HAL
open science

Analyse du Cycle de Vie de la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures : cas d'étude du site expérimental de Murvièl-Lès-Montpellier

Romane Saye

▶ **To cite this version:**

Romane Saye. Analyse du Cycle de Vie de la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures : cas d'étude du site expérimental de Murvièl-Lès-Montpellier. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. hal-02789629

HAL Id: hal-02789629

https://hal.inrae.fr/hal-02789629

Submitted on 5 Jun 2020

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

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

Analyse du Cycle de Vie de la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures : cas d'étude du site expérimental de Murviel-Lès-Montpellier

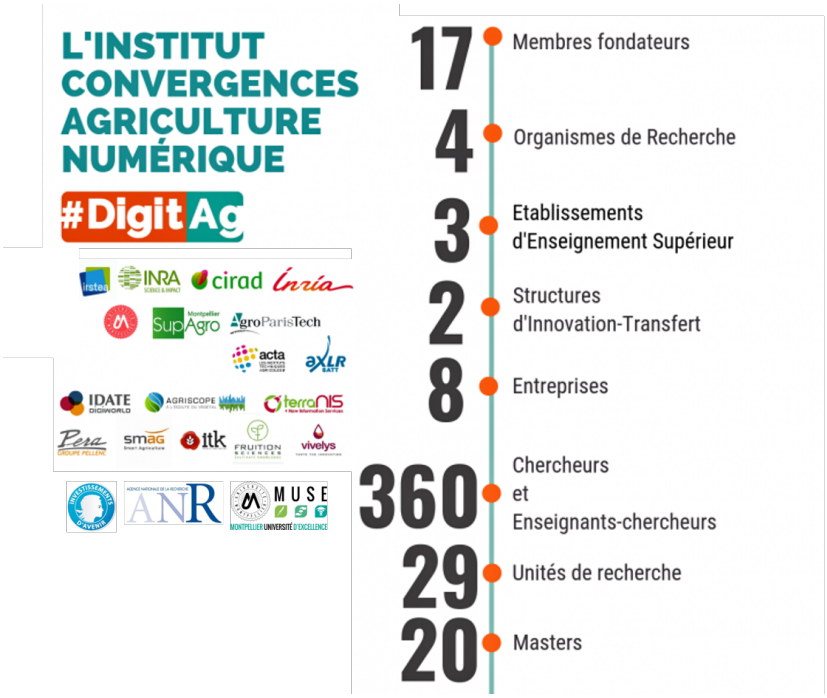
Romane SAYE
Master 2 Génie des procédés pour l'environnement
Université Grenoble Alpes
Stage réalisé du 1er février au 31 juillet 2019
Au sein de Montpellier SupAgro et de l'équipe de recherche ELSA

Encadrants :
Carole SINFORT
Directrice déléguée, SupAgro
Dr. Nesrine KALBOUSSI
Chercheuse postdoctorale, IRSTEA

Tuteur universitaire :
M. Sébastien MARC
Responsable des stages
Université Grenoble Alpes

Avant-propos

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'Investissements d'Avenir portant la référence ANR-16-CONV-0004.
Cette étude s'inscrit dans le cadre des stages financés par l'Institut de Convergence de l'agriculture numérique DigitAg basé à Montpellier et avec des antennes satellites à Rennes et Toulouse.
L'objectif est de construire un socle de connaissances qui favorise le développement de l'agriculture numérique en France et au Sud. L'Institut de Convergence DigitAg structure ses actions autour de six axes de recherche et huit challenges.
Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'axe 2 (Innovations en agriculture numérique), de l'axe 6 (Modélisation et simulation (systèmes de production agricole)) et des challenges 1, 6 et 8 (agroécologique, gestion des territoires agricoles, développement agricole au Sud).



Remerciements

Mes premiers remerciements vont à Nesrine Kalboussi, post-doctorante à l'Irstea, qui a su se montrer disponible durant toute la durée de mon stage. Je la remercie pour tous ses conseils, rédactionnels et techniques. Son encadrement m'a permis d'avancer et d'apprendre tout au long du stage.

Je remercie ensuite Carole Sinfort, professeure et directrice déléguée aux formations et à la politique scientifique SupAgro, ainsi que Alain Rapaport, directeur de recherche INRA, pour m'avoir accordé leur confiance et accueillie pour ce stage.

Je remercie Ludivine Pradeleix, enseignante chercheuse à AgroParisTech et Philippe Roux, ingénieur de recherche, pour leur aide sur la réalisation de l'analyse du cycle de vie du projet.

Je remercie Nassim Ait-Mouheb, chercheur IRSTEA, et Annabelle Mange, ingénieur d'études IRSTEA, pour leur collaboration qui m'a permis d'avancer dans mon travail.

Je remercie toutes les personnes de l'équipe ELSA, AgroTic, INRA, IRSTEA et SupAgro avec qui j'ai été en contact quotidiennement durant mon stage pour leur accueil et leur bonne humeur.

Je remercie toute l'équipe pédagogique de l'Université Grenoble Alpes dont Sébastien Marc, responsable des stages, enseignant et tuteur universitaire, d'avoir bien voulu assumer la charge de l'encadrement de mon travail.

