tableau 4 : Valeurs limites prescrites par la norme *ORRChim* et valeurs limite de la détection de laboratoires

| Métaux lourds | Teneurs maximales par l'ORRChim (en ppm) | Limite du laboratoire (en ppm) |
|---------------|--|--------------------------------|
| Hg | 1 | 0.5 |
| Pb | 120 | 2.5 |
| Cd | 1 | 0.0005 |
| Cu | 100 | 2.5 |
| Ni | 30 | 2.5 |
| Zn | 400 | 2.5 |

Pour le mercure, plomb, cuivre, nickel et zinc, les valeurs reportées pour les échantillons d'herbes étaient toujours inférieures à la limite de quantification pour les deux campagnes et inférieures à la limite reportée dans l'*ORRChim*. Pour le cadmium, les valeurs reportées étaient inférieures à la limite d'*ORRChim*.

Cependant, il est à noter que pour les échantillons prélevés au bord de l'autoroute *La Veyre zone intensive*, même si les valeurs en teneurs en zinc étaient inférieures à la limite de la norme, il y avait une augmentation d'environ 1.7 fois entre la première et la deuxième campagne (3.454 ± 0.23 ppm pour la première campagne, 5.767 ± 0.46 ppm pour la deuxième campagne) soit 0.86% (première campagne) et 1.4% (deuxième campagne) de la valeur limite de la norme *ORRChim* (400 ppm) (Figure 21). Ce point d'échantillonnage (*La Veyre zone intensive*), était le plus proche de l'autoroute ce qui pourrait expliquer la teneur plus élevée en zinc que les autres échantillons. Une augmentation de la concentration en zinc a également été constatée dans les échantillons du projet « *CARMEN* » (Zdanevitch et al., 2018).

Cette étude montre que la concentration en zinc a augmenté au cours de la conservation/stockage de l'herbe. Dans ce cas, il faut noter que les échantillons de la première et de la deuxième campagne ont été conservés au congélateur pendant un maximum de 4 mois avant d'être envoyés pour analyses, ce



qui a pu avoir un impact sur les concentrations en zinc. Ce phénomène n'est pas encore expliqué et nécessite une recherche expérimentale plus approfondie pour fournir davantage d'information sur les conditions de préservation / stockage, mais comme les valeurs restent très inférieures à la limite, cela ne devrait pas être préoccupant.

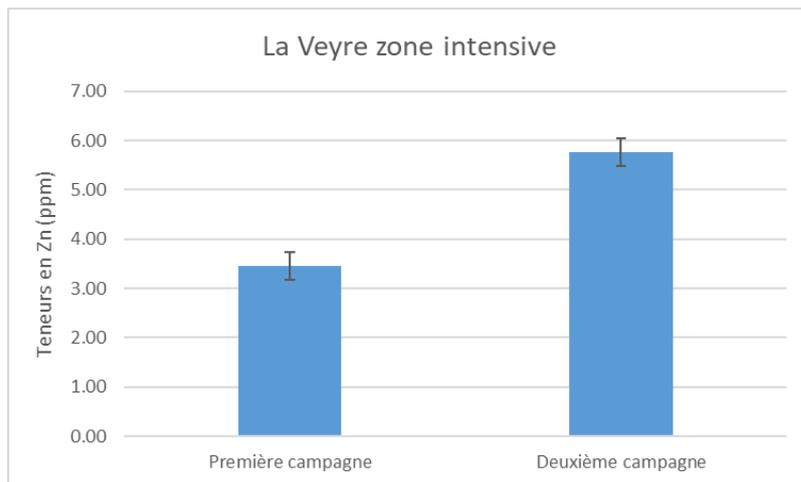


Figure 21 : Teneurs en zinc dans les herbes de *La Veyre zone intensive* pendant les deux campagne (n = 3)

La Figure 22 montre la teneur en cadmium dans l'herbe pour tous les points d'échantillonnage pendant les deux campagnes. Même si la teneur est bien inférieure à la limite indiquée dans l'*ORRChim* (Tableau 4), il est important de noter la différence de teneur en cadmium des différents points d'échantillonnage.

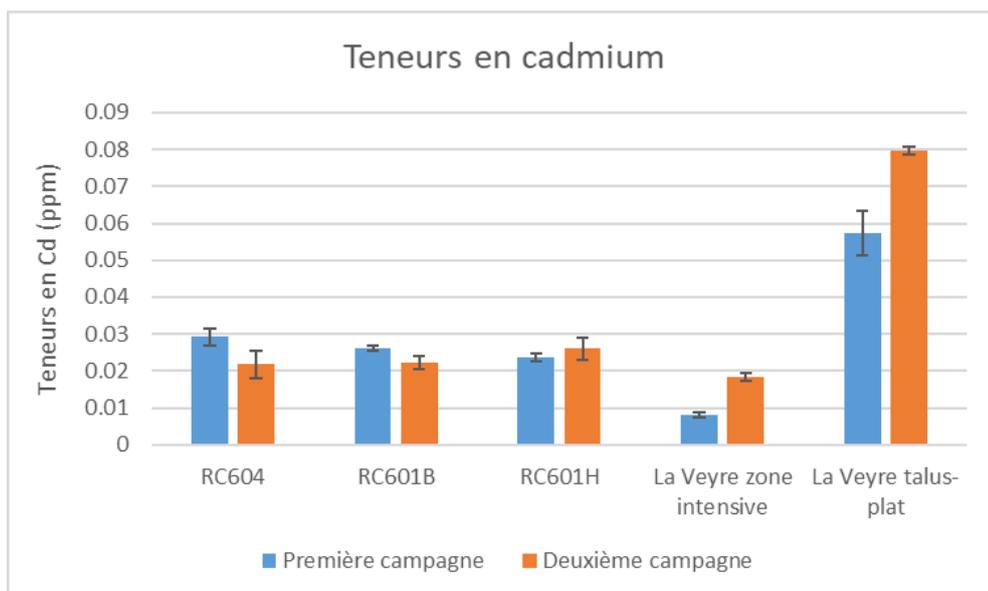


Figure 22 : Teneurs en cadmium dans les herbes pour tous les points d'échantillonnage pendant les deux campagnes (n = 3). *RC604* (Route cantonal à faible trafic), *RC601H* (route cantonal à fort trafic-talus contre haut), *RC601B* (route cantonal à fort trafic-talus contre bas),



Pour le cadmium (Figure 22), à part le point d'échantillonnage *La Veyre talus-plat*, les valeurs sont environ 0.02 - 0.03 ppm pour les deux campagnes soit 2 - 3% de la valeur limite de la norme *ORRChim* (1 ppm). *La Veyre zone intensive* présente la valeur plus basse (0.008 – 0.018 ppm). Au contraire, *La Veyre talus-plat* présente la valeur plus haute (0.05 – 0.07 ppm) qui représente 5 – 7% de la valeur limite fixée par l'*ORRChim*.

