

Valorisation de la biomasse des bords de route : les apports des démonstrateurs pour le déploiement d'une filière durable

Recovery of roadside biomass: The contribution of demonstrators to the deployment of a sustainable supply chain

Brunelle Marche¹, Mauricio Camargo², Christophe Bachmann³

¹ Université de Lorraine, ERPI, F-54000 Nancy, France. brunelle.marche@univ-lorraine.fr

² Université de Lorraine, ERPI, F-54000 Nancy, France. mauricio.camargo@univ-lorraine.fr

³ ACTIBAC S.A., c.bachmann@actibac.fr

RÉSUMÉ. Le contexte actuel marqué par l'accélération du dérèglement climatique, la raréfaction des ressources et les tensions géopolitiques implique de revoir la stratégie énergétique française, en privilégiant la biomasse-énergie comme principale source d'énergies renouvelables. Les dépendances vertes longeant les routes françaises représentent près de 5 000 km², constituant ainsi un potentiel de biomasse encore non valorisé. Ainsi, considérer les bords de route comme gisement de filière durable de la bioéconomie nécessite un changement de pratiques, afin de mieux valoriser cette potentialité. Plusieurs études ont mis en avant l'importance des démonstrateurs territoriaux pour l'implémentation de pratiques et des filières émergentes. Dans cette perspective, cet article cherche à proposer un cadre conceptuel, pour l'implémentation d'un démonstrateur pour de la gestion durable des bords de route à des fins de valorisation, reposant sur le croisement des informations issues de la littérature sur les démonstrateurs et sur la filière durable.

ABSTRACT. Our current context, which is marked by the acceleration of climate change, the scarcity of resources and geopolitical tensions, calls for a review of the French energy strategy, with biomass-energy as the main source of renewable energy. The roadsides along French roads make up nearly 5,000 km² of the territory and constitute a biomass potential that has not yet been exploited. Thus, if one is to look at roadsides from a new perspective, and consider them as a potential source of sustainable bioeconomy, then a change in practices will be required in order to be able to better exploit this potential. Several studies have highlighted the importance of territorial demonstrators for the implementation of practices and emerging supply chains. With this in mind, this article proposes a conceptual framework for the implementation of a demonstrator for the sustainable management of roadsides for valorization purposes, based on the cross-referencing of information taken from the literature on demonstrators and the sustainable sector.

MOTS-CLÉS. Bords de route, filière durable, démonstrateur, bioéconomie.

KEYWORDS. Roadside, sustainable supply chain, demonstrator, bioeconomy.

1. Introduction

Dans un contexte marqué par l'accélération du dérèglement climatique, la raréfaction des ressources et les tensions géopolitiques, la transition énergétique de la France est au cœur des préoccupations. Dans le cadre du plan de sobriété énergétique, le gouvernement français souhaite « *sortir de sa dépendance aux énergies fossiles et réduire de 40 % sa consommation d'énergie d'ici 2050 afin d'atteindre la neutralité carbone. Cela suppose de transformer durablement nos habitudes et nos comportements* » [MIN 22]. Cette stratégie énergétique française repose sur quatre piliers : la sobriété énergétique (consommer moins), l'efficacité énergétique (consommer autrement), l'accélération du développement des énergies renouvelables et la relance de la filière nucléaire française.

Selon la directive européenne sur les énergies renouvelables [EUR 18], la biomasse est la « la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales, de la sylviculture et des industries connexes, y compris la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets, notamment les déchets industriels et municipaux d'origine biologique ». Cette biomasse résultante de l'interaction homme-nature peut être utilisée comme nourriture, fourrage, matériaux ou source d'énergie [ROB 21].

Bien que la demande en biomasse pour l'alimentation, la fourniture de biens et pour l'énergie croît, la superficie des terres disponibles pour la production de biomasse est en baisse, limitée par le développement des villes et des infrastructures et les mesures de protection de la biodiversité [ROB 21]. Par ailleurs, l'Observatoire National des Ressources en Biomasse questionne les concurrences d'usages de la biomasse (alimentation, matériaux, énergie...) [FRA 16]. Ainsi, le développement de l'usage énergétique ne doit pas se faire au détriment de l'usage alimentaire. L'une des opportunités pouvant limiter ce risque et contribuer au plan de sobriété réside dans l'exploitation de la biomasse des dépendances vertes.

Les dépendances vertes, plus communément appelées bords de route, sont des bandes étroites artificielles longeant les infrastructures routières et généralement dominées par une végétation spontanée ou issue de plantations [JOH 08] : herbes, buissons, broussailles, arbustes, arbres forestiers ou d'alignement... En France, elles bordent plus d'un million de kilomètres et représentent une surface de 4500 km² [VIL 18]. Ces espaces représentent un potentiel de biomasse considérable, encore peu exploité à l'échelle du territoire : le rendement moyen de fauche observé sur les chantiers est de 0,8 tonnes de matière brute par kilomètre, avec de fortes variations d'un chantier à l'autre (selon la date d'intervention, le type d'accotement...) [BER 15]. Suite au développement de technologies adaptées à son prélèvement (aspirateur de biomasse, caisson de stockage) et à sa transformation (digestion anaérobique notamment), la valorisation de la biomasse des bords de route suscite un intérêt grandissant. En effet, elle est susceptible de créer de nouvelles filières biosourcées (panneaux d'isolation¹ par exemple) ou d'inciter aux transformations bioéconomiques des filières existantes par l'intégration du territoire en tant que fournisseur de biomasse au sein de la filière, comme alternative aux cultures énergétiques (maïs par exemple). De tels objectifs industriels conduisent à engager une trajectoire de rupture vis-à-vis du fonctionnement économique existant [GRI 19].

La bioéconomie se définit comme « l'ensemble des activités liées à la production, à l'utilisation et à la transformation de bioressources destinées à répondre de façon durable aux besoins alimentaires et à une partie des besoins matériaux et énergétiques de la société, et à lui fournir des services écosystémiques » [ADE 18]. Il s'agit alors de prendre en compte les enjeux multifonctionnels de la production de biomasse [TRI 12] afin de concilier écologie et économie des activités humaines [MAD 17]. Les haies bocagères du département de l'Orne illustrent parfaitement ces enjeux multifonctionnels, comme le soulignent Grillot et al. [GRI 19].

REMARQUE : Les Haies bocagères sont des élément linéaires composés d'arbustes et/ou d'arbres et qui font partie d'une unité de gestion [BAU 00].

D'un côté, elles peuvent alimenter les filières de bois-énergie (aspect économique), de l'autre, elles participent au maintien du paysage bocager et de sa biodiversité (aspect social et environnemental).

À l'heure actuelle, quelques collectivités ont expérimenté localement l'entretien des bords de route avec exportation de la biomasse² (également appelé avec collecte) afin de la valoriser dans des filières énergétiques [LEN 18]. Les objectifs de ces expérimentations étant principalement économiques, elles questionnaient la rentabilité de ces changements de pratiques. Cependant, afin de s'inscrire dans la bioéconomie, la valorisation de la biomasse ne doit pas devenir un objectif uniquement économique aux dépens du territoire et de son écosystème. Face aux enjeux nationaux énergétiques, il semble important d'apporter davantage de connaissances aux acteurs du territoire. La démonstration réalisée au sein des territoires est une opportunité d'acquérir des connaissances sur l'impact des projets de valorisation de la biomasse des bords de route d'un point de vue économique, environnemental et sociétal et ainsi d'appréhender la façon dont ces projets de filières contribuent à répondre aux enjeux de la bioéconomie.

¹ <https://gramitherm.eu/>

² <http://www.prever.fr/spip.php?article220>

Cet article s'intéresse à cette notion de démonstrateurs, appliquée à la gestion des bords de route et aux opportunités de valorisation de la biomasse au sein de filière de la bioéconomie. Ainsi, dans une première section, la notion de démonstration sera abordée. La deuxième section se concentrera sur la définition de la notion de filière durable au sein de la bioéconomie. Enfin la troisième section proposera un cadre conceptuel de la démonstration de la gestion durable des bords de route à des fins de valorisation, reposant sur le croisement des informations issues de la littérature sur les démonstrateurs et sur la filière durable.

2. Fondement théorique et cadre conceptuel

2.1. De la notion de démonstration aux démonstrateurs

Dans son article intitulé « Anthropologie de la démonstration », [ROS 09, p.3] explique que le terme « démonstration » fait « *référence à un cheminement écrit ou audiovisuel, dont la vocation affichée est prioritairement d'ordre probatoire et/ou argumentatif, voire pédagogique, mais qui est susceptible de jouer bien d'autres rôles* ». Il fait l'objet d'usages divers et est utilisé à des fins de preuve d'un énoncé, d'une approche ou de la faisabilité d'un projet.