Table des matières

Introduction **1**

1 Contexte et missions **3**

1.1 Présentation de SupAgro et du pôle ELSA 3

1.2 Présentation du projet 4

2 Synthèse bibliographique **7**

2.1 Définition de l'Analyse du Cycle de Vie 7

2.2 L'ACV de la REUT pour l'agriculture 10

3 Méthodologie générale et champ de l'étude **13**

3.1 Objectifs et champ de l'étude 13

3.2 Inventaires des scénarios 15

3.2.1 Inventaire du traitement lagunaire 15

3.2.2 Inventaire des systèmes d'irrigation 18

3.2.3 Inventaire des traitements tertiaires 19

3.2.4 Inventaire du scénario de l'apport de l'eau potable par camion . . . 19

3.2.5 Inventaire des scénarios avec l'eau brute 19

3.2.6 Bilan des émissions du sol irrigué 20

3.3 Logiciel et méthode retenus pour l'évaluation des impacts 21

3.3.1 Logiciel de calcul : Simapro 21

3.3.2 Base de données 22

3.3.3 Méthode de calcul 23

4 Résultats et discussions **27**

4.1 Analyse de contribution des impacts de la station d'épuration par lagunage 27

4.2 Analyse de contribution du système de référence 28

4.3 Analyse comparative des différentes technologies de traitement tertiaire . . 29

4.4 Comparaison des différents scénarios d'irrigation 30

4.4.1 Scénarios eau usée traitée 30

4.4.2 Scénarios eau potable et eau usée traitée 31

4.5 Analyse de contribution du scénario eau potable apportée par camion . . . 33

4.6 Comparaison des différents scénarios avec de l'eau potable et de l'eau brute 34

4.7 Comparaison de l'irrigation avec de l'eau usée traitée et avec de l'eau de rivière 35

Conclusions et perspectives **37**

Annexes **39**

Annexe 1 : Inventaire du traitement lagunaire 39

Annexe 2 : Inventaire des procédés communs 42

Annexe 3 : Inventaire du système d'irrigation 43

Annexe 4 : Inventaire des scénarios EUT 44

Annexe 5 : Inventaire du scénario EP 46

Annexe 6 : Inventaire du scénario EB (pompage rivière) 48

Annexe 7 : Inventaire du scénario EB (forage) 49

Annexe 8 : Les bilans Azote et Phosphore liés à un sol cultivé 50

Annexe 9 : Arborescence du scénario EUT (FAS + UV) 53

Table des figures

1.1 Cadre du stage 4

1.2 Plateforme expérimentale de Murviel-Lès-Montpellier 5

2.1 Les étapes de l'Analyse du Cycle de Vie d'un système de traitement des eaux 8

2.2 Les quatre phases normalisées de l'ACV, d'après la norme ISO 14040 . . . 9

3.1 Schéma des scénarios étudiés pour l'ACV de la REUT. En jaune : analyse de contribution de la station d'épuration, en bleu : l'analyse de contribution du système de référence (avec UV + FAS), en Violet : analyse comparative des différents traitements tertiaires modélisés (UF et UV+FAS), en vert : analyse comparative de l'utilisation de l'eau usée traitée, de l'eau potable et de l'eau brute 14

3.2 Bilan 24h de la station d'épuration par lagunage 16

3.3 Bilan de matière du traitement lagunaire 18

3.4 Cycle simplifié de l'azote dans un sol cultivé. Légende : 1. absorption racinaire, 2. exportation par les récoltes, 3. fixation symbiotique, 4. fixation libre, 5. minéralisation, 6. organisation, 7. nitrification, 8. volatilisation, 9. lixiviation, 10. dénitrification 20

3.5 Présentation des différents types d'entrants/sortants d'une fiche 22

3.6 Interface principale de Simapro 22

3.7 Démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions sur les sujets à protéger d'après la norme ISO 14042 [2000] 24

3.8 Schéma des catégories d'impact traitées dans la méthode ILCD sur l'évaluation de l'impact du cycle de vie aux niveaux midpoint et endpoint. En vert, les catégories d'impact pour lesquelles une méthode a été identifiée et recommandée ; en orange, celles pour lesquelles une méthode est considérée comme prometteuse, mais pas assez robuste pour être recommandée (provisoire) ; en rouge, celles pour lesquelles aucune méthode mature n'est disponible 25

4.1 Analyse de contribution des impacts de la station d'épuration par lagunage 28

4.2 Analyse de contribution du système de référence (avec traitement tertiaire FAS + UV) pour 1 hectare de vignes irrigué 29

4.3 Analyse comparative des différentes technologies de traitement tertiaire pour 1 m^3 d'eau usée traitée 30

4.4 Analyse comparative des différents scénarios d'irrigation d'un hectare de vignes avec de l'eau usée traitée 31

4.5 Analyse comparative de l'irrigation d'un hectare de vignes avec les scénarios suivants : EP (apport par camion) et EUT (sans traitement tertiaire, avec UF et avec UV + FAS) 32

4.6 Analyse de contribution du scénario EP (transport par camion) pour l'irrigation de 1 hectare de vignes 33

4.7 Analyse comparative de l'irrigation d'un hectare de vignes avec les scénarios suivants : EP (apport par camion) EB (pompage à partir d'une rivière) et EB (forage) 34

4.8 Infrastructure et pompes utilisées pour les scénarios EP et EB 35

4.9 Analyse comparative pour l'irrigation d'un hectare de vignes avec de l'eau usée traitée par lagunage puis par un traitement tertiaire (UV + FAS) ou avec de l'eau brute issue d'une rivière 36

A1 Inventaire des émissions liées au traitement de 1 m^3 d'eau usée par lagunage 39

A2 Arbre des procédés du traitement lagunaire 40

A3 Inventaire des matériaux et des procédés de la station d'épuration par lagunage 41

A4 Inventaire des procédés communs 42

A5 Inventaire des systèmes d'irrigation 43

A6 Arbre des procédés du scénario EUT (FAS + UV) 44

A7 Inventaire des scénarios utilisant de l'EUT 45

A8 Arbre des procédés du scénario EP 46

A9 Inventaire du scénario utilisant de l'EP apportée par camion 47
A10 Inventaire du scénario utilisant de l'EB pompée dans une rivière 48
A11 Inventaire du scénario utilisant de l'EB provenant d'un forage 49
A12 Sources bibliographiques pour la réalisation du bilan Azote sur la plante . 50
A13 Sources bibliographiques pour la réalisation du bilan Phosphore sur la plante 50
A14 Bilan Azote pour l'irrigation de vignes avec de l'eau potable 51
A15 Bilan Azote pour l'irrigation de vignes avec de l'eau usée traitée 51
A16 Bilan Phosphore pour l'irrigation de vignes avec de l'eau potable 51
A17 Bilan Phosphore pour l'irrigation de vignes avec de l'eau usée traitée . . . 52
A18 Exemple d'arborescence : scénario EUT (FAS + UV) 53

Liste des sigles et acronymes

ACV	*Analyse de Cycle de Vie*
CIRAD	*Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement*
DCO	*Demande Chimique en Oxygène*
EB	*Eau Brute*
EP	*Eau Potable*
EUT	*Eaux usées traitées*
FAS	*Filtre à Sable*
ICV	*Inventaire de Cycle de Vie*
ILCD	*International Life Cycle Data system*
INRA	*Institut National de la Recherche Agronomique*
IRSTEA	*Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture*
ISO	*Organisation Internationale de Normalisation*
NGL	*Azote global*
NTK	*Azote Total de Kjeldahl*
REUT	*Réutilisation des Eaux Usées Traitées*
UF	*Ultrafiltration*

Introduction

La croissance démographique mondiale ne cesse d'augmenter et la pénurie d'eau se fait de plus en plus ressentir dans certaines régions du monde. Les ressources en eau douce sont principalement consommées dans les régions où l'eau est rare et l'exploitation des ressources en eau non durables devrait augmenter à l'avenir. La contribution de l'agriculture à la consommation totale d'eau douce n'est pas négligeable et cela s'explique en partie par un climat défavorable. L'agriculture a une grande importance dans le monde et des solutions pour continuer à irriguer doivent être trouvées.

La réutilisation des eaux usées offre des solutions précieuses pour résoudre les défis sociétaux liés à la rareté de l'eau et à la pollution environnementale. Cette eau a les avantages d'être toujours disponible et d'avoir un pouvoir fertilisant (et donc de diminuer la quantité de fertilisants organiques et minéraux apportés).

Cependant, la réutilisation des eaux usées a aussi des inconvénients puisqu'elle va engendrer des impacts dus à l'ajout d'une canalisation pour acheminer l'eau vers les cultures à irriguer et à l'ajout d'un traitement tertiaire pour affiner la qualité de l'eau pour respecter la réglementation de plus en plus sévère. De plus, l'effet des pathogènes sur la santé humaine et l'environnement n'est pas encore bien quantifié et cela représente un risque sanitaire.