Même si certains des échantillons avaient une certaine teneur en métaux lourds, ils sont toujours compatibles avec une utilisation de cette biomasse en méthanisation, avec retour au sol du digestat.

2.4 Analyses des hydrocarbures aromatiques polycycliques

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des constituants naturels du charbon et du pétrole. Dans l'environnement, on les trouve généralement liés à des particules issues de la combustion ou de l'usure de matériaux qui en contiennent, ou sous forme gazeuse dans l'air, pour les plus légers d'entre eux. On procède généralement à l'analyse de 16 HAP que l'Agence de protection de l'environnement (EPA) des Etats-Unis a classés dans sa liste des polluants prioritaires (Keith, 2015) (voir Figure 23).

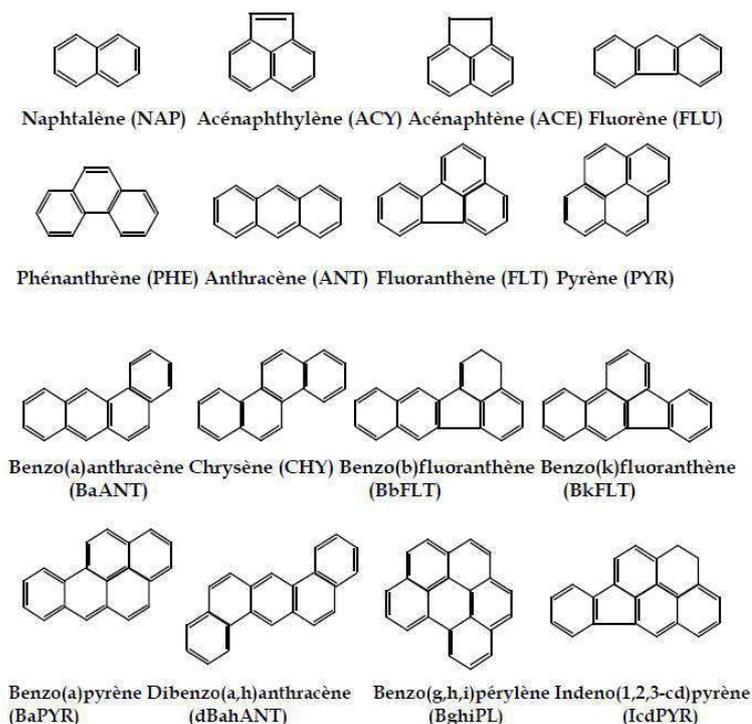


Figure 23 : Les 16 HAP de la liste de EPA (Keith, 2015)

Les concentrations en HAP mesurés sur les herbes sont reportés site par site et comparés aux valeurs limites prescrites par l'*ORRChim* (ORRChim, 2005), rappelées dans le tableau suivant. En effet, ces valeurs s'appliquent à l'ensemble des amendements organiques.

Tableau 5 : Valeurs limites prescrites par la norme *ORRChim* et valeurs limite de la détection de laboratoires

| HAP | Teneurs maximales par l' <i>ORRChim</i> (en ppm) | Limite du laboratoire (en ppm) |
|-----|--|--------------------------------|
|-----|--|--------------------------------|



| | | |
|----------------------|---|------|
| Fluoranthène | 4 | 1 |
| Benzo(b)fluoranthène | 4 | 1 |
| Benzo(a)pyrène | 4 | 0.05 |
| Autres HAPs | 4 | 1 |

Le Tableau 6 présentent, site par site, les concentration (en ppm) des HAP pour chacun des échantillons des deux campagnes pour les herbes fauchées. Les teneurs en HAP dans les herbes fauchées reportées étaient toujours inférieures à la limite de détection et inférieures à la limite de quantification reportée dans l'*ORRChim*. Cela garantit l'état de l'herbe et assure l'absence de ces composés dangereux.

Tableau 6 : Teneurs en HAP dans les herbes fauchées. *RC604* (Route cantonal à faible trafic), *RC601H* (route cantonal à fort trafic-talus contre haut), *RC601B* (route cantonal à fort trafic-talus contre bas),

| Routes | Première campagne | | Deuxième campagne | |
|--------------------------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|
| | Total 16 HAP | Benzo[a]pyrene | Total 16 HAP | Benzo[a]pyrene |
| <i>RC604</i> | < 1 ppm | < 0.20 ppm | < 1 ppm | < 0.20 ppm |
| <i>RC601B</i> | < 1 ppm | < 0.20 ppm | < 1 ppm | < 0.20 ppm |
| <i>RC601H</i> | < 1 ppm | < 0.20 ppm | < 1 ppm | < 0.20 ppm |
| <i>La Veyre Zone intensive</i> | < 1 ppm | < 0.20 ppm | < 1 ppm | < 0.20 ppm |
| <i>La Veyre Talus-Plat</i> | < 1 ppm | < 0.20 ppm | < 1 ppm | < 0.20 ppm |

Étant donné que les échantillons provenant de l'herbe fauché ont tous montré des valeurs inférieures en HAP à celles reportées dans l'*ORRChim* et en raison de la nature complexe de la matrice des échantillons de digestat, ceux-ci n'ont pas fait l'objet d'une analyse plus approfondie de la concentration de HAP. Considérant la stabilité des molécules HAP, il est fort probable qu'aucune modification de leur concentration ne se produira pendant la digestion et que, par conséquent, la concentration en HAP restera inférieure à la limite de détection et à la limite de quantification de l'*ORRChim*.