Dans le cadre de cette recherche, une attention particulière est portée à la démonstration de la faisabilité, également appelée preuve de concept (ou proof of concept en anglais). En ingénierie, cette preuve de concept est souvent synonyme de prototype ou de démonstrateur [FER 21]. Moultrie [MOU 15] souligne que « [généralement] les démonstrateurs sont considérés comme des prototypes technologiques qui sont proches du marché ». Il soutient qu'en considérant un espace de développement plus large que celui d'un produit ou d'une technologie, il est possible d'explorer le potentiel d'autres types de démonstrateurs afin de lever les verrous identifiés au sein du projet. Cependant, ces autres types de démonstrateurs restent peu abordés dans la littérature. Les travaux de Phaal et al. [PHA 11] et Moultrie [MOU 15] semblent à l'heure actuelle les recherches les plus approfondies à ce sujet.

Dans la littérature scientifique, il est acquis que la conception d'une filière peut être réalisée en même temps que le processus de développement d'un nouveau produit ou d'une technologie [HIL 18, MEL 14]. Le développement d'un système technologie/filière durable nécessite du temps, des investissements et d'importants changements fonctionnels et structurels impliquant de nouveaux modes de gestion de la chaîne d'approvisionnement plus durable. Par conséquent, il est nécessaire de démontrer la faisabilité technologique, commerciale et industrielle d'un tel système à l'aide de prototypes, de modèles et de démonstrateurs avant de le répliquer à grande échelle [MAR 20]. Par conséquent, la démonstration de filière devient possible dès lors que les technologies ont atteint un certain niveau de maturité. Dans leur modèle, Phaal et al. [PHA 11] considèrent plusieurs phases de démonstration dominées par des activités et des évènements en relation avec la science, la technologie, l'application et le marché. D'après Moultrie [MOU 15], dès la deuxième phase (dédiée à la technologie), il est possible de transposer des preuves de concepts technologiques et des démonstrateurs d'application précoce.

Moultrie [MOU 15] précise qu'un démonstrateur a tendance à jouer un rôle complexe et peut ainsi être produit à plusieurs fins et avec plusieurs objectifs. En fonction de la démonstration visée, des réalisations clés suscitent l'intérêt des parties prenantes concernées et peuvent conduire à des investissements potentiels [PHA 11]. De manière générale, ces réalisations peuvent porter sur les démonstrations suivantes : nouvelles connaissances scientifiques ou d'une nouvelle technologie, faisabilité du potentiel d'une technologie dans un domaine d'application orienté vers le marché, robustesse d'une technologie au sein de systèmes fonctionnels, avantages fonctionnels potentiels d'un système dans des conditions hors laboratoire, création d'une activité/entreprise durable avec un potentiel de croissance du marché, faisabilité d'un marché de masse ou la démonstration d'une croissance substantielle de l'industrie, du marché et des affaires [PHA 11]. Ces démonstrations sont corroborées par Moultrie [MOU 15] qui aborde la démonstration de principes scientifiques,

d'applications, de faisabilité technique et commerciale d'application spécifique ou encore de capacité de mise à l'échelle et reproduction en volume. À ces aspects, il ajoute également qu'un démonstrateur peut être un outil pour convaincre des investisseurs potentiels et pour supporter la communication au sein de la communauté scientifique.

Phaal et al. [PHA 11] soulignent que l'émergence de démonstrateur d'ordre industriel doit tenir compte de facteurs importants tels que les stimulants du marché (demande) et technologiques (offre) qui accélèrent considérablement l'émergence industrielle dans le secteur d'intérêt, les facilitateurs et obstacles impactant ce développement et les perspectives régionales conduisant à la création et capture de valeur à l'échelle locale.

Bien qu'il n'existe pas de définition précise d'un démonstrateur, la littérature scientifique met en évidence que l'implémentation d'un démonstrateur vise à supporter et valider la translation entre des domaines de connaissances, principalement des domaines scientifiques vers des domaines techniques/industriels. À cette fin, un démonstrateur est à la fois un espace/dispositif destiné à tester, évaluer et valider la robustesse d'un système dans son environnement et un support de pédagogie et d'échange de connaissances entre différentes communautés. Cette définition d'un démonstrateur peut être corroborée par des travaux réalisés au sein du projet européen INEDIT [DUP 21] ou en France par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Ces travaux soutiennent l'émergence de démonstrateurs en tant que support de conduite du changement afin d'appréhender les enjeux de transition et d'accompagner le passage à l'action et son pilotage à des échelles industrielles et territoriales. Le projet INEDIT considère que le développement de démonstrateurs est un moyen d'accompagner et d'expérimenter le déploiement de nouvelles technologies et de nouvelles pratiques associées [DUP 21, MAR 23]. L'ADEME estime qu'un démonstrateur doit être un espace de prise de recul et d'apprentissage par la mise en œuvre d'évaluations innovantes et participatives, apporter une reconnaissance de la démarche mise en œuvre tout en facilitant la communication et la capitalisation des résultats obtenus [ADE 22].

En conclusion, un démonstrateur, quelle que soit sa forme (unité physique, expérience sur le territoire par exemple), offre la possibilité de tester la robustesse d'une filière dite durable à petite échelle avant de la répliquer à plus grande échelle. Il s'agit d'une opportunité pour évaluer économiquement, environnementalement et socialement cette filière et pour se confronter aux risques et aux incertitudes liés aux coûts, à la demande, à la disponibilité des ressources ou encore aux données d'analyse de cycle de vie [BAR 18].

2.2. Cadre théorique pour définir une filière durable

La bioéconomie contribue à la transition d'une production à base de matières fossiles à celle basée sur la biomasse renouvelable [PAH 18]. Elle renvoie à des réalités plurielles en matière de procédés, d'acteurs et de conceptions de la transition écologique, à travers notamment le recyclage des déchets [EUR 18]. Elle se caractérise par une réindustrialisation écologique et un ancrage territorial à proximité de la biomasse [BEF 17], reposant ainsi sur des filières courtes et locales de valorisation de la biomasse. De plus, la prise en compte du contexte local va conditionner la pertinence de chaque filière émergente. En effet, l'utilisation de ressources renouvelables n'est pas une condition suffisante pour justifier de la durabilité de la bioéconomie [PFA 14, GAW 19]. Par exemple, une augmentation de la demande de biocarburants entraînera une augmentation de la demande de biomasse conduisant à une concurrence pour l'utilisation des terres, pour la consommation d'eau douce et, même pour la production alimentaire [TAN 21]. Ainsi, pour qu'elle soit durable, la bioéconomie nécessite une production, conversion et distribution durable de biomasse [TAN 21]. Il s'agit de veiller à ce que tous les avantages tirés de l'utilisation actuelle des ressources ne compromettent pas la possibilité pour les générations futures de bénéficier du même mode d'exploitation [LUN 08]. En d'autres termes, cela consiste à minimiser l'impact des activités humaines sur l'environnement naturel, la santé humaine et les ressources naturelles. Au-delà du simple remplacement de ressources fossiles par des ressources renouvelables, la mise en œuvre d'une bioéconomie durable repose sur une chaîne

d'approvisionnement durable, comprenant la production, les processus de conversion et la logistique durable de biomasse [TAN 21]. Ainsi, un processus et une filière sont durables s'ils intègrent des dimensions économiques, environnementales et sociales [HAC 08]. Plus récemment, des auteurs ont suggéré d'intégrer de nouvelles dimensions afin de répondre à l'approche de la durabilité : des dimensions institutionnelles, des dimensions politiques et technologiques [BAU 16, FRI 18]. Une vision claire de la prise en compte de ces dimensions pourrait aider les décideurs locaux et toute partie prenante territoriale à déployer des filières biosourcées durables. Cet article se concentrera sur les dimensions économiques, environnementales, technologiques et sociales.

Sur le plan économique, la conversion de la biomasse en bioénergie peut générer des flux de revenus pour les parties prenantes et diminuer les coûts d'entretien de ces espaces [MEY 14]. La conception de systèmes de valorisation nécessite d'évaluer l'efficacité [CAP 05] et l'échelle des technologies choisies [MEY 12], intégrant notamment des réflexions en termes de coûts, d'investissements et de rendement, afin d'en évaluer la faisabilité économique. La rentabilité de l'activité va également dépendre de la fiabilité/disponibilité et de la qualité de l'approvisionnement : stockage de la biomasse en cas de variation des approvisionnements, prétraitement de la biomasse en cas de qualité de biomasse inférieure. La distribution de la biomasse convertie et valorisée va également impacter la rentabilité de l'activité [CAM 14].

Les considérations environnementales portent notamment sur le bilan carbone, les émissions de gaz à effet de serre et les autres sources de polluants des activités d'entretien et de valorisation de la biomasse [CAM 14]. L'un des principaux moteurs de l'utilisation de la biomasse pour la production d'énergie est son potentiel pour réduire l'impact environnemental de l'utilisation des combustibles fossiles. La collecte et la valorisation de la biomasse peuvent également impacter la provision de services écosystémiques [LAU 15, FER 17, GIS 16]. Enfin, le déploiement d'une filière de valorisation de la biomasse ne doit pas être réalisé aux dépens de l'environnement et du territoire [BAU 16].