Dans les pays en développement confrontés à un besoin croissant d'installations de stations d'épuration et de systèmes de réutilisation, l'utilisation de l'analyse du cycle de vie (ACV) peut constituer un outil viable pour une prise de décision durable. La recherche sur l'ACV pour les eaux usées s'étend principalement dans les pays développés. Les bases de données collectées à partir de la littérature, d'estimations, ou de modélisations mathématiques sont donc limitées [Rousseaux 2005].

L'ACV du système complet de la réutilisation de l'eau usée traitée pour l'irrigation des cultures (c'est-à-dire traitement tertiaire, irrigation et culture) n'a pas beaucoup été fait, contrairement à l'ACV des traitements de l'eau (secondaires et tertiaires). Pourtant, le système dans sa globalité génère des transferts de pollution importants. En effet, pour limiter les impacts des rejets, on transforme une grande partie des polluants organiques contenus dans les eaux usées en émissions gazeuses (pouvant induire du réchauffement climatique, de l'acidification, etc.) ou en émissions vers l'eau et les sols (pouvant générer

de l'écotoxicité terrestre ou d'autres impacts suivants leur devenir).

L'acheminement de l'eau est d'autre part réalisé en utilisant une infrastructure (station d'épuration, traitement tertiaire et système d'irrigation ...) et des intrants (énergie, consommable...) qui sont eux aussi source d'impacts tout au long de leur cycle de vie respectif.

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette présente étude qui vise à comparer via l'ACV, l'utilisation des eaux usées traitées, de l'eau potable et de l'eau brute provenant d'un forage ou d'un pompage à partir d'une rivière pour l'irrigation de cultures. Le projet expérimental à Murviel-Lès-Montpellier qui réutilise l'eau usée traitée par lagunage pour irriguer des cultures servira de base pour réaliser l'ACV à l'échelle d'une commune.

Ce rapport s'organise en quatre chapitres : le premier chapitre explique le contexte et le cadre de ce stage, le deuxième est une synthèse bibliographique de l'ACV et des travaux existants sur ce sujet, le troisième présente les objectifs et le champ de l'étude ainsi que les matériels et méthodes utilisés pour la réalisation de l'ACV et le dernier présente les résultats obtenus.

Chapitre 1

Contexte et missions

1.1 Présentation de SupAgro et du pôle ELSA

Montpellier SupAgro, Institut National d'Études Supérieures Agronomiques de Montpellier, est un établissement public à caractère scientifique, culturel et professionnel. Il contribue aux évolutions de la recherche agronomique grâce à l'implication de ses enseignants-chercheurs dans 22 unités mixtes de recherche et 4 unités mixtes technologiques. Les équipes scientifiques de Montpellier SupAgro travaillent en étroite collaboration avec les grands organismes de recherche basés à Montpellier (INRA, CIRAD, IRSTEA ...) et les établissements d'enseignement supérieur régionaux (Université de Montpellier, Université Paul Valéry...). Il gère également deux domaines expérimentaux agricoles (viticulture, élevage ovin, oléiculture) dédiés à la recherche, au développement et aux échanges avec les professionnels.

Montpellier SupAgro est l'un des membres fondateurs du pôle de recherche ELSA (Environmental Life cycle and Sustainability Assessment) dédié à l'Analyse en Cycle de vie (ACV) et à l'écologie industrielle appliquées aux agro-bio procédés. ELSA a été créée en 2008 grâce au soutien de la région Occitanie. C'est un pôle pluridisciplinaire issu de cinq organismes fondateurs (CIRAD, École des Mines d'Alès, INRA, IRSTEA, Montpellier SupAgro) qui rassemble environ 18 ingénieurs, chercheurs et enseignants, 2 doctorants/post-doctorants et 3 stagiaires. Les membres d'ELSA bénéficient ainsi de la mise en commun de l'expertise et des connaissances des autres membres qui travaillent ensemble pour :
- Développer les interactions avec les partenaires industriels, les consultants et les collectivités locales ou l'État,
- Fournir des formations pour les étudiants ou les professionnels,
- Partager les travaux scientifiques via des séminaires, des conférences ...
- Publier de nouveaux résultats scientifiques...

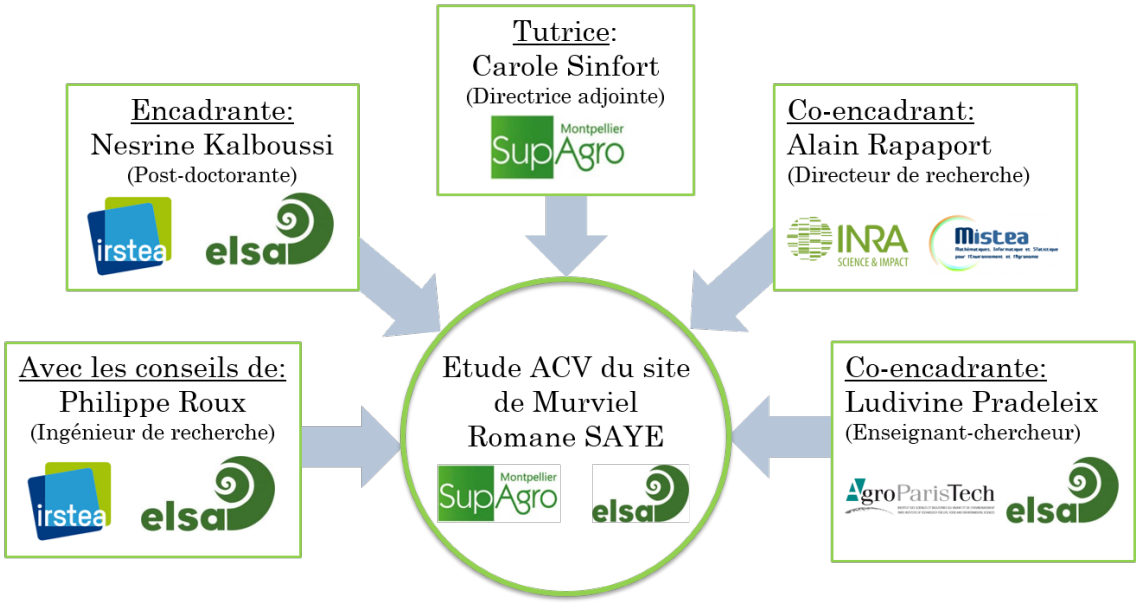


FIGURE 1.1 – Cadre du stage

Ce stage a été encadré par Nesrine Kalboussi, post doctorante IRSTEA et co-encadré par Alain Rapaport (Directeur de recherche INRA) et Ludivine Pradeleix (enseignant-chercheur à AgrosParisTech). Nous avons bénéficié des conseils de Philippe Roux (Ingénieur de recherche au sein du pôle ELSA) ainsi que d'autres membres de ELSA (Figure 1.1).