2.5 Intégration dans le paysage de la méthanisation suisse

2.5.1 Estimations des quantités récoltables le long des bords de routes en Suisse

Afin d'estimer les quantités d'herbes de fauches de bords de routes récoltables, il a été décidé de ne considérer que le gisement provenant de l'entretien des espaces verts le long des routes nationales et cantonales. Il s'agit en effet des espaces verts entretenus les plus importants en termes de surface, et les plus centralisés en termes de gestion et d'entretien. Même si le réseau des routes communales et chemins privés est le plus important en termes de kilométrage, une partie de ce réseau traverse des localités et peut être dépourvu d'accotement herbeux. De plus, l'entretien est à la charge des communes, ce qui rend plus difficile la mise en place d'une collecte des fauches avec exportation du matériel de manière systématique.

Le cadre de cette étude ne consistait pas en un travail d'enquêtes auprès des 26 cantons afin de déterminer sur la base de leur retour le kilométrage de routes ou la surface d'espaces verts entretenus annuellement et leur vision pour le futur pour la mise en place de zones d'entretien différencié avec fauche du matériel et collecte. Le ratio retenu dans cette étude se base sur différentes données compilées provenant de l'étude réalisée dans le canton de Vaud par EREP pour la DGE-DIREN (DGE-



DIREN, 2021). Ces ratios ont été estimés à partir de sources diverses : retour d'expérience de certains fournisseurs d'équipements de fauches avec exportation (NOREMAT), études et projets pilotes mis en place dans certains pays voisins, ainsi que comparaison avec des rendements indicatifs du Mémento Agricole d'Agridea qu'on peut attendre en Suisse pour des surfaces herbagères. L'hypothèse principale est la largeur d'accotement entretenu considérée, ici prise entre 1 et 1.5 m, comme ce qui se fait dans la majorité des essais pilotes réalisés en Europe.

REMARQUES

Le ratio qui est retenu pour la suite de l'étude et la quantification de la biomasse herbeuse potentiellement récoltable le long des routes suisses est le suivant : **entre 2 et 3 tonnes MF/km route/an.**

Il s'agit donc d'un tonnage total en termes de matière brute d'herbe, par kilomètre total de routes (et non de km entretenu ou parcouru par la machine, ou km d'accotement, qui est en fait doublé par rapport à la longueur de la route) et par an, indépendamment du nombre de fauches annuelles.

Il s'agit d'un ratio à considérer avec grande prudence étant donné que celui-ci peut varier fortement, et notamment selon :

- La largeur d'accotement (ou largeur de bords de routes entretenue)
- Le nombre de fauches annuelles et la fréquence de l'entretien
- Les zones entretenues (accotement et/ou fossés et/ou talus)
- La période d'intervention
- Les conditions climatiques annuelles et les conditions agronomiques
- Le type et la variété des espèces présentes (prairies grasses, maigres...)

Il faut aussi noter que l'exportation de la biomasse a pour conséquence à terme (selon la bibliographie) la diminution du rendement de production de biomasse herbeuse.

Le tableau ci-après présente la longueur des tronçons routiers par type de routes (nationales et cantonales, source OFS 2021), en kilomètre, par canton, ainsi que les fourchettes de quantités biomasse herbeuse en matière brute qui pourraient être récoltées en appliquant le ratio ci-dessus.

Tableau 7 : Longueur des tronçons routiers par type de routes nationales et cantonales en Suisse (source : OFS 2021)

| | Routes nationales [km] | Routes cantonales [km] | Quantités d'herbes [tMF/an] |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|
| Région lémanique | 395 | 4'103 | Entre 9'000 et 13'500 |
| Vaud | 205 | 2'135 | Entre 4'700 et 7'000 |
| Valais | 163 | 1'710 | Entre 3'700 et 5'600 |
| Genève | 27 | 258 | Entre 570 et 850 |
| Espace Mittelland | 540 | 4'080 | Entre 9'200 et 13'900 |
| Berne | 285 | 2'022 | Entre 4'600 et 6'900 |
| Fribourg | 90 | 631 | Entre 1'400 et 2'100 |
| Soleure | 44 | 609 | Entre 1'300 et 2'000 |
| Neuchâtel | 68 | 373 | Entre 900 et 1'300 |
| Jura | 55 | 445 | Entre 1'000 et 1'500 |
| Suisse du Nord-Ouest | 184 | 1'886 | Entre 4'100 et 6'200 |



| | | | |
|-------------------------|--------------|---------------|-------------------------------|
| Bâle-Ville | 10 | 305 | Entre 600 et 900 |
| Bâle-Campagne | 69 | 425 | Entre 1'000 et 1'500 |
| Argovie | 106 | 1'156 | Entre 2'500 et 3'800 |
| Zurich | 187 | 1'582 | Entre 3'500 et 5'300 |
| Suisse orientale | 521 | 3'372 | Entre 7'800 et 11'700 |
| Glaris | 26 | 119 | Entre 300 et 400 |
| Schaffhouse | 12 | 232 | Entre 500 et 700 |
| Appenzell Rh.-Ext. | 11 | 215 | Entre 500 et 700 |
| Appenzell Rh.-Int. | 4 | 58 | Entre 100 et 200 |
| Saint-Gall | 163 | 655 | Entre 1'600 et 2'500 |
| Grisons | 225 | 1'359 | Entre 3'200 et 4'800 |
| Thurgovie | 79 | 734 | Entre 1'600 et 2'400 |
| Suisse centrale | 264 | 1'184 | Entre 2'900 et 4'300 |
| Lucerne | 59 | 523 | Entre 1'200 et 1'700 |
| Uri | 70 | 152 | Entre 400 et 700 |
| Schwytz | 50 | 218 | Entre 500 et 800 |
| Obwald | 37 | 83 | Entre 200 et 400 |
| Nidwald | 26 | 74 | Entre 200 et 300 |
| Zoug | 23 | 133 | Entre 300 et 500 |
| Tessin | 163 | 1'012 | Entre 2'400 et 3'500 |
| TOTAL | 2'255 | 17'219 | Entre 39'000 et 58'000 |

Au total, cela pourrait représenter une quantité de biomasse herbeuse **entre 39'000 et 58'000 tMF/an**.