REMARQUE : Les services écosystémiques sont des services que les populations humaines obtiennent directement ou indirectement des processus naturels inhérents à un écosystème [MIL 05]

La valorisation de la biomasse à une échelle industrielle peut avoir également des répercussions sur les modes de vie des populations, les systèmes politiques, la santé des usagers et des agents [VAN 03]. Le déploiement de filières de valorisation peut conduire à la création d'emplois (directs et indirects) et à la génération de valeur locale. Par ailleurs, la création de filières locales de valorisation des déchets contribue à verdier l'image des territoires [MUT 14]. Une filière de valorisation de la biomasse doit promouvoir la minimisation des conflits en termes d'usage et d'accès et elle doit être socialement acceptable (minimisation du bruit, des aspects indésirables au sein du paysage) [BAU 16].

L'évaluation technologique de la filière de valorisation va tenir compte de la capacité et de l'efficacité des technologies (volume de production, capacité de collecte de la biomasse, quantité de biomasse valorisée/rejetée) et des moyens de transport [CAL 20, EDA 18, MAS 20]. L'impact environnemental et économique des technologies est à prendre en compte, ainsi que son degré de maturité et le degré de maîtrise des acteurs engagés dans la valorisation.

3. Vers un démonstrateur de gestion durable des bords de route au sein de filière biosourcée

Comme évoqué préalablement, la France compte plus d'un million de kilomètres de route [BAD 22]. À des fins sécuritaires principalement, la végétation des bords de route est régulièrement entretenue, constituant un gisement important de ressource bioénergétique [BRO 20]. L'usage énergétique de cette biomasse pourrait conduire à améliorer la rentabilité des activités d'entretien avec exportation en réduisant les dépenses énergétiques des collectivités ou en générant des revenus complémentaires.

De manière générale, l'herbe fauchée peut être utilisée comme fourrage, pour la récupération d'énergie (combustion, production de biogaz, production intégrée de combustible solide et de biogaz),

pour la récupération de matériaux (bioraffinerie verte, de lignocellulose) [KRE 22], ou encore pour l'isolation des bâtiments³. L'herbe fauchée des bords de route est principalement valorisée dans des filières énergétiques, au sein d'installations locales de digestion anaérobie [ZDA 18, BRO 20]. La digestion anaérobie, également appelée biométhanisation, est la conversion biologique de la matière organique en biogaz dans des conditions sans oxygène [BRO 13]. Le biogaz produit est composé d'environ 60 % de méthane et 40 % de CO₂, avec des traces de contaminants. Le biogaz peut être brûlé pour produire de la chaleur et/ou de l'électricité ; il peut également être transformé en biométhane pour être utilisé comme carburant ou injecté dans le réseau national de gaz [HAL 15]. Ce processus produit également un digestat, c'est-à-dire la matière qui n'est pas convertie en biogaz. Le digestat contient la majorité des éléments nutritifs de la matière première et peut être utilisé comme biofertilisant.

L'intérêt porté à l'intégration du gisement de biomasse issu des bords de route au sein de filière énergétique croît au sein de la communauté scientifique. L'utilisation de l'herbe des bords de route comme matière première pour la digestion anaérobie a été étudiée au Danemark [MEY 14], au Pays de Galles [DEL 06, SAL 07], en Angleterre [BRO 20], en Allemagne [PIE 16a], en France [ZDA 18], aux Pays-Bas [ARO 13], en Belgique [VAN 19] et en Croatie [BED 19]. Ces études ont montré que l'herbe des bords de route se prêtait à la digestion, mais des problèmes liés aux machines disponibles, à la sécurité des véhicules pendant la récolte et aux variations des rendements d'une année sur l'autre ont été rencontrés [BRO 20].

La végétation ligneuse des bords de route est également entretenue régulièrement. Les résidus d'élagage et le bois collecté subissent des opérations de déchiquetage pour servir de combustible pour la production de chaleur ou d'électricité (bois énergie) [KUH 07, GHA 12, GHA 17].

Quel que soit le processus de valorisation privilégié, la structure générale de la filière biosourcée de la biomasse des bords de route est présentée dans la Figure 1. Cet article se concentre sur les phases d'approvisionnement en biomasse et de transport à travers la démonstration d'une gestion durable des bords de route au sein de filière énergétique biosourcée, car l'intégration de la biomasse des bords de route en tant que gisement apporte de la nouveauté au sein des collectivités et au sein des filières actuelles. Une attention particulière est alors portée aux activités réalisées par les collectivités à savoir l'entretien des espaces conduisant à la collecte de la biomasse et à son transport vers des installations de valorisation (en rouge dans la Figure 1).

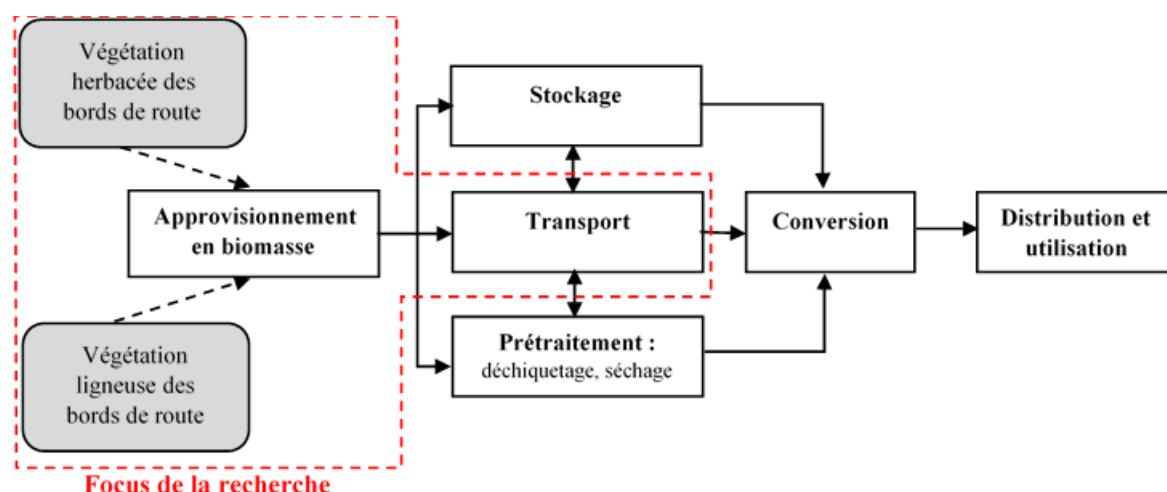


Figure 1. Structure générique de la filière de valorisation de la biomasse des bords de route

³ <https://gramitherm.eu/>

3.1. Cadre conceptuel d'un démonstrateur de gestion durable des bords de route au sein de filière énergétique biosourcée

Sur la base de la littérature présentée précédemment, cette section se concentre sur les résultats attendus par un démonstrateur de filière durable de valorisation de la biomasse des bords de route. Pour répondre aux attentes de validation de la nouvelle filière, le démonstrateur attendu consisterait en un tronçon de bord de route au sein du territoire dans lequel des parties prenantes (gestionnaire des bords de route, opérateurs, agriculteurs, usagers de la route, fabricants de machines d'entretien des bords de route, association de protection de l'environnement...) sont impliquées afin de valider la pertinence de cette nouvelle filière et d'ajuster les modes de fonctionnement de cette nouvelle organisation. Afin que cette nouvelle filière biosourcée soit durable, le démonstrateur devra étudier la gestion des bords de route en tant que gisement en considérant les dimensions économiques, environnementales, technologiques et sociales d'une filière durable telles qu'abordées dans la section 2.2.

À l'aide d'une étude multidimensionnelle, multiobjectifs et multi parties prenantes, il s'agit (i) d'évaluer l'état des connaissances afin d'identifier les caractéristiques de la filière à tester, éprouver et valider pour en démontrer sa faisabilité et (ii) d'intégrer les parties prenantes dans la co-construction, la mise en place et la routinisation des pratiques en phase avec la transition.