1.2 Présentation du projet

Le projet AERMC REUT de Murviel-Lès-Montpellier est le suivi d'une plateforme expérimentale composée d'une station d'épuration par lagunage et d'un traitement tertiaire composé d'un filtre à sable et d'une désinfection UV. Ce projet est mené depuis 2015 par Nassim Ait Mouheb, chercheur à l'Irstea.

Cette installation permet d'étudier la faisabilité technique et d'évaluer les impacts agronomiques, sanitaires et environnementaux d'une filière de réutilisation des eaux usées traitées par l'irrigation en goutte-à-goutte, dans le but de réduire la pression de la pollution sur le milieu sensible. Ce projet de recherche a d'autres objectifs en parallèle comme l'étude du devenir des pathogènes dans l'environnement ou encore le colmatage des goutteurs.

Deux modes de cultures sont utilisées (Figure 1.2) : l'irrigation de poireaux et salades dans des bacs hors sol sous serre et l'irrigation d'une parcelle d'un demi-hectare composée de vignes, d'oliviers et de luzernes. L'irrigation se fait par goutte-à-goutte conformément

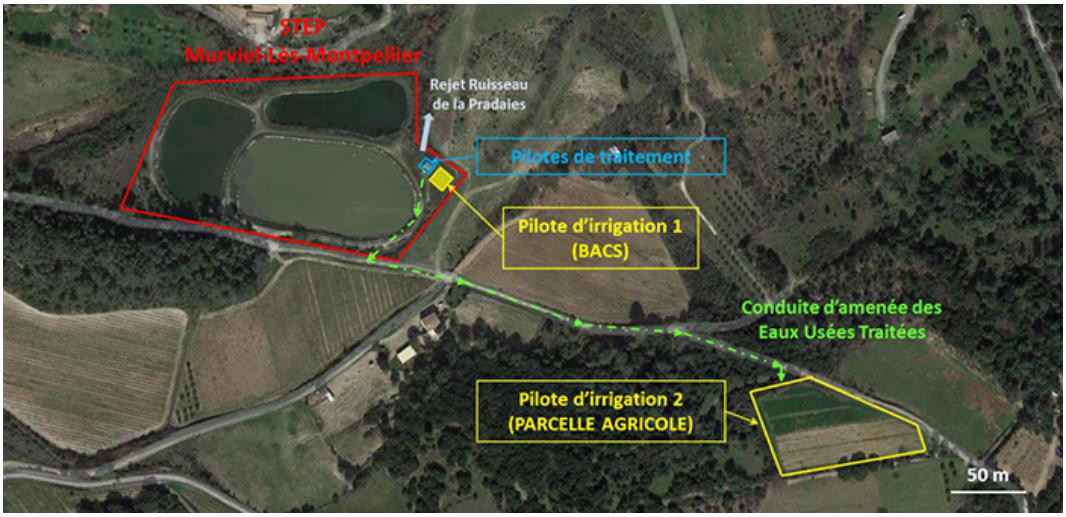


FIGURE 1.2 – Plateforme expérimentale de Murviel-Lès-Montpellier

à l'arrêté du 25 juin 2014 modifiant l'arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts.

Ce projet offre la possibilité d'étudier cinq scénarios d'irrigation :
-Irrigation sous serre avec de l'eau potable
-Irrigation sous serre avec de l'eau usée non traitée
-Irrigation sous serre avec de l'eau usée traitée
-Irrigation plein champ avec de l'eau potable
-Irrigation plein champ avec de l'eau usée traitée

Le traitement tertiaire mis en place (filtre à sable et désinfection UV) sur le site n'est pas utilisé, car le traitement lagunaire suffit à abattre suffisamment la pollution pour respecter la réglementation en vigueur. Cependant, il sera tout de même modélisé dans l'ACV afin de déterminer la part des impacts liée à l'ajout d'un traitement tertiaire.

Il est important de noter que l'objet de ce rapport est, non pas de faire l'ACV du site expérimental de Murviel, mais plutôt de se baser sur les données de ce site pour faire une ACV plus générique de la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures. L'objectif est de comparer différents scénarios d'irrigation et différentes technologies de traitement tertiaire détaillés plus loin dans ce rapport.

Chapitre 2

Synthèse bibliographique

Ce premier chapitre est une synthèse bibliographique et il est structuré comme suit : dans la première section, l'approche de l'analyse du cycle de vie est définie et dans la deuxième section, une synthèse bibliographique des études d'ACV réalisées jusqu'à présent sur la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures est présentée.

2.1 Définition de l'Analyse du Cycle de Vie

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV), également appelée écobilan, est une méthode d'évaluation des impacts environnementaux d'un produit, d'un procédé ou d'un service tout au long de son cycle de vie développée dans les années 1990 par les Hollandais. En se rapportant au service rendu, elle permet de comparer des solutions techniques différentes.
Cette méthodologie est définie par les normes internationales ISO 14040 et ISO 14044 de 2006 (ISO 2006a, 2006b) et utilisée dans de nombreux domaines (produits de consommation, énergie, gestion des déchets, éco-conception, etc.).

Le caractère exhaustif de cette analyse repose sur :

-Une approche multicritères : afin d'éviter les transferts de problèmes environnementaux, les résultats de l'étude sont présentés sous la forme de différents indicateurs environnementaux (changement climatique, eutrophisation, toxicité, consommations de ressources naturelles...). C'est cette spécificité qui va par exemple différencier cette méthode d'un bilan carbone qui ne se focalisera que sur un seul critère.

-Une approche fonctionnelle : il est nécessaire de raisonner sur une fonction et de la quantifier, c'est l'unité fonctionnelle.

-Une approche globale, « cycle de vie » : l'ACV d'un produit prend en considération toutes les étapes du cycle de vie (du berceau à la tombe) du produit pour établir l'inventaire des flux, depuis l'extraction des matières premières à la destruction des déchets, en passant

par sa fabrication, son transport, sa mise en œuvre et son utilisation (Figure 2.1). Appliqué aux systèmes de traitement des eaux et étudié en tant qu'ensemble de procédés, le cycle de vie concerne les étapes de la vie du système (construction, exploitation et destruction), auquel il faut ajouter les activités qui y sont liées, comme la production d'énergie, de réactifs, les transports, le traitement des sous-produits...