2.5.2 Potentiel de production d'énergie à partir de cette biomasse

Les caractéristiques physico-chimiques retenues (MS, MO) pour l'estimation du bilan-matière et l'évaluation du potentiel énergétique ci-après sont des valeurs moyennes obtenues sur les 5 différents points d'échantillonnage et lors des 2 campagnes de prélèvement. Une valeur dans une fourchette conservative a été choisie pour le rendement en biogaz attendu (voir Tableau 8).

Tableau 8 : Caractéristiques physico-chimiques retenues pour les herbes fauchées

| Intrants | Matière sèche [% de MF] | Matière organique [% de MS] | Rendement méthane [Nm ³ CH ₄ /tMO] | Rendement biogaz [Nm ³ biogaz/tMO] | % de CH ₄ |
|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|--|---|----------------------|
| Herbes de fauches de bords de routes | 29 | 87 | 350 | ~ 600 | 55 |

En considérant le bilan-matière de la méthanisation de ces herbes de bords de routes, on obtiendrait les deux figures simplifiées suivantes, selon les deux extrémités de la fourchette considérée en termes de tonnage potentiellement récoltable par année (entre 39'000 et 58'000 tMF/an) :

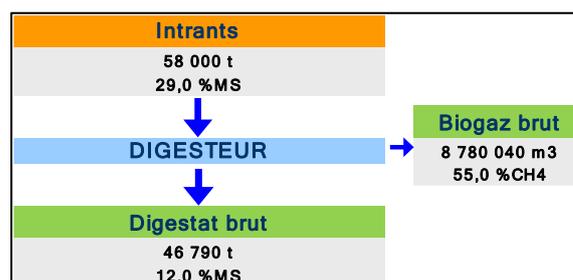
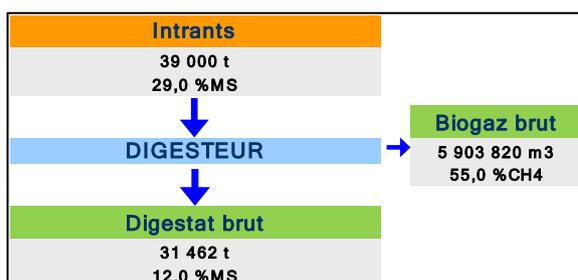




Figure 24 : Bilan-matière selon tonnage fourchette basse (gauche) et haute (droite)

Il s'agit de bilan-matières très simplifiés et sommaires, et qui seraient à adapter selon les autres intrants à digérer avec ces herbes, et dont dépendrait une technologie de méthanisation ou l'autre. Au total, **entre 5'900'000 et 8'800'000 Nm³ de biogaz** pourraient être produits annuellement. Entre 31'400 et 46'800 tonnes de digestat brut seraient aussi produites annuellement ; qui serait intégré à celui déjà issu des installations puisqu'on pratiquerait la codigestion.

Nous ne préconisons pas une installation de monodigestion centralisée qui traiterait toute cette biomasse (distances et temps de transports, consommation de carburant, aspects biologiques du processus) mais plutôt de répartir cette biomasse entre les différentes installations existantes, pour de la codigestion.

L'une des voies de valorisation du biogaz possible est la valorisation par cogénération, ou couplage chaleur-force. La cogénération est la production simultanée d'électricité et de chaleur au moyen d'un co-générateur. La quantité d'énergie électrique produite s'élèverait entre 13'550'000 et 20'160'000 kWh_{el} et la quantité d'énergie thermique entre 13'900'000 et 21'120'000 kWh_{th} (sans tenir compte de l'autoconsommation d'électricité pour les équipements de valorisation du biogaz ni de chaleur pour le chauffage du digesteur).

Une autre voie de valorisation du biogaz est l'injection dans le réseau de gaz naturel. Avant d'y être injecté ou être directement valorisé en tant que carburant, le biogaz doit subir un processus d'épuration afin d'atteindre les standards du gaz naturel. Pour ce faire, les composants, autres que le méthane, doivent être séparés de celui-ci. On désigne le biogaz épuré et donc enrichi sous le terme « biométhane ». La méthanisation de cette biomasse herbeuse permettrait d'injecter entre 400 et 600 Nm³/h de biométhane dans le réseau de gaz naturel, ce qui correspond à une énergie potentielle contenue dans le biogaz épuré entre 35'700'000 et 53'100'000 kWh_{PCS} par an.

2.5.3 Intégration dans le paysage du biogaz en suisse

Un certain nombre de conditions de nature technique, réglementaire et économique devraient être prises en compte afin d'apprécier la possibilité d'intégrer cette biomasse herbeuse dans les installations de biogaz, en Suisse.

Au plan de la logistique, il y aura lieu de vérifier que les zones d'implantation des installations de biogaz pourraient correspondre à des distances raisonnables de transport afin de leur livrer les herbes fauchées sur les réseaux routiers. On constate par exemple que les cantons du Valais, des Grisons ou du Tessin, qui comportent un réseau routier relativement important, ne disposent que de peu d'installations de biogaz.

Il sera également nécessaire de contrôler que les infrastructures de stockage qu'on y trouve permettraient d'y stocker des livraisons pouvant fluctuer selon les saisons.