L'intégration de la biomasse des bords de route au sein de filière, principalement énergétique, nécessite de considérer la végétation de ces espaces comme un gisement de biomasse. Le démonstrateur présenté dans cet article cherche donc à évaluer la performance de l'entretien des bords de route, en démontrant la capacité des acteurs d'un territoire à se mobiliser et à assurer une utilisation optimale des ressources des dépendances vertes. En d'autres termes, il s'agit d'évaluer la durabilité des pratiques de gestion des bords de route mises en œuvre lors du processus de décision afin de contribuer à l'intégration de manière raisonnée de ce gisement dans les filières de la bioéconomie et par conséquent, à l'évolution des comportements écoresponsables des parties prenantes à la gestion de ces espaces. Ainsi, le démonstrateur repose sur les dimensions sociales, environnementales, économiques et technologiques, identifiées dans la littérature dédiée au démonstrateur et à la filière durable. Les onze fonctions identifiées, regroupées en quatre fonctions principales (Figure 2), ont pour objectif de répondre aux caractéristiques d'un démonstrateur (voir section **Error! Reference source not found.**). Elles sont proposées sur la base de la littérature existante en suivant une démarche de conception d'un système par l'analyse de la valeur, appelée analyse fonctionnelle. Ce type de démarche vise à développer des systèmes orientés vers des solutions et à fournir des guides pour appréhender et agir dans la complexité [YAN 98]. Il s'agit d'un processus itératif dont la première proposition de fonctions résulte d'une analyse de la littérature. Cette démarche a déjà été utilisée dans des travaux dédiés au développement d'un démonstrateur [DUP 21].

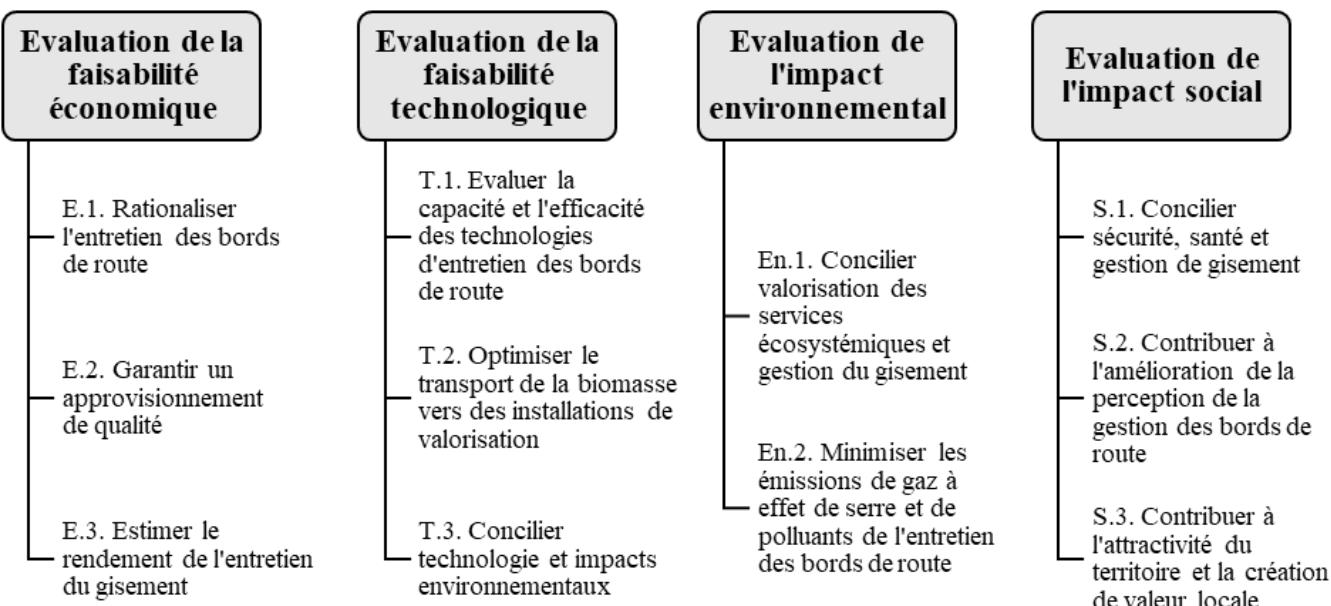


Figure 2. Schéma récapitulatif des fonctions du démonstrateur identifiées

3.2. Évaluation de la faisabilité économique

La dimension économique du démonstrateur présenté dans cet article repose sur trois fonctions, la rationalisation de l'entretien des bords de route, la garantie d'un approvisionnement de qualité et l'estimation du rendement de l'entretien des bords de route considérés comme un gisement de biomasse valorisable. L'importance de la démonstration réside dans le fait de gérer de manière raisonnée ces espaces, c'est-à-dire de trouver le bon compromis entre coût, rendement et approvisionnement de qualité.

3.2.1. Fonction E.1. Rationaliser l'entretien des bords de route

L'entretien des bords de route intègre des activités telles que le ramassage des déchets, le fauchage ou l'élagage. Cet entretien représente un coût important pour les collectivités, car il doit être réalisé en un temps restreint avec les ressources humaines et matérielles disponibles. Par conséquent, une réalisation optimale de l'entretien des bords de route est un défi important pour les territoires. Ainsi, le démonstrateur doit identifier l'organisation et la planification d'entretien au sein d'un territoire afin de minimiser les coûts, les temps de déplacement et le nombre de machines nécessaires pour réaliser les opérations. Des recherches ont déjà été initiées à ce sujet, abordant le routage du fauchage en tenant compte des contraintes spécifiques des territoires [MIH 22].

3.2.2. Fonction E.2. Garantir un approvisionnement de qualité

Le type et la composition de la biomasse affectent la qualité et la quantité de biogaz produits par les processus de digestion anaérobie [MAO 15]. Les bords de route représentent un réservoir de biomasse herbacée et ligneuse non négligeable. La quantité de biomasse des bords de route peut être affectée par la prolifération des plantes envahissantes, qui menacent le gisement des bords de route, en raison des conditions, qui peuvent leur être favorables : sols remaniés, milieux fréquemment perturbés, acidification et eutrophisation des bords de route [VON 07, GOO 06]. Des études ont montré que certaines plantes envahissantes (Renouée du Japon, Ambroisie par exemple) pouvaient être valorisées par méthanisation, mais ce mode de valorisation n'est pas conseillé pour certaines espèces lignifiées [UIC 22]. Par conséquent, une gestion non différenciée des plantes invasives peut impacter la quantité de biomasse disponible à des fins de valorisation. De plus, le potentiel méthanogène de l'herbe diffère selon la saison de récolte [AND 19]. Ce dernier est le plus important en juin, lorsque l'herbe possède une concentration en fibre ligneuse plus faible [PRO 05]. Dans le cas des bords de route, le potentiel méthanogène de l'herbe de bord de route varie en fonction des routes en elles-mêmes, la moyenne se situant aux alentours de 80 m³ de CH₄/tonne de matières brutes [ZDA 18]. En considérant que le

rendement moyen de fauche observé sur les chantiers est de 0,8 tonne de matière brute par kilomètre [BER 15], la valorisation de l'herbe d'un kilomètre de route peut permettre de produire 64 m³ de CH₄. Par conséquent, le démonstrateur doit être en mesure d'évaluer (i) le potentiel de biomasse d'un territoire, intégrant à la fois la biomasse herbacée et ligneuse, afin de garantir un approvisionnement de qualité et (ii) les solutions de valorisation les plus adaptées au gisement en fonction de la période de l'année.

3.2.3. Fonction E.3. Estimer le rendement de l'entretien du gisement

L'exportation de la biomasse contribue à l'épuisement des nutriments dans le sol, ce qui ralentit la croissance de la végétation et donc la fréquence d'entretien [BRU 19]. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre usage (alternance entre fauchages avec et sans exportation selon l'état du bord de route) et sur-usage (fauchage avec exportation exclusivement) du gisement de biomasse des bords de route afin de le pérenniser. Elle permet également de limiter l'obstruction des fossés et de réaliser des économies sur l'entretien des bords de route [DEB 21]. Des expérimentations réalisées au sein du territoire français ont souligné que l'exportation de la biomasse permet d'améliorer la circulation de l'eau sur les accotements (rehaussement limité de la hauteur de l'accotement) et dans les fossés (obstruction limitée des fossés), permettant d'allonger de 15 % la durée des cycles d'entretien des dépendances routières (curage des fossés, dérasement d'accotement) [SOU 17]. Cependant, l'exportation de la biomasse a des répercussions économiques : elle nécessite un investissement plus important (achat d'équipements dédiés : remorques, camion, machine d'aspiration) [MAR 22] et une élimination des déchets susceptibles de venir contaminer le gisement plus fréquemment [ZDA 18]. La vente de la biomasse collectée peut permettre de compenser, dans une certaine mesure, les dépenses liées au fauchage [MEY 14, PIE 16a] et ainsi potentiellement réduire le coût de gestion des bords de route. Le démonstrateur doit donc permettre de valider les impacts de l'exportation de la biomasse sur les coûts de l'entretien et d'évaluer la rentabilité économique de cette activité.

3.3. Évaluation de la faisabilité technologique

La dimension technologique du démonstrateur présenté dans cet article repose sur trois fonctions, l'évaluation de la capacité et de l'efficacité des technologies d'entretien, l'optimisation de l'activité de transport et le test de technologies support à la gestion et à l'entretien.