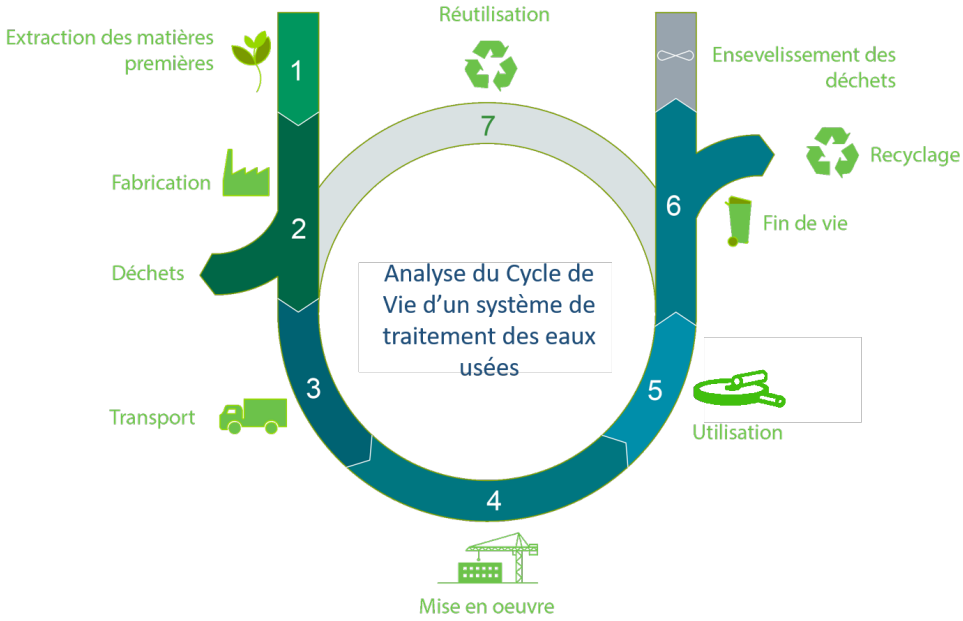


FIGURE 2.1 – Les étapes de l'Analyse du Cycle de Vie d'un système de traitement des eaux

-Une approche en 4 étapes définies par les normes ISO 14040 et 14044 (Figure 2.2) :

La première phase d'une ACV est la définition des objectifs et du champ de l'étude. Cela permet de définir sans ambiguïté le commanditaire de l'étude, les motivations, les applications envisagées et la portée de l'étude. Elle permet de déterminer les éléments clés de l'étude, à savoir la définition de "l'unité fonctionnelle" notée par la suite UF, les frontières du système, les types d'impacts et la méthodologie d'évaluation. C'est l'étape qui permet de fixer le cadre du raisonnement mené par la suite.

La deuxième phase de l'ACV, l'inventaire du cycle de vie, vise à identifier et quantifier les flux de matière et d'énergie entrant et sortant des systèmes rapportés à l'unité fonctionnelle. Elle permet de quantifier toutes les émissions polluantes dans l'air, l'eau et le sol ainsi que les extractions de matières premières renouvelables ou non renouvelables. Cela implique la collecte des données nécessaires pour répondre aux objectifs de l'étude.

Pour la collecte, il existe deux types de données :
- Les données primaires sont les données spécifiques au système étudié, directement collectées sur un site.

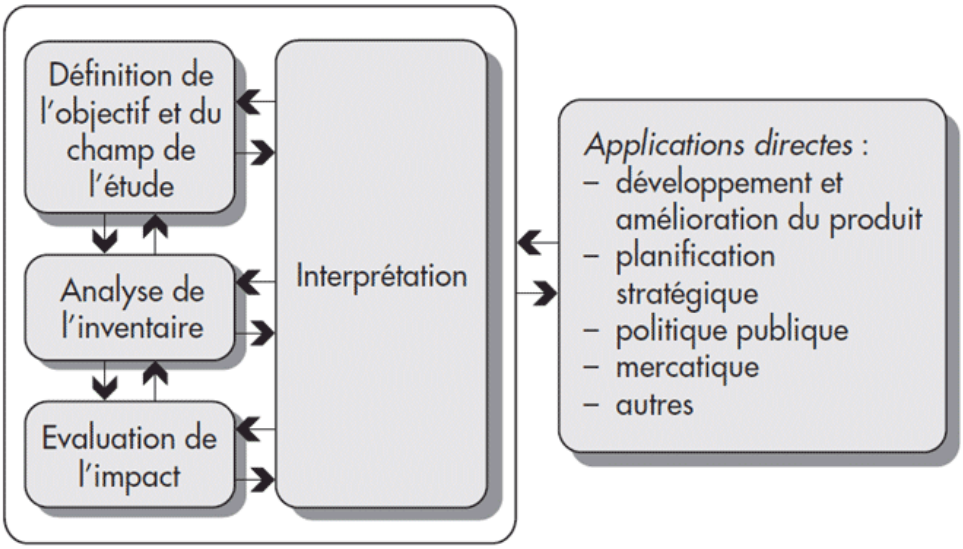


FIGURE 2.2 – Les quatre phases normalisées de l'ACV, d'après la norme ISO 14040

- Les données secondaires sont des données globales, qui peuvent être issues de bases de données commerciales ou issues de la littérature. Il s'agit par exemple de données relatives à des systèmes ou à des matériaux d'arrière-plan utilisés par le cycle de vie étudié (par exemple : production d'énergie électrique ou d'acier). Chaque hypothèse qui a été faite pour le choix de ces données doit être clairement explicitée. Cette étape de recueil de données est la plus chronophage, bien que l'utilisation des bases de données facilite grandement le travail.

La troisième phase est l'évaluation de l'impact. Elle consiste à :
- Traduire les flux de matière et d'énergie précédemment recensés en termes d'impacts potentiels sur l'environnement à l'aide d'un logiciel ; on peut regrouper ces impacts au sein de deux familles principales :
• Impacts locaux : conséquences toxiques et écotoxiques, et nuisances telles que le bruit et les odeurs,
• Impacts globaux : effet de serre, dégradation de la couche d'ozone, épuisement des ressources naturelles.
La prise en compte de tous ces éléments permet la réalisation d'un bilan environnemental ;
- Comparer ces bilans environnementaux, il faut tenter de répondre à la question suivante : « au regard des impacts évalués, quel est le système globalement le plus respectueux de l'environnement ? » Ce problème devient vite complexe lorsque impacts et systèmes se multiplient.

La quatrième et dernière étape, l'interprétation, permet d'identifier les étapes clés du cycle de vie qui contribuent de manière importante à l'impact environnemental de notre produit, ou système considéré et d'évaluer les incertitudes. Une fois la première inter-

prétation des résultats réalisée, l'inventaire sur les éléments qui contribuent le plus aux impacts peut ainsi être affiné (boucle d'itération entre la phase 4 de l'ACV et la phase 2 d'inventaire).

En matière de champs disciplinaires, la phase 1 relève d'une approche systémique classique, la phase 2 concerne essentiellement le génie des procédés et des systèmes industriels, la phase 3 fait appel pour la caractérisation des impacts aux disciplines de toxicologie, d'éco-toxicologie, à l'écologie et pour la comparaison des bilans environnementaux aux méthodes mathématiques d'analyse multicritères, et la phase 4, quant à elle, relève de l'aide à la décision.

2.2 L'ACV de la REUT pour l'agriculture

Plusieurs études ACV portent sur le traitement de l'eau usée en comparant différentes technologies de traitement. Cependant, peu de travaux ont étudié le système complet (traitement + culture) de la réutilisation des eaux usées traitées pour l'agriculture.