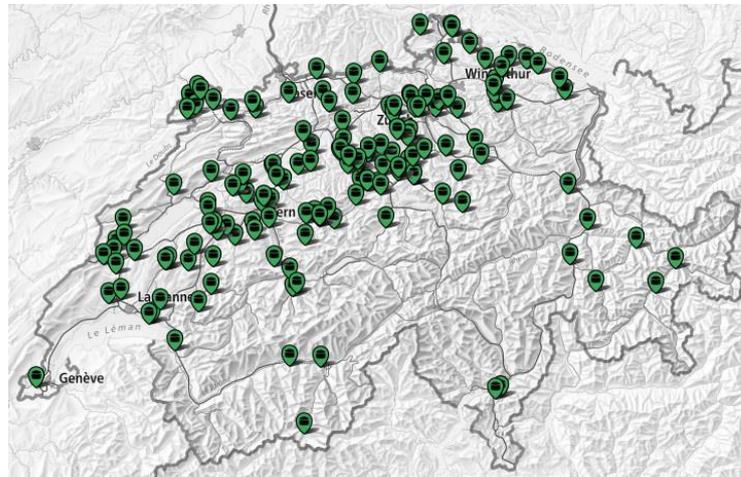


Figure 25 : Installations de biogaz au bénéfice de la RPC en Suisse (source : map.geo.admin)

D'un point de vue technique, les digesteurs en voie liquide de type infiniment mélangé devront être en mesure d'accepter l'augmentation de la teneur en matière sèche dans le substrat à méthaniser en raison de l'ajout de biomasse herbeuse. Pour les digesteurs en voie solide à alimentation continue (Kompogas et autres) un broyage des herbes pourrait s'avérer nécessaire avant incorporation dans ces systèmes. Enfin, les digesteurs en voie solide à alimentation discontinue appelés également fermenteurs-garages (Bekon, Renergon) pourront accepter sans modification technique ou prétraitement l'incorporation de biomasse herbeuse.

Pour toutes ces technologies des contrôles des paramètres de fonctionnement, notamment la charge organique volumique, devront être effectués.

Au plan réglementaire on devra veiller à ce que la biomasse herbeuse qui s'ajouterait aux intrants déjà acceptés par l'installation de biogaz soit compatible et conforme à l'autorisation d'exploiter du site.

Quant aux installations agricoles de biogaz, dont la grande majorité bénéficie du système de soutien à la production d'électricité renouvelable (RPC, SRI), il faut savoir que l'octroi du bonus biomasse agricole leur impose de limiter à un maximum de 20% de la matière fraîche traitée la part des substrats non agricoles. Pour les exploitants qui opèrent, pour la plupart, leurs installations près de cette limite il conviendra d'évaluer l'intérêt économique de remplacer tout ou partie des co-substrats non agricoles par de la biomasse herbeuse.

Dans le contexte helvétique qui se caractérise par une saturation du marché des co-substrats industriels ou communaux et par des perspectives topographiques et agronomiques limitées pour le développement de cultures à vocation énergétique, l'option consistant à mobiliser les herbes fauchées sur les bords des routes pour alimenter des installations de biogaz pourrait constituer une intéressante opportunité.

3 Conclusions et résumé

L'objectif du projet MethaRoad était d'étudier les niveaux de polluants (hydrocarbures aromatiques polycycliques, micro et macroplastiques, et métaux lourds) dans l'herbe des bords de route afin de s'assurer de leur compatibilité en tant que substrat dans la digestion anaérobie pour la production d'énergie, puis en tant qu'engrais. Cinq points d'échantillonnage au cours de deux campagnes de prélèvements de juin (première campagne) et de septembre (deuxième campagne) ont été choisis.



Pour le mercure, le plomb, le cuivre, le nickel et le zinc, les valeurs rapportées pour les échantillons d'herbe étaient toujours inférieures à la limite rapportée dans l'ORRChim. La teneur en HAP dans les échantillons d'herbe fauchée était toujours à la limite de quantification de l'ORRChim. Cela garantit l'état de l'herbe et assure l'absence de ces composés dangereux. La quantité de microplastiques (< 50 µm) trouvée et qualifiée par ATG et FTIR est inférieure à la quantité de plastiques rapportée par l'ORRChim. Cependant, lorsqu'on combine les macro (> 5 mm) et microplastiques trouvés, la limite ORRChim est dépassée pour toutes les routes échantillonnées, sauf une. Ceci montre l'importance et la nécessité du nettoyage des routes afin d'assurer la propreté du substrat avant son utilisation dans le digesteur anaérobie. Ainsi, on garantit la qualité du digestat pour son retour au sol sous forme d'engrais.

Toutes les routes présentent des taux de matières sèches différents: les herbes prélevées lors des deux campagnes de fin de printemps (juin) ont un taux de matière sèche moyenne d'environ 20 à 30 %, alors que les herbes prélevées en fin d'été montrent un taux de matière sèche de 20 à 40 %. Pour le rapport C/N, les herbes prélevées lors de la première campagne présentaient un ratio C/N de 21/1 à 40/1, alors que le ratio de la deuxième campagne était de 16/1 à 31/1.

Le BMP sur la MO était compris entre 315 et 422 NL CH₄/kg pour la première campagne d'échantillonnage. Pour la deuxième campagne, tous les échantillons étaient compris entre 312 et 350 NL CH₄/kg. Toutes ces valeurs ont un BMP plus élevé par rapport à la littérature.

De plus, la conformité des substrats à l'ORRChim (en termes de polluants) suggère leur utilisation en digestion anaérobie pour la production de biométhane et de fertilisants.

En termes de tonnages, cette biomasse herbeuse provenant de l'entretien des bords de routes (nationales et cantonales) pourrait être de l'ordre de 39'000 à 58'000 tMF/an. Il s'agit d'une fourchette à considérer avec grande attention, puisque cela variera selon un très grand nombre de paramètres. En tenant compte des caractéristiques physico-chimiques moyennes obtenues après analyses, entre 5'900'000 et 8'800'000 Nm³ (soit entre 32 et 48 GWh_{PCI}) de biogaz pourraient être produits annuellement, qui pourrait être valorisé par cogénération ou injection dans le réseau de gaz naturel par exemple. Néanmoins, un certain nombre de conditions de nature technique, réglementaire et économique devraient être prises en compte afin d'apprécier la possibilité d'intégrer cette biomasse herbeuse dans les installations de biogaz, en Suisse.