3.3.1. Fonction T.1. Évaluer la capacité et l'efficacité des technologies d'entretien des bords de route

La valorisation de la biomasse des bords de route nécessite le développement de nouvelles technologies facilitant la collecte de la biomasse des bords de route. Ces technologies diffèrent de celles utilisées dans le monde agricole, car les végétaux doivent être hachés afin d'avoir des brins les plus petits possibles afin de respecter les spécifications du processus de méthanisation [LEN 18]. Un chantier de fauchage se compose d'un élément de broyage, d'un élément d'aspiration permettant d'aspirer la biomasse et de l'envoyer dans un caisson mobile permettant de stocker et transporter la biomasse. Les pratiques d'exportation de la biomasse se développent lentement en France et font l'objet de quelques expérimentations qui permettent de tester l'efficacité de ces technologies et d'identifier des pistes d'amélioration. Par exemple, lors d'échanges sur ses expérimentations, le service routier du département des Vosges a constaté « *des problèmes de rendement de la machine d'aspiration par temps pluvieux* ». Le démonstrateur doit permettre de rendre les technologies d'entretien des bords de route plus robuste.

3.3.2. Fonction T.2. Optimiser le transport de la biomasse vers des installations de valorisation

L'exportation de la biomasse conduit les collectivités à organiser l'évacuation de ces résidus vers des installations de valorisation. Dans une logique de bioéconomie, la valorisation locale de cette biomasse est recommandée. La littérature scientifique préconise l'utilisation d'un grand nombre d'installations de valorisation dans un rayon de 20 km de la zone de récolte afin de minimiser les distances de transport de la biomasse [SAL 07, BRO 20]. Cette information est corroborée par les

expérimentations réalisées sur le territoire français qui préconisent également de valoriser la biomasse dans un rayon de 20 à 30 km, car la durée d'un tel trajet aller-retour correspond à celle de remplissage d'un caisson. Notons que cette distance peut varier en fonction de la topographie du territoire [LEN 18, BER 15], du matériel utilisé (taille du caisson) ou des conditions climatiques (humidité de la biomasse). Le démonstrateur doit permettre d'affiner et d'optimiser les pratiques liées au transport de la biomasse en tenant compte des spécificités du territoire et de sa capacité de valorisation.

3.3.3. Fonction T.3. Concilier technologie et impacts environnementaux

L'émergence de nouvelles technologies numériques et de la communication peuvent être un levier pour atténuer les impacts de la gestion des bords de route sur les écosystèmes. Corrigeux et al. [COR 22] précisent que le développement rapide de différentes technologies de capteurs peut représenter une opportunité de contribution environnementale positive pour la gestion de ces espaces en captant des informations plus précises sur l'état du bord de route et sur sa capacité à fournir des services écosystémiques par les bords de route (couverture végétale impliquée dans la séquestration du carbone, cartographie des plantes invasives par exemple). Ces technologies sont également susceptibles de collecter des données pouvant alimenter des outils de gestion et de planification de l'entretien des bords de route [BAU 20]. Par conséquent, le démonstrateur peut également être un espace dédié à l'expérimentation de technologies de support à la gestion et à l'entretien durables.

3.4. *Évaluation de l'impact environnemental*

La dimension environnementale du démonstrateur présenté dans cet article repose sur deux fonctions : l'équilibre entre gestion du gisement et services écosystémiques des bords de route et la minimisation des émissions de l'entretien de ces espaces.

3.4.1. Fonction En.1. Concilier valorisation des services écosystémiques et gestion du gisement

Les décisions prises en termes d'entretien des bords de route vont avoir un impact sur les services écosystémiques rendus par ces derniers [PHI 20, OSU 17]. L'exportation de la biomasse va, entre autres, favoriser la qualité de l'eau, contribuer à la préservation de la biodiversité, mitiger les risques naturels (incendies, inondation...), impacter la capacité des bords de route à stocker du carbone... [MAR 22]. À l'heure actuelle, il n'existe pas de recherches scientifiques évaluant quantitativement les impacts de l'entretien des bords de route sur les services écosystémiques. Le démonstrateur pourrait servir d'espaces d'expérimentations et d'observations de ces impacts à l'échelle du territoire.

3.4.2. Fonction En.2. Minimiser les émissions de gaz à effet de serre et de polluants de l'entretien des bords de route

L'entretien des bords de route, par l'utilisation d'engins de fauchage et d'élagage, émet des gaz à effet de serre et contribue à la pollution atmosphérique. À l'instar de la fonction E.1 dédiée à la rationalisation de l'entretien d'un point de vue économique, une optimisation de l'entretien, de la collecte et du transport de biomasse peut être réalisée au sein d'un territoire pour minimiser les émissions de gaz à effet de serre [MIH 22]. Le démonstrateur peut permettre d'identifier les trajectoires optimales à visée économique et environnementale (optimisation multi objective de l'entretien des bords de route).

3.5. *Évaluation de l'impact social*

La dimension sociale du démonstrateur présenté dans cet article repose sur trois fonctions : l'équilibre entre sécurité, santé et gestion du gisement, la contribution à l'amélioration de la perception des bords de route et à l'attractivité du territoire.

3.5.1. Fonction S.1. Concilier sécurité, santé et gestion de gisement

Les pressions « d'ordre chimique et nuisances » exercées sur les bords de route correspondent à la fois des émissions de polluants (air, eau, sol) ainsi qu'à des nuisances sonores, conduisant à des

impacts en termes de gêne pour les citoyens ou de perte de biodiversité. La pollution et les nuisances émanant des infrastructures routières sont générées par les véhicules en circulation sur l'infrastructure (voitures, camions, engins d'entretien), l'abrasion de la chaussée et l'usure des équipements routiers [BRA 13]. Le niveau de polluants émis par l'infrastructure routière va en partie dépendre de la fréquence d'entretien de la chaussée et de ses dépendances [DEB 18]. De plus, certaines espèces envahissantes peuvent être à l'origine de problèmes sanitaires importants, c'est le cas de l'ambroisie fortement allergisante. Son pollen peut provoquer des problèmes respiratoires, des conjonctivites et même de l'eczéma [SIN 21]. Phillips et al. [PHI 20] soulignent que les bords de route représentent une opportunité pour atténuer certains impacts des infrastructures routières (pollution, bruit, évacuation des eaux de la chaussée). Enfin, l'entretien d'un gisement à proximité des infrastructures routières et à la limite d'autres écosystèmes peut augmenter les risques de collision entre engins d'entretien et véhicules de la route ou avec la faune sauvage [MIL 15]. Le démonstrateur doit permettre d'identifier les pratiques d'aménagement et d'entretien des bords de route contribuant à l'amélioration de la qualité de l'air, de l'eau, à la réduction du bruit lié au trafic et au chantier d'entretien (grâce notamment à l'entretien de la végétation ligneuse), à la minimisation des risques sanitaires liés aux plantes invasives tout en garantissant la sécurité des agents et des usagers de la route.

3.5.2. Fonction S.2. Contribuer à l'amélioration de la perception de la gestion des bords de route

Comme mentionné préalablement, l'efficacité de la gestion des bords de route en termes de durabilité ne réside pas uniquement dans les rendements économiques. Les bords de route représentent des espaces interstitiels étroits mêlant différents acteurs (opérateurs, décideurs, agriculteurs, associations environnementales...) [PIE 16b], par conséquent, l'efficacité de leur gestion intègre également des considérations portant sur l'adhésion des parties prenantes et la mise en concordance des maillons de la filière entre eux [BRU 20]. Ces auteurs soulignent l'importance des conditions de mise en œuvre de la valorisation comme condition d'adhésion des parties prenantes, notamment dans le monde agricole. Au-delà d'une preuve ou d'un effet de persuasion, la mise en place d'un démonstrateur doit permettre d'aborder les enjeux sociotechniques et les relations interacteurs [REN 11, ROS 09] tout en répondant aux interrogations des autres parties prenantes (agriculteurs, pôle de compétitivité, association de riverains, agence environnementale...).

3.5.3. Fonction S.3. Contribuer à l'attractivité du territoire et la création de valeur locale

L'exportation de la biomasse ne doit pas être réalisée aux dépens du territoire. En effet, de par sa proximité avec les routes, le bord de route est l'un des paysages les plus fréquemment observés [MOR 99] : sa végétation est l'un des éléments esthétiques qui contribue culturellement, économiquement et socialement au territoire [FAT 14]. De plus, les bords de route sont des espaces pouvant accueillir des activités récréatives (sport, randonnées...) [LUC 11, OSU 17, SAU 16]. Considérer les bords de route ne doit pas empêcher l'utilisation de ces espaces par les citoyens. Par conséquent, le démonstrateur doit évaluer le rôle des bords de route au sein du territoire et questionner la manière dont sa transformation en gisement peut venir impacter son rôle touristique et récréatif.