L'étude la plus récente est celle de [Moretti 2019] et ses collaborateurs qui quantifie la performance environnementale de l'irrigation de vergers de nectarines à l'aide des eaux usées municipales traitées et des eaux de surface en se basant sur des données expérimentales de terrain. L'unité fonctionnelle utilisée est "1 kg de nectarines" et le traitement tertiaire mis en place est une filtration membranaire. Les auteurs démontrent que l'irrigation des nectarines par les eaux usées traitées limite l'eutrophisation comparée à l'irrigation avec de l'eau de surface. Les impacts potentiels de la REUT se situent sur le changement climatique et la toxicité humaine à cause de la phase de traitement des eaux usées.

[Rodriguez 2011] et ses collaborateurs ont étudié par une approche de cycle de vie l'impact sur l'eutrophisation et le réchauffement planétaire de six typologies différentes de stations de traitements des eaux usées couplées avec différents scénarios de réutilisation de l'eau traitée (agriculture, industrie, recharge des nappes, etc). Leurs résultats montrent que, comparé au scénario de recharge des nappes, la REUT pour l'agriculture était moins impactante pour le réchauffement planétaire, mais plus impactante pour l'eutrophisation.

[Meneses 2010] et ses collaborateurs comparent la REUT pour l'agriculture à la REUT pour l'irrigation des espaces verts. Sur la base des résultats de l'ACV, les auteurs concluent que la REUT pour l'agriculture permet de réduire l'utilisation des fertilisants et ainsi la consommation énergétique due à leur production.

[Muñoz 2009] et ses collaborateurs comparent trois sources d'eau d'irrigation du tabac : les eaux souterraines, les eaux usées traitées et l'eau dessalée. Les auteurs se basent sur des données expérimentales pour conduire leurs ACV. Ils constatent que la REUT pour l'irrigation est moins impactante que l'eau dessalée ou souterraine, en termes d'eutrophisation, éco-toxicité aquatique et consommation d'énergie.

La réutilisation des eaux usées traitées pour l'agriculture est soumise à une réglementation de plus en plus sévère qui va jusqu'à imposer la mise en place d'un traitement tertiaire en aval du traitement secondaire. Les traitements tertiaires permettent d'améliorer la qualité des effluents secondaires en diminuant les matières en suspension et les pathogènes. Il existe des traitements tertiaires plus au moins performants pouvant aller de la désinfection (ozonation, chloration, UV...) à la filtration membranaire.

Plusieurs études ont comparé d'un point de vue ACV différentes technologies de traitements tertiaires. [Muñoz 2010] et ses collaborateurs ont étudié quatre scénarios de traitement tertiaire de l'eau utilisée pour irriguer du tabac : rejet des eaux usées puis dessalement, réutilisation des eaux usées sans traitement tertiaire, réutilisation des eaux usées après application d'un traitement tertiaire (ozonation), et réutilisation des eaux usées traitées après ozonation en combinaison avec du peroxyde d'hydrogène. Les résultats soulignent l'importance d'inclure dans l'ACV les polluants (métaux lourds, produits pharmaceutiques et cosmétiques) contenus dans les eaux usées puisque la contribution des polluants dans la toxicité globale dans cette étude de cas peut dépasser 90%. En ce qui concerne la toxicité pour l'homme, les différences entre les scénarios sont faibles et, compte tenu de l'incertitude expérimentale et de la modélisation, les avantages du traitement tertiaire ne sont pas clairs. Du point de vue du réchauffement climatique, les traitements tertiaires impliquent une réduction potentielle de 85% des émissions de gaz à effet de serre par rapport au dessalement.

Dans [Carré 2017] et ses collaborateurs, l'ACV a servi d'outil pour comparer 5 procédés de traitement tertiaire pour une réutilisation des eaux usées de qualité dans le sud de la France. Les procédés sont :
1) filtration sur sable (SF) + stockage suivis d'une désinfection dynamique par réacteur ultraviolet (UV) (SF-UVD),
2) filtration sur sable + désinfection par réacteur UV discontinu (SF-UVB),
3) ultrafiltration (UF),
4) ultrafiltration et désinfection par réacteur UV discontinu (UF-UVB),
5) microfiltration (MF) + stockage suivis par désinfection dynamique UV (MF-UVD).

L'unité fonctionnelle choisie est "Fournir 1 m3 d'eau d'une qualité conforme aux normes les plus strictes de la réglementation française sur la réutilisation". Pour la plupart des critères étudiés, la phase d'exploitation est globalement la plus impactante, bien que pour certains critères, comme l'épuisement des ressources en métaux, c'est la phase de construction des pilotes qui y contribue le plus, selon la nature des matériaux utilisés. L'utilisation d'une technologie robuste telle que le SF suivi des UVB (SF-UVD et SF-UVB) a un impact environnemental équivalent à celui de l'UF seul pour la plupart des indicateurs intermédiaires choisis. Ces récentes publications sont une source d'inspiration, elles apportent des éléments complémentaires de comparaison pour cette présente étude.

Chapitre 3

Méthodologie générale et champ de l'étude

3.1 Objectifs et champ de l'étude

L'objectif principal de cette étude est, d'une part de comparer les impacts environnementaux de l'utilisation de différentes ressources d'eau d'irrigation : eau potable (EP), eau usée traitée (EUT) ou eau brute (EB) provenant d'un forage et d'un pompage dans une rivière, et d'autre part d'analyser la contribution de différentes technologies de traitements tertiaires (filtre à sable + désinfection UV et ultrafiltration).

L'étude s'appuie sur le projet AERMC REUT de Murviel-Lès-Montpellier (décrit dans la section 1.2) et permet de généraliser l'ACV à une plus grande échelle. Il est important de noter que, pour le site de Murviel, les pratiques et les équipements sont spécifiques à l'échelle de l'expérimentation et qu'il faut les rendre plus réalistes (voir section 3.2).

Dans ce contexte, les axes d'études sont les suivants :

1) Analyse de contribution de la station d'épuration par lagunage
Le but de cette analyse (correspond au cadre jaune de la figure 3.1) est de situer les principaux impacts de la station d'épuration. L'unité fonctionnelle est "1 m^3 d'eau usée traitée par lagunage". Le périmètre inclut la construction et le démantèlement des lagunes, l'entretien de la station, la construction des voiries intérieures ainsi que le curage et l'épandage des boues.

2) Analyse de contribution du système complet de référence
Le système de référence considéré est composé d'un traitement tertiaire (FAS + UV), du système d'irrigation (pompe, filtre à tamis, conduite d'amenée et système de goutte-à-goutte), de l'exploitation du champ (travail du sol, désherbage, plantation ...) et de l'application de fertilisants. L'objectif de l'analyse de contribution du système complet

(cadre bleu de la figure 3.1) est de situer les principaux impacts. Le périmètre de cet axe inclut le traitement de l'eau, l'acheminement de l'eau vers les cultures et les émissions engendrées par un sol cultivé et irrigué et son unité fonctionnelle est "1 hectare de vignes irrigué".