4 Aperçu et mise en œuvre prochaine

Les résultats de cette étude sur l'utilisation de l'herbe dans la digestion anaérobie pour la production de biogaz sont prometteurs. Cependant, des investigations complémentaires sont nécessaires pour valider les conclusions qui ont été tirées.

Les recherches complémentaires devraient considérer les effets potentiels du stockage sur les herbes et donc sur la production de biogaz. Des paramètres tels que la température et les additifs devraient être étudiés pour s'assurer qu'il n'y a pas de dégradation de l'herbe pendant le stockage. Il s'agirait également de vérifier les résultats en utilisant davantage d'échantillons provenant de plus de régions. En outre, le développement et la démonstration d'une méthodologie efficace pour l'extraction et la quantification des microplastiques devraient être étudiée pour améliorer la qualité des résultats.

5 Coopération nationale et internationale

Ce projet ne participe pas à une coopération internationale. Au plan national, il participe à une coopération entre divers entités publiques (HEIG-VD, HEIA-FR) et privée (EREP SA).



6 Communication

Vu que pour l'instant, la législation suisse ne prévoit pas la valorisation par méthanisation des herbes de fauche de bords de routes, le rapport final ainsi que ses conclusions seront tout d'abord communiqués aux offices fédéraux pertinents, tels que l'OFEV, l'OFEN, l'OFAG, et les autorités cantonales.

S'il est décidé que la législation peut être assouplie, les résultats principaux, les conclusions de l'étude ainsi que la nouvelle législation seront diffusées par Biomasse Suisse auprès des parties prenantes, telles que les autorités cantonales compétentes et les organismes gérant des unités de méthanisation. Le mode de communication ici reste à définir, mais il pourra inclure un courrier postal avec une petite brochure ou un papillon explicatif, un article dans la newsletter de Biomasse Suisse, et une présentation lors d'une journée Biomasse Suisse (pour autant que Biomasse Suisse accepte et puisse assurer ces tâches).

7 Publications

Aucun document n'a encore été publié.

8 Bibliographie

- AA.VV. (2014). *BAT's and best practices for grass residue collection and valorization, Report of the IEE GR3 "Grass as a Green Gas Resource: Energy from landscapes by promoting the use of grass residues as a renewable energy resource."* https://issuu.com/biogas-e/docs/state_of_the_art_report_-_best_prac
- Brown, A. E., Ford, J. S., Bale, C. S. E., Camargo-Valero, M. A., Cheffins, N. J., Mason, P. E., Price-Allison, A. M., Ross, A. B., & Taylor, P. G. (2020). An assessment of road-verge grass as a feedstock for farm-fed anaerobic digestion plants. *Biomass and Bioenergy*, 138, 105570. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105570>
- Bryselbout, C., Henner, P., Carsignol, J., & Lichtfouse, É. (2000). Polycyclic aromatic hydrocarbons in highway plants and soils. Evidence for a local distillation effect. *Analisis*, 28(4), 290–293. <https://doi.org/10.1051/analisis:2000280290>
- Cheffins, N. (2015). A Feasibility Study into the Utilisation of Anaerobic Digestion to Sustain the Harvesting of Low Input High Diversity Road Verge Biomass. *Peakhill Associates, Lincoln*.
- Crépineau-Ducoulombier, C., Tankari Dan-Badjo, A., & Rychen, G. (2004). PAH contamination of the grass *Lolium perenne* exposed to vehicular traffic. [Http://Dx.Doi.Org/10.1051/Agro:2004047](http://Dx.Doi.Org/10.1051/Agro:2004047), 24. <https://doi.org/10.1051/agro:2004047>
- Dettwiler, J., Gupta, S., Karlanganis, G., Schmid, P., & Zihler, J. (2001). *Analyses des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les sols par GC/MS*.
- DGE-DIREN. (2021). *Potentiel de valorisation énergétique de la biomasse herbeuse et ligneuse des bords des routes vaudoises*.
- Dickson, N., Richard, T., & Kozlowski, R. (1991). *Composting to Reduce the Waste Stream - A Guide to Small Scale Food and Yard Waste Composting*.
- EREP SA, & Energie-bois Suisse. (2021). *Potentiel de valorisation énergétique de la biomasse*



herbeuse et ligneuse des bords des routes vaudoises.

- Erny, I., O'Connor, I., & Spörri, A. (2020). *Le plastique dans l'environnement Suisse. Rapport pour l'OFEV.*
- Hensgen, F., MichaelWachendorf, & Meike, N. (2015). *Converting Organic Matters from European urban and natural areas into storable Bio-Energy.*
- Ho, Y. B., & Tai, K. M. (1988). Elevated levels of lead and other metals in roadside soil and grass and their use to monitor aerial metal depositions in Hong Kong. *Environmental Pollution*, 49(1), 37–51. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0269-7491\(88\)90012-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0269-7491(88)90012-7)
- Jinshui, C., Guifeng, D., Lina, L., & Kettle, A. (2021). *Accelerated Solvent Extraction GC-MS analysis and detection of PAH in soil.* AN313, Thermo Fischer Scientific.
- Keith, L. H. (2015). The Source of U.S. EPA's Sixteen PAH Priority Pollutants. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 35(2–4), 147–160. <https://doi.org/10.1080/10406638.2014.892886>
- Khalid, N., Hussain, M., Young, H., Boyce, B., Aqeel, M., & Noman, A. (2018). Effects of road proximity on heavy metal concentrations in soils and common roadside plants in Southern California. *Environmental Science and Pollution Research*, 25. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3218-1>
- Le Nouvelliste. (2019). *L'entretien des routes nationales a coûté 347 millions en 2018.* <https://www.lenouvelliste.ch/suisse/l-entretien-des-routes-nationales-a-coute-347-millions-en-2018-861204>
- Li, F.-R., Kang, L.-F., Gao, X.-Q., Hua, W., Yang, F.-W., & Hei, W.-L. (2007). Traffic-Related Heavy Metal Accumulation in Soils and Plants in Northwest China. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 16(5), 473–484. <https://doi.org/10.1080/15320380701490168>
- Li, Q., Wu, J., Zhao, X., Gu, X., & Ji, R. (2019). Separation and identification of microplastics from soil and sewage sludge. *Environmental Pollution*, 254, 113076. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113076>
- OFEV. (2018). *Liste des déchets se prêtant au compostage ou à la méthanisation. Une partie du module consacré aux biodéchets de l'aide à l'exécution relative à l'ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets.*
- OFEV. (2020). *Les matières plastiques dans l'environnement.* <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dechets/info-specialistes/politique-des-dechets-et-mesures/matieres-plastiques-environnement.html>
- ORRChim. (2005). *Ordonnance sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux.*
- Purwin, C. (2014). Methanogenic potential of biomass from roadside verges preserved with various additives. *Environmental Biotechnology*, 10, 18–22. <https://doi.org/10.14799/ebms227>
- Rodríguez-Flores, M., & Rodríguez-Castellón, E. (1982). Lead and cadmium levels in soil and plants near highways and their correlation with traffic density. *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*, 4(4), 281–290. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0143-148X\(82\)90014-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0143-148X(82)90014-3)
- Tankari Dan-Badjo, A., Rychen, G., & Ducoulombier, C. (2008). Pollution maps of grass contamination by platinum group elements and polycyclic aromatic hydrocarbons from road traffic. [Http://Dx.Doi.Org/10.1051/Agro:2008032](http://Dx.Doi.Org/10.1051/Agro:2008032), 28. <https://doi.org/10.1051/agro:2008032>
- Triolo, J. M., Pedersen, L., Qu, H., & Sommer, S. G. (2012). Biochemical methane potential and anaerobic biodegradability of non-herbaceous and herbaceous phytomass in biogas production. *Bioresource Technology*, 125, 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.079>