Conclusion

La transformation des bords de route en gisement a des implications pour les collectivités et les territoires, qui doivent concilier les enjeux d'entretien des bords de route (sécurité, environnement, esthétisme, opérationnel...) avec des enjeux d'ordre industriel, principalement économique. Ce changement de considérations s'accompagne d'un changement de pratiques, qui se traduit notamment par un investissement matériel important. Il semble donc nécessaire d'impliquer l'ensemble des parties prenantes (décideurs, opérateurs, autorités publiques, associations environnementales...) dans ce processus de changement de pratiques pour initier/assurer une gestion plus durable des bords de route.

Un démonstrateur de gestion durable des bords de route s'inscrit au sein de territoire, nécessitant des tronçons de bords de route et des parties prenantes impliquées dans la réalisation de l'entretien de ces espaces (gestionnaire des bords de route, opérateurs, fabricants de machines d'entretien des bords de

route...). Il s'agit d'expérimenter des pratiques de conduite du changement pour créer les conditions conduisant à une gestion durable et systémique des bords de route à des fins de valorisation au sein de filière énergétique. Ce démonstrateur comporte ainsi des espaces physiques supportant des expérimentations propres à chacune des fonctions identifiées précédemment. Sur la base de ces expérimentations, il s'agit d'identifier et d'ajuster les pratiques d'entretien permettant un usage raisonnable et raisonnable des bords de route en tant que gisement de biomasse au sein de filière énergétique. En d'autres termes, il s'agit d'identifier les pratiques conduisant à un compromis en faveur d'une gestion durable des bords de route. Ces expérimentations peuvent notamment s'appuyer sur des études de faisabilité et des échanges avec des acteurs du territoire afin d'évaluer la durabilité de l'entretien du gisement issu des bords de route. Par conséquent, ce démonstrateur doit également être un espace d'échange, de restitution et de mise à disposition des connaissances issues des expérimentations et encourager le transfert de connaissance et la mise en valeur des bonnes pratiques. En conclusion, le démonstrateur de gestion durable des bords de route contribue à la prise de recul et à l'apprentissage collectif par l'expérimentation des nouvelles pratiques. Cette volonté et la nécessité d'associer les parties prenantes sont les objectifs principaux d'un démonstrateur.

Cet article présente onze fonctions d'un démonstrateur de gestion durable des bords de route afin de contribuer à l'échange de connaissances et d'accompagner les collectivités dans leur changement de pratiques à l'échelle du gisement « bord de route ». Ces fonctions mettent en évidence des perspectives de recherche permettant d'étudier et d'analyser la durabilité de la gestion du gisement selon différentes dimensions : économique, technologiques, environnementales et sociales. Au sein de ces fonctions, une attention particulière est portée à l'évaluation de gestion des bords de route (entretien, collecte et transport) afin d'en quantifier les impacts et à une utilisation plus efficace des ressources afin d'en limiter les aspects négatifs. L'étude de ces fonctions souligne que le champ de connaissance dédiée à l'entretien du gisement de bords de route doit encore être élargi pour faciliter la mise en œuvre de pratiques de gestion durable. L'une des perspectives de recherche consisterait à concevoir un démonstrateur de la filière, dont les objectifs seraient multiples : (1) la fourniture de biomasse requise à partir de la végétation des bords de route pour former un réseau d'approvisionnement durable (présentée dans cette recherche) (2) l'évaluation multidimensionnelle de la filière de conversion de la biomasse (étude plus approfondie des étapes restantes de la Figure 1) (3) l'évaluation de l'ancrage territorial et de la répartition de valeur au sein des parties prenantes et (4) la transmission de connaissances pour encourager les changements de pratiques. Les futurs travaux prévoient la mise en place d'expérimentations propres à chacune des fonctions présentées dans cet article au sein de collectivités volontaires (communautés de communes, métropole, départements).

Remerciements : Le projet SAGID+ est cofinancé par l'Union Européenne avec le Fonds Européen de Développement régional à hauteur de 409 500 €, par le groupe ACTIBAC et la Métropole du Grand Nancy. Il a également été soutenu par le programme de recherche « COMPÉTENCES RECHERCHE DOCTORANTS et JEUNES CHERCHEURS » de la Région GRAND EST - Convention de projet n° 21P06618. Il contribue à l'ambition collective « Des Hommes et Des Arbres, les racines de demain », labellisée Territoire d'Innovation.

Bibliographie

- [ADE 18] ADEME., *Stratégie de l'ADEME pour une bioéconomie durable - 2017-2022*, ADEME, 2018.
- [ADE 22] ADEME., *Les démonstrateurs nationaux de la conduite du changement : des villes en transition dans les Hauts-de-France*, Expertises. ADEME, Hauts-de-France, 2022.
- [AND 19] ANDRE, L., ZDANEVITCH, I., PINEAU, C., LENCAUCHEZ, J., DAMIANO, A., PAUSS, A., RIBEIRO, T., *Dry anaerobic co-digestion of roadside grass and cattle manure at a 60 L batch pilot scale*, Bioresource technology. 289, 121737, 2019.
- [ARO 13] ARODUDU, O., VOINOV, A., VAN DUREN, I., *Assessing bioenergy potential in rural areas—A NEG-EROEI approach*, Biomass and bioenergy 58, 350–364, 2013.

- [BAD 22] BADET, C., AMOROS, P., BOUVRY, L., COLUSSI, C., DEFRENCE, S., *DATALAB - Chiffres clés des transports*, Le service des données et études statistiques (SDES). Ministère de la transition écologique, 2022.
- [BAR 18] BARBOSA-POVOA, A.P., DA SILVA, C., CARVALHO, A., *Opportunities and challenges in sustainable supply chain: An operations research perspective*. European Journal of Operational Research. 268, 399–431, 2018.
- [BAU 00] BAUDRY, J., BUNCE, R.G.H., BUREL, F., *Hedgerows: an international perspective on their origin, function and management*. Journal of environmental management. 60, 7–22, 2000.
- [BAU 20] BAUTISTA RODRIGUEZ, S., MARCHE, B., HAMDANI, F.E., CAMARGO, M., MAYER, F., BACHMANN, C., MONTICOLO, D., *Towards smart and suitable management of roadsides: System Dynamics in the era of Industry 4.0*, Sustainable Operations and Computers. 1, 13–27, 2020.
- [BAU 16] BAUTISTA, S., NARVAEZ, P., CAMARGO, M., CHERY, O., MOREL, L., *Biodiesel-TBL+: A new hierarchical sustainability assessment framework of PC&I for biodiesel production—Part I*. Ecological Indicators. 60, 84–107, 2016.
- [BED 19] BEDOIĆ, R., ČUČEK, L., ČOSIĆ, B., KRAJNC, D., SMOLJANIĆ, G., KRAVANJA, Z., LJUBAS, D., PUKŠEC, T., DUIĆ, N., *Green biomass to biogas—A study on anaerobic digestion of residue grass*. Journal of Cleaner Production. 213, 700–709, 2019.
- [BEF 17] BEFORT, N., NIEDDU, M., *De la variété des ancrages territoriaux des firmes en Chimie Doublement Verte*. Géographie Économie Société 19, 133–152, 2017.
- [BER 15] BERNARD, J., MERLE, S., *Revue technique et économique des chantiers d'entretien des accotements routiers par broyage, collecte des résidus produits et leur livraison sur site de valorisation*, 2015.
- [BER 13] BRANCHU, P., BADIN, A.-L., BECHET, B., EISENLOHR, L., PRIOL, T. L., MARSEILLE, F., TRIELLI, E., *Pollution d'origine routière et environnement de proximité*. VertigO – La revue électronique en science de l'environnement, 2013.
- [BRO 20] BROWN, A.E., FORD, J.S., BALE, C.S., CAMARGO-VALERO, M.A., CHEFFINS, N.J., MASON, P.E., PRICE-ALLISON, A.M., ROSS, A.B., TAYLOR, P.G., *An assessment of road-verge grass as a feedstock for farm-fed anaerobic digestion plants*. Biomass and Bioenergy, 138, 105570, 2020.
- [BRO 13] BROWN, T.R., BROWN, R.C., *Biorenewable resources: engineering new products from agriculture*. John Wiley & Sons, 2013.
- [BRU 20] BRUN, F., JONCOUX, S., GOUVELLO, B. DE, ESCULIER, F., *Vers une valorisation des urines humaines. Le regard des agriculteurs franciliens*. Études Rural. 206, 200–220, 2020.
- [BRU 19] BRUST, G.E., *Chapter 9—Management Strategies for Organic Vegetable Fertility*, in: Biswas, D., Micallef, S.A. (Eds.), Safety and Practice for Organic Food. Academic Press, pp. 193–212, 2019.
- [CAL 20] ÇALIK, A., *An integrated open-loop supply chain network configuration model with sustainable supplier selection: fuzzy multi-objective approach*. SN Applied Sciences. 2, 405, 2020.
- [CAM 14] CAMBERO, C., SOWLATI, T., *Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives—A review of literature*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 36, 62–73, 2014.
- [CAP 05] CAPUTO, A.C., PALUMBO, M., PELAGAGGE, P.M., SCACCHIA, F., *Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables*. Biomass and Bioenergy 28, 35–51, 2005.
- [COR 22] CORRIGEUX, B., MARCHE, B., CAMARGO, M., BACHMANN, C., CHAUDRON, C., *Identification of sensor technologies with the potential to support roadside ecosystem services*, in: 2022 IEEE 28th International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC) & 31st International Association For Management of Technology (IAMOT) Joint Conference. IEEE, pp. 1–9, 2022.
- [DEB 21] DE BLUST, G., HEREMANS, S., SUŠKEVIČS, M., ROCHE, P.K., *Green Infrastructure management for ecosystem services*, 2021.
- [DEB 18] DE BORTOLI, A., *Pour un entretien routier durable : prise en compte des conséquences de l'interaction chaussée-véhicule dans l'aide à la décision des politiques de resurfaçage-illustration par un cas autoroutier français*. Thèse de doctorat, Université Paris Est, 2018.
- [DEL 06] DELAFIELD, M., *A practical trial to investigate the feasibility of wide-scale collection of cuttings from roadside verges in Powys, for use in biogas and compost production*. Montgomerysh Wildl Trust., 2006.