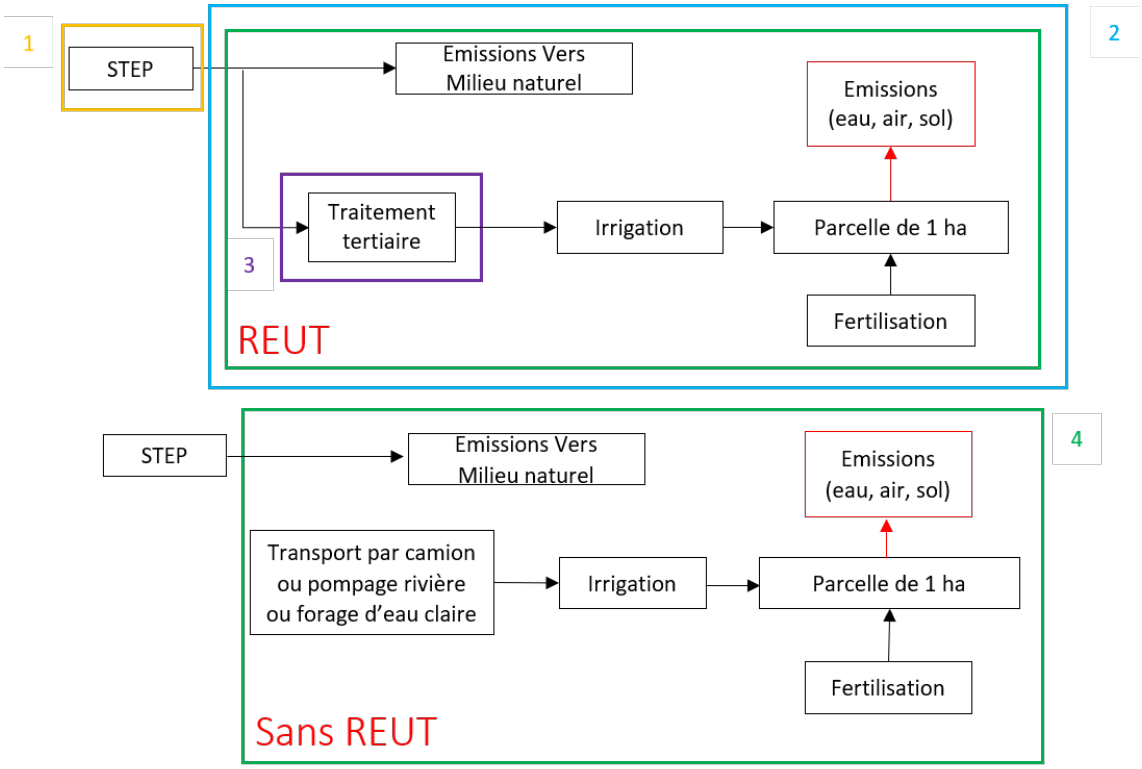


FIGURE 3.1 – Schéma des scénarios étudiés pour l'ACV de la REUT. En jaune : analyse de contribution de la station d'épuration, en bleu : l'analyse de contribution du système de référence (avec UV + FAS), en Violet : analyse comparative des différents traitements tertiaires modélisés (UF et UV+FAS), en vert : analyse comparative de l'utilisation de l'eau usée traitée, de l'eau potable et de l'eau brute

3) Comparer les traitements tertiaires

Les traitements tertiaires considérés sont un filtre à sable + désinfection UV (traitement de référence) et une ultrafiltration. L'objectif est de comparer (en violet sur la figure 3.1) les impacts environnementaux de chaque traitement tertiaire, et ainsi d'aider à la décision sur le choix de la technologie à mettre en place. L'unité fonctionnelle de cet axe est "1 m^3 d'eau traitée" et le périmètre inclut uniquement le traitement tertiaire.

Il faut noter que l'abattement des pathogènes n'est pas pris en compte dans l'ACV car actuellement aucune méthode d'impact n'a été développée dans la littérature.

4) Comparer l'utilisation de l'eau usée traitée, de l'eau potable et de l'eau brute

L'objectif est de comparer les impacts générés pour l'utilisation de l'eau usée traitée (avec

ou sans traitement tertiaire), de l'eau potable et de l'eau brute (eau de rivière et eau de forage) (en vert sur la figure 3.1). Trois scénarios sont envisagés pour l'eau usée traitée : tout d'abord le scénario actuel c'est-à-dire sans traitement tertiaire et ensuite avec un traitement tertiaire (soit un filtre à sable (FAS) suivi d'une désinfection UV soit une ultrafiltration (UF)). Le scénario avec de l'eau potable apportée par camion est celui actuellement mis en place sur le site expérimental. Et enfin, deux scénarios plus réalistes où l'eau claire provient d'un forage ou d'une rivière.

Pour cette comparaison, les engrais évités (dus au pouvoir fertilisant des eaux usées traitées) seront pris en compte ainsi que les émissions vers l'eau évitées de la station d'épuration. Le périmètre de cet axe inclut le traitement de l'eau, l'acheminement de l'eau vers les cultures et les émissions engendrées par un sol cultivé et irrigué et son unité fonctionnelle est "1 hectare de vignes irrigué".

3.2 Inventaires des scénarios

L'inventaire est une étape essentielle de l'ACV qui consiste à décrire quantitativement les flux de matières et d'énergies qui traversent un système. Diverses sources d'information ont été utilisées pour construire des inventaires solides pour les différents scénarios étudiés. Les rapports techniques ainsi que les données fournies par les responsables du projet ont permis d'avoir les premières bases des inventaires. Cependant, certaines informations ne sont pas disponibles et cette section indique toutes les sources bibliographiques de ces données manquantes.

Le travail préliminaire a consisté à réaliser des arbres de procédés car ceux ci aident à visualiser les données d'inventaires, c'est-à-dire les matériaux et procédés, nécessaires à la réalisation de l'ACV. Des exemples de schéma des procédés sont disponibles en annexes 1, 4 et 5.

3.2.1 Inventaire du traitement lagunaire

Par manque de données, la modélisation de l'infrastructure des lagunes a été basée sur les "hypothèses pour la modélisation des filières extensives de traitements des eaux usées" disponible sur le site internet ACV4E [1] ainsi que sur les deux rapports [Boutin 2011] et [Risch 2011] également disponible sur ACV4E. Ces rapports renseignent sur les types et les quantités de matériaux à utiliser, sur les procédés mis en œuvre pour la construction et le démantèlement de la station et également sur l'entretien et l'exploitation de la station. L'évaluation des distances (voiries intérieures, largeurs des lagunes...) est faite à partir de l'outil de mesure de Google Maps. Les masses volumiques des différents matériaux ont été prises dans la littérature. L'inventaire de ces données récoltées est disponible en annexe 1.