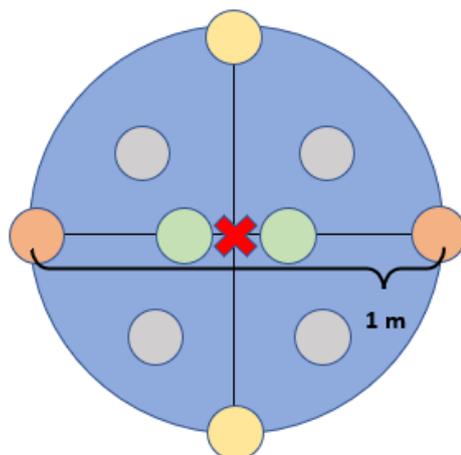
- Viard, B., Pihan, F., Promeprat, S., & Pihan, J.-C. (2004). Integrated assessment of heavy metal (Pb, Zn, Cd) highway pollution: bioaccumulation in soil, Graminaceae and land snails. *Chemosphere*, *55*(10), 1349–1359. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.01.003>
- Viskari, E.-L., Rekilä, R., Roy, S., Lehto, O., Ruuskanen, J., & Kärenlampi, L. (1997). Airborne pollutants along a roadside: Assessment using snow analyses and moss bags. *Environmental Pollution*, *97*(1), 153–160. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(97\)00061-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0269-7491(97)00061-4)
- Yu, J., Wang, P., Ni, F., Cizdziel, J., Wu, D., Zhao, Q., & Zhou, Y. (2019). Characterization of microplastics in environment by thermal gravimetric analysis coupled with Fourier transform infrared spectroscopy. *Marine Pollution Bulletin*, *145*, 153–160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.05.037>
- Zdanevitch, I., Lencauchez, J., Duffo, L., Pineau, C., Andre, L., & Ribeiro, T. (2018). *CARMEN - Caractérisation des HAP et des métaux dans les herbages fauchés en bord de routes pour la MEtha-nisation*.



9 Annexes

9.1 Protocole d'échantillonnage de l'herbe fauchée de bords de routes

- 1) Choisir un endroit pour le prélèvement, et se placer en un point (✗) dans la zone désirée.
- 2) Noter les informations caractéristiques du lieu : photos, coordonnées GPS, météo, distance linéaire de la chaussée...
- 3) Poser la balance à côté et le bac de mélange dessus, et tarer.
- 4) Positionner une barre d'un mètre d'abord de manière horizontale, avec en son milieu le point.
- 5) Prendre 5 poignées d'herbes fauchées à chaque extrémité (●) de la barre et les mettre dans le bac de mélange.
- 6) Puis prendre 5 poignées d'herbes provenant de deux points au milieu de la barre (●) et les mettre dans le bac de mélange.
- 7) Tourner la barre de façon verticale (de 90°).
- 8) Prendre 5 poignées d'herbes fauchées à chaque extrémité de la barre (●) et les mettre dans le bac de mélange.
- 9) Enfin, prendre 5 poignées à l'intérieur du cercle de diamètre 1m formé par la barre, dans chaque quartier de cercle (●) et les mettre dans le bac de mélange.



- 10) Si le poids obtenu est supérieur à 6 kg, passer à la suite, sinon recommencer la même opération jusqu'à obtenir au minimum 6 kg d'herbe (points 4 à 9 ci-dessus).
- 11) Mélanger à la main les herbes dans le bac, bien homogénéiser.
- 12) Remplir trois sacs de congélation de 2 kg chacun (en les pesant à chaque fois) et bien les fermer.
- 13) Etiqueter les sacs (dates et lieu de prélèvement).