- [DEL 15] DEWULF, J., BENINI, L., MANCINI, L., SALA, S., BLENGINI, G.A., ARDENTE, F., RECCHIONI, M., MAES, J., PANT, R., PENNINGTON, D., *Rethinking the area of protection “natural resources” in life cycle assessment*. Environmental science & technology, 49, 5310–5317, 2015.
- [DUP 21] DUPONT, L., MARCHE, B., MAYER, F., KASMI, F., *D4.2 Specifications for Open Manufacturing Demonstration Facilities (Deliverable)*. H2020 INEDIT Project, Grant Agreement N ° 869952, 2021.
- [EDA 18] EDALATPOUR, M.A., AL-E-HASHEM, S.M.J.M., KARIMI, B., BAHLI, B., *Investigation on a novel sustainable model for waste management in megacities: A case study in tehran municipality*. Sustainable Cities and Society, 36, 286–301, 2018.
- [EUR 18] EUROPEAN COMMISSION, *A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, Society and the environment*, 2018.
- [FAT 14] FATHI, M., MASNAVI, M.R., *Assessing environmental aesthetics of roadside vegetation and scenic beauty of highway landscape: preferences and perception of motorists*. International Journal of Environmental Research, 8, 941–952, 2014.
- [FER 17] FERRARINI, A., SERRA, P., ALMAGRO, M., TREVISAN, M., AMADUCCI, S., *Multiple ecosystem services provision and biomass logistics management in bioenergy buffers: A state-of-the-art review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 73, 277–290, 2017.
- [FER 21] FERRARIS, S.D., BARZILAI, G., *The evolving role of prototypes in design research: a discussion on terms and meanings*., in: Cumulus Roma 2021 Conference. [Espoo] : Aalto University, pp. 1825–1839, 2021.
- [FRA 16] FRANCE AGRIMER, *L'observatoire national des ressources en biomasse : Évaluation des ressources disponibles en France*, Les études de FranceAgriMer. France AgriMer, 2016.
- [FRI 18] FRITZ, M.M.C., SILVA, M.E., *Exploring supply chain sustainability research in Latin America*. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 48, 818–841, 2018.
- [GAW 19] GAWEL, E., PANNICKE, N., HAGEMANN, N., *A path transition towards a bioeconomy—The crucial role of sustainability*. Sustainability 11, 3005, 2019.
- [GHA 17] GHAFFARIYAN, M.R., BROWN, M., ACUNA, M., SESSIONS, J., GALLAGHER, T., KÜHMAIER, M., SPINELLI, R., VISSER, R., DEVLIN, G., ELIASSON, L., LAITILA, J., LAINA, R., WIDE, M.I., EGNELL, G., *An international review of the most productive and cost-effective forest biomass recovery technologies and supply chains*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74, 145–158, 2017.
- [GHA 12] GHAFFARIYAN, M.R., SESSIONS, J., BROWN, M., *Evaluating productivity, cost, chip quality and biomass recovery for a mobile chipper in Australian roadside chipping operations*, Journal of Forest Science, 58, 530–535, 2012.
- [GIS 16] GISSI, E., GAGLIO, M., REHO, M., *Sustainable energy potential from biomass through ecosystem services trade-off analysis: The case of the Province of Rovigo (Northern Italy)*. Ecosystem Services, 18, 1–19, 2016.
- [GOO 06] GOOSEM, M., TURTON, S.M., *Weed incursions along roads and powerlines in the Wet Tropics World Heritage Area*, Rainforest Cooperative Research Centre, Cairns, Australia, 2006.
- [GRI 19] GRILLOT, M., RUAULT, J.-F., BRAY, F., TORRE, A., MADELRIEUX, S., *Caractériser la biomasse d'origine agricole à l'échelle locale*, in : La Bioéconomie : Organisation, Innovation, Soutenabilité et Territoire, 2019.
- [HAC 08] HACKING, T., GUTHRIE, P., *A framework for clarifying the meaning of Triple Bottom-Line, Integrated, and Sustainability Assessment*, Environmental Impact Assessment Review, 28, 73–89, 2008.
- [HAL 15] HALFORD, N.G., *An introduction to bioenergy*, World Scientific Publishing Company, 2015.
- [HIL 18] HILLETOFTH, P., REITSMA, E., ERIKSSON, D., *Coordination of New Product Development and Supply Chain Management*, in: MOREIRA, A.C., FERREIRA, L.M.D.F., ZIMMERMANN, R.A., *Innovation and Supply Chain Management: Relationship, Collaboration and Strategies*, Contributions to Management Science. Springer International Publishing, Cham, pp. 33–50, 2018.
- [JOH 08] JOHNSON, A.M., *Best practices handbook for roadside vegetation management*. Minnesota. Dept. of Transportation. Office of Research Services, 2008.
- [KRE 22] KRENZ, L.M.M., PLEISSNER, D., *Valorization of landscape management grass*. Biomass Conversion and Biorefinery, 2022.
- [KUH 07] KÜHMAIER, M., KANZIAN, C., HOLZLEITNER, F., ROTTENSTEINER, C., AFFENZELLER, G., STAMPFER, K., *Wertschöpfungskette Waldhackgut: Optimierung von Ernte, Transport und Logistik*. Univ. für Bodenkultur, Department für Wald und Bodenwiss., Inst. Für, 2007.