9.2 Thermogrammes des analyses ATG pour la perte de masse et DTG des échantillons pour tous les points d'échantillonnage



Figure 26 : Thermogrammes des analyses ATG pour la perte de masse et DTG des plastiques



9.3 Spectres FTIR des macroplastiques, y compris les spectres de la référence

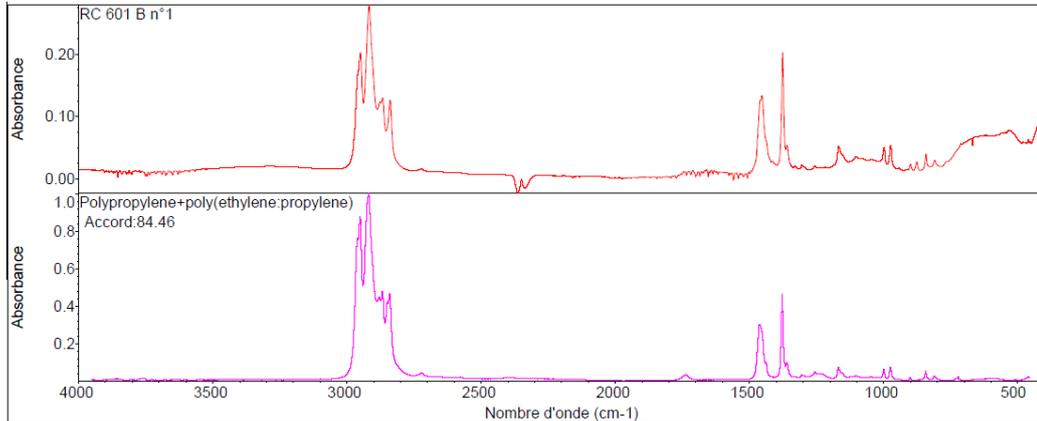


Figure 27 : Spectres FTIR du macroplastique trouvé à RC601B pendant la première campagne et sa référence

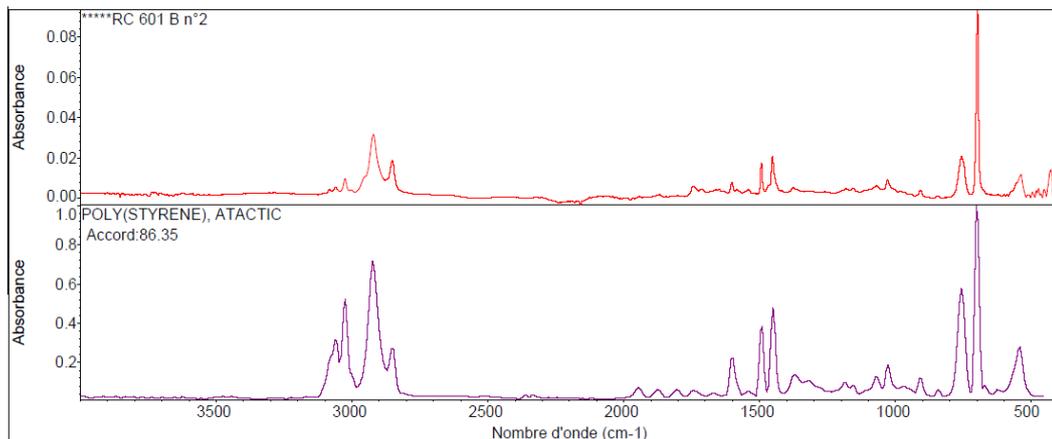


Figure 28 : Spectres FTIR du macroplastique trouvé à RC601B pendant la deuxième campagne et sa référence

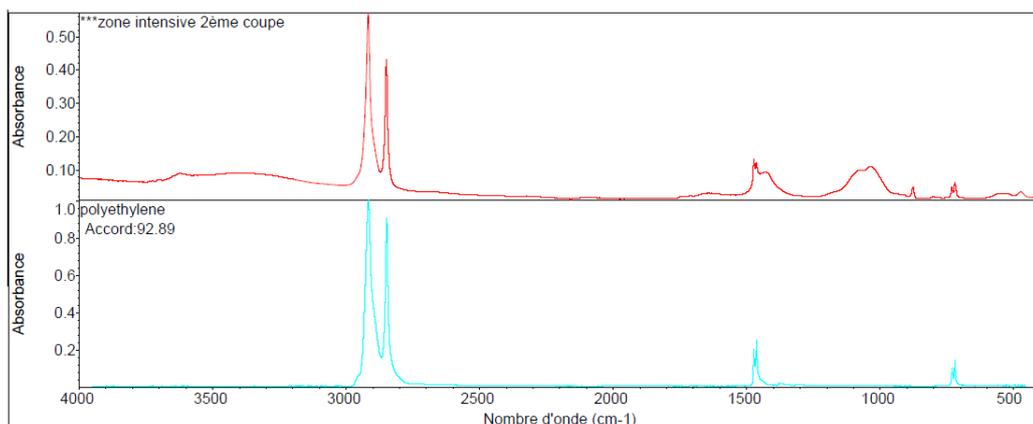


Figure 29 : Spectres FTIR du macroplastique trouvé à La Veyre zone intensive pendant la deuxième campagne et sa référence

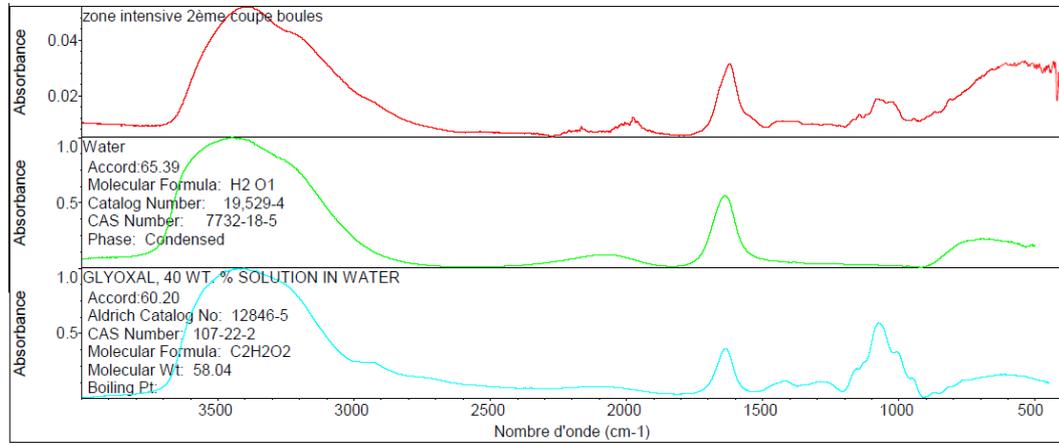


Figure 30 : Spectres FTIR des particules trouvées lors de l'extraction des microplastiques