- [LAU 15] LAUTALA, P.T., HILLIARD, M.R., WEBB, E., BUSCH, I., RICHARD HESS, J., RONI, M.S., HILBERT, J., HANDLER, R.M., BITTENCOURT, R., VALENTE, A., *Opportunities and challenges in the design and analysis of biomass supply chains*. Environmental management, 56, 1397–1415, 2015.
- [LEN 18] LENCAUCHEZ, J., ZDANEVITCH, I., PINEAU, C., ANDRE, L., RIBEIRO, T., *CARMEN : CARactérisation des HAP et des métaux dans les herbages fauchés en bord de route pour la MEthanisatioN*, 2018.
- [LUC 11] LUCEY, A., BARTON, S., *Public perception and sustainable management strategies for roadside vegetation*. Transportation research record, 2262, 164–170, 2011.
- [LUN 08] LUNNAN, A., VILKRISTE, L., WILHELMSEN, G., MIZARAITE, D., ASIKAINEN, A., RÖSER, D., *Policya and Economic Aspects Of Forest Energy Utilisation*, in: RÖSER, D., ASIKAINEN, A., RAULUND-RASMUSSEN, K., STUPAK, I., *Sustainable Use of Forest Biomass for Energy: A Synthesis with Focus on the Baltic and Nordic Region*, Managing Forest Ecosystems. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 197–234, 2008.
- [MAD 17] MADELRIEUX, S., BUCLET, N., LESCOAT, P., MORAINE, M., *Écologie et économie des interactions entre filières agricoles et territoire : quels concepts et cadre d'analyse ?*, Cahiers Agricultures, 26, 24 001, 2017.
- [MAO 15] MAO, C., FENG, Y., WANG, X., REN, G., *Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion*. Renewable and sustainable energy reviews, 45, 540–555, 2015.
- [MAR 23] MARCHE, B., KASMI, F., MAYER, F., & DUPONT, L. *Implementing Do-It-Together: The Cross-fertilization of Do-It-Yourself and Open Manufacturing*. Journal of Innovation Economics Management, I122-XXVI, 2023.
- [MAR 22] MARCHE, B., CAMARGO, M., BAUTISTA RODRIGUEZ, S.C., CHAUDRON, C., MAYER, F., BACHMANN, C., *Qualitative sustainability assessment of road verge management in France: An approach from causal diagrams to seize the importance of impact pathways*. Environmental Impact Assessment Review, 97, 106911, 2022.
- [MAR 20] MARCHE, B., KASMI, F., CRUZ SANCHEZ, F., MAYER, F., DUPONT, L., *From technological demonstrator to sustainable supply chain demonstrator: a conceptual framework*, in: Communication Proposal. Presented at the International Conference on Innovation and Circular Economy, University of Santiago de Compostela, Spain., 2020.
- [MAS 20] MASOUDIPOUR, E., JAFARI, A., AMIRIAN, H., SAHRAEIAN, R., *A novel transportation location routing network for the sustainable closed-loop supply chain considering the quality of returns*. Journal of Remanufacturing, 10, 79–106, 2020.
- [MEL 14] MELNYK, S.A., NARASIMHAN, R., DECAMPOS, H.A., *Supply chain design: issues, challenges, frameworks and solutions*, Taylor & Francis, 2014.
- [MEY 14] MEYER, A.K.P., EHIMEN, E.A., HOLM-NIELSEN, J.B., *Bioenergy production from roadside grass: A case study of the feasibility of using roadside grass for biogas production in Denmark*. Resources, conservation and recycling, 93, 124–133, 2014.
- [MEY 12] MEYER, J.C., HOBSON, P.A., SCHULTMANN, F., *The potential for centralised second-generation hydrocarbons and ethanol production in the Australian sugar industry*, in: Proceedings of the 34th Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists Held at Cairns, Queensland, Australia, 1–4 May 2012. Australian Society of Sugar Cane Technologists, 2012.
- [MIH 22] MIHAITA, A.-S., MARCHE, B., CAMARGO, M., RAHIMI, I., BACHMANN, C., *Multi-objective modelling of a roadside mowing problem: a case study in France*, in: 2022 IEEE 28th International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC) & 31st International Association For Management of Technology (IAMOT) Joint Conference. IEEE, pp. 1–8, 2022
- [MIL 05] MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, *Ecosystems and human well-being: wetlands and water*. World Resources Institute, 2005.
- [MIL 15] MILTON, S.J., DEAN, W.R.J., SIELECKI, L.E., VAN DER REE, R., *The function and management of roadside vegetation*. Handbook of Road Ecology, John Wiley & Sons Ltd Ltd, 373–381, 2015.
- [MIN 22] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE, *Sobriété énergétique : un plan pour réduire notre consommation d'énergie*, 2022.
- [MOR 99] Morrison, D., *Roadside use of native plants*, Washington, DC: US Federal Highway Administration and Island Press, 1999.
- [MOU 15] MOULTRIE, J., *Understanding and classifying the role of design demonstrators in scientific exploration*, Technovation, 43–44, 1–16, 2015.

- [MUT 14] MUTINGI, M., MAPFAIRA, H., MONAGENG, R., *Developing performance management systems for the green supply chain*, Journal of Remanufacturing, 4, 6, 2014.
- [OSU 17] O'SULLIVAN, O.S., HOLT, A.R., WARREN, P.H., EVANS, K.L., *Optimising UK Urban Road Verge Contributions to Biodiversity and Ecosystem Services with Cost-Effective Management*. Journal of Environmental Management, 191, 2017.
- [PAH 18] PAHUN, J., FOUILLEUX, È., DAVIRON, B., *De quoi la bioéconomie est-elle le nom ? Genèse d'un nouveau référentiel d'action publique*. Natures Sciences Sociétés, 26, 3–16, 2018
- [PFA 14] PFAU, S.F., HAGENS, J.E., DANKBAAR, B., SMITS, A.J., *Visions of sustainability in bioeconomy research*, Sustainability 6, 1222–1249, 2014.
- [PHA 11] PHAAL, R., O'SULLIVAN, E., ROUTLEY, M., FORD, S., PROBERT, D., *A framework for mapping industrial emergence*. Technological Forecasting and Social Change, Using Technological Intelligence for Strategic Decision Making in High Technology Environments 78, 217–230, 2011.
- [PHI 20] PHILLIPS, B.B., BULLOCK, J.M., OSBORNE, J.L., GASTON, K.J., *Ecosystem service provision by road verges*. Journal of Applied Ecology, 57, 488–501, 2020.
- [PIE 16a] PIEPENSCHNEIDER, M., BÜHLE, L., HENSGEN, F., WACHENDORF, M., *Energy recovery from grass of urban roadside verges by anaerobic digestion and combustion after pre-processing*. Biomass and Bioenergy, 85, 278–287, 2016.
- [PIE 16b] PIETRO, C. C., FRANCESCA DI, PERRONNE., R., *Les Dépendances Vertes Dans Les Paysages Agricoles : Prendre En Compte Les Milieux Adjacents à La Route*, 2016.
- [PRO 05] PROCHNOW, A., HEIERMANN, M., DRENCKHAN, A., SCHELLE, H., *Seasonal pattern of biomethanisation of grass from landscape management*, 2005.
- [REN 11] RENO, J., *Managing the experience of evidence: England's experimental waste technologies and their immodest witnesses*. Science, technology, & human values, 36, 842–863, 2011.
- [ROB 21] ROBERT, N., *Énergie issue de la biomasse : un véritable outil pour la transition énergétique ?* Hors Murs 506, 34–37, 2021
- [ROS 09] ROSENTHAL, C., *Anthropologie de la démonstration*. Revue d'anthropologie des connaissances. 3, 2009.
- [SAL 07] SALTER, A., DELAFIELD, M., HEAVEN, S., GUNTON, Z., *Anaerobic digestion of verge cuttings for transport fuel*, in: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Waste and Resource Management. Thomas Telford Ltd, pp. 105–112, 2007.
- [SAU 16] SÄUMEL, I., WEBER, F., KOWARIK, I., *Toward livable and healthy urban streets: Roadside vegetation provides ecosystem services where people live and move*. Environmental Science & Policy, 62, 24–33, 2016.
- [SIN 21] SINGH, A.B., MATHUR, C., *Climate Change and Pollen Allergy in India and South Asia*. Immunology and Allergy Clinics. 41, 33–52, 2021.
- [SOU 17] SOURDIN, N., SCOAZEC, G., BODET, F., ROUAULT, H., *Le fauchage avec exportation de la matière des bords de route crée de la valeur ajoutée territoriale sur Couesnon Marches de Bretagne (35)*. Service développement rural et agroécologie, 2017
- [TAN 21] TAN, E.C.D., LAMERS, P., *Circular Bioeconomy Concepts—A Perspective*. Frontiers in Sustainability. 2, 2021.
- [TRI 12] TRITZ, Y., *Le Système énergétique agri-territorial : les bioénergies comme outil de développement local*. Géographie Économie Société 14, 31–52, 2012.
- [UIC 22] UICN COMITE FRANÇAIS, SUEZ RECYCLAGE, VALORISATION FRANCE, *Accompagner le traitement des déchets de plantes exotiques envahissantes issus d'interventions de gestion (Guide technique)*, Centre de ressources Espèces exotiques envahissantes. UICN Comité français & Office français de la biodiversité, 2022.
- [VAN 19] VAN MEERBEEK, K., MUYS, B., HERMY, M., *Lignocellulosic biomass for bioenergy beyond intensive cropland and forests*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 102, 139–149, 2019.
- [VAN 03] VANCLAY, F., *International Principles For Social Impact Assessment*. Impact Assessment and Project Appraisal, 21, 5–12, 2003.
- [VIL 18] VILLEMEY, A., JEUSSET, A., VARGAC, M., BERTHEAU, Y., COULON, A., TOUROULT, J., VANPEENE, S., CASTAGNEYROL, B., JACTEL, H., WITTÉ, I., *Can linear transportation infrastructure verges constitute a habitat and/or a corridor for insects in temperate landscapes ? A systematic review*. Environmental Evidence, 7, 1–33, 2018.

[VON 07] VON DER LIPPE, M., KOWARIK, I., *Long-Distance Dispersal of Plants by Vehicles as a Driver of Plant Invasions*. *Conservation Biology*, 21, 986–996, 2007.

[YAN 98] YANNOU, B., *Analyse fonctionnelle et analyse de la valeur*. Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils, 77–104, 1998.

[ZDA 18] ZDANEVITCH, I., LENCAUCHEZ, J., DUFFO, L., ANDRE, L., RIBEIRO, T., PINEAU, C., *Roadside grass valorization in anaerobic Digestion (« CARMEN » project)*, in : 7. International Symposium on Energy from Biomass and Waste (VENICE 2018). CISA Publisher, 2018.