Le bilan de matière du traitement lagunaire est basé sur les bilans 24h fournis par la métropole de Montpellier. Ces bilans ne fournissant que les concentrations en polluants contenus dans les eaux en entrée et sortie de station, les émissions vers l'air et vers les boues ont quant à elles dues être estimées à l'aide du rapport "Bilans de matière des stations d'épuration modélisées pour ACV4E : hypothèses et calculs" [3] disponible sur ACV4E.

La moyenne annuelle des bilans 24h réalisés en 2017 donne des résultats en kg/j. Or, l'unité la plus adaptée pour l'analyse de cycle de vie est le g/m3, les valeurs ont donc été converties à l'aide de la formule : Flux (g/j) = Qp (m^3/j) x [concentration] (g/m^3). Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

	Charge moyenne entrante (g/m^3)	Charge moyenne sortante (g/m^3)
DCO	689,66	171,38
NGL	102,4	36,09
NTK	102,37	39,44
N-NH_4^+	74,91	29,95
N-NO_2	0,0421	0,0313
N-NO_3	0,3342	0,2865
P_T	10,33	5,789

FIGURE 3.2 – Bilan 24h de la station d'épuration par lagunage

Les hypothèses ci-dessous permettent de réaliser un bilan de matière simplifié basé sur celui d'une filière à boues activées puisque c'est le procédé de traitement le plus proche du lagunage (cultures libres de bactéries).

1) Le bilan en azote : A partir des valeurs des bilans 24h, les données manquantes c'est-à-dire la quantité d'azote organique en entrée et sortie de station d'épuration, les émissions dans l'air et dans les boues vont pouvoir être estimées. Le rendement sur l'azote total de Kjeldahl (NTK) est estimé à 70%. Le rendement calculé est de 66% sur le NTK. Celui-ci est proche de la valeur donnée dans la littérature.

Calcul des quantités d'azote organique : Par définition, l'Azote Total de Kjeldahl NTK contient majoritairement de l'azote organique (N-org) et de l'ammonium (N-NH_4^+) donc NTK = N-org + N-NH_4^+. De cette relation, la quantité d'azote organique peut être déduite (donnée manquante dans les bilans 24h).

Estimations des émissions d'azote dans l'air : Pour simplifier le bilan sur l'azote, les hypothèses suivantes peuvent être faites :
- Émissions de N-NH_3 : le dégagement d'ammoniac est le principal mécanisme d'élimination de l'azote. La photosynthèse des algues contribue à l'augmentation du pH et favorise la forme N-NH_3 (au détriment de la forme N-NH_4^+) et donc son dégagement. Si l'activité photosynthétique est forte, le pH atteint facilement 9 et à ce stade l'azote est à 50% sous

forme de N-NH_3 et 50% sous forme de N-NH_4^+. Comme l'activité photosynthétique varie, l'hypothèse d'une répartition moyenne de 40% N-NH_3/60% N-NH_4^+ peut être faite. Cela suppose que le N-NH_4^+ entrant dans la première lagune subit tout de suite cette répartition, et que tout le N-NH_3 est émis dans l'air.
- Nitrification/dénitrification : la différence entre le N-NH_4^+ entrant et émis dans l'eau d'une part et transformé en N-NH_3 d'autre part (et donc émis dans l'air) correspond au N-NH_4^+ dénitrifié. Sur cette quantité, 1% de l'azote est émis sous forme de N-N_2O, le reste étant émis sous forme de N-N_2.
- En l'absence de données sur les boues, la dernière hypothèse suppose que l'azote restant est émis dans les boues selon la répartition 90% de N-NH_4^+ et 10% de N-org.

Ces hypothèses sont traduites par ces équations :
• Ntotal, entrée eau = Ntot, air + Ntot, sortie eau + Ntot, boue
• [N-NH_4^+]entrée, eau = [N-NH_3] + [N-NH_4^+]sortie, eau + [N-NH_4^+]dénitrifié
• [N-NH_3] = 0,4 . [N-NH_4^+]entrée, eau
• [N-N_2O] = 0,01 . [N-NH_4^+]dénitrifié
• [N-N_2] = 0,99 . [N-NH_4^+]dénitrifié

Ces 5 équations vont donc permettre d'estimer les quantités de N-NH_3, de N-N_2O et de N-N_2 émises dans l'air et les quantités de N-NH_4^+ dans les boues. Le N-NO est absent du bilan car c'est un composé très volatil qui se transforme en N-N_2 rapidement. Il n'y pas de mesure de N-NO_2 et N-NO_3 dans les boues car les quantités sont trop faibles.

2) Le bilan en phosphore : Le rendement sur le phosphore total P_T est estimé à 65%. Le rendement calculé à partir des valeurs des bilans 24h est de 53%. Le phosphore total P_T est défini comme la somme du phosphore organique (P-org), du phosphate (PO_4) et du pentoxyde de phosphore (P_2O_5) :
Soit P_T = P-org + P-PO_4 + P-P_2O_5
et Ptotal, entrée eau = Ptotal, sortie eau + Ptotal, boue
En l'absence de donnée disponible, le phosphore total émis dans l'eau est défini selon la répartition observée en sortie d'une station à boues activées soit 95% de phosphate et 5% de phosphore organique. Idem pour le phosphore total transféré dans les boues soit 58% sous forme de pentoxyde de phosphore et 42% sous forme de phosphore organique.
Soit : Ptotal, sortie eau = 95% de P-PO_4 + 5% de P-org
Et Ptotal, boue = 58% de P-P_2O_5 + 42% de P-org

3) Le bilan en carbone : On considère un rendement théorique de 75% sur la DCO (Demande Chimique en Oxygène) et le rendement calculé est de 79%. En se basant sur le bilan matière d'une boue activée, il y a donc plus de carbone émis dans l'eau que dans les boues et dans l'air (C-CO_2 et C-CH_4). Pour une boue activée, 76,1% du carbone éliminé de l'eau sont émis sous forme de C-CO_2, 0,4% sont émis sous forme de C-CH_4 et 23,5% sont émis dans les boues (carbone organique). Cette répartition est utilisée pour calculer

les flux de carbone pour le lagunage naturel. Le carbone inerte, fraction de carbone dans la DCO qui n'est pas métabolisable, correspond à 37,5% de la DCO. Soit :

- C-inerte= 0,375 . DCO
- Ctot,entrée eau = C-inerte, entrée eau
- Ctot, sortie = C-CO_2 + C-CH_4 + C-inerte, sortie eau +C-boues
- C-CO_2 = 0,761 . C-éliminée
- C-CH_4 = 0,004 . C-éliminée
- C-boues = 0,235 . C-éliminée

Les résultats de ces bilans sont représentés par la figure 3.3 :

	INPUTS Substances Eau Usée (g/m3)		OUTPUTS (g/m3)					
			Emissions et rejets directs			Sous-produits	TOTAL	
			Emissions air	Emissions sol	Rejets eau	CP1 / Boues		
N-Azote	74,91	N-NH4			29,95	16,23	N-NH4	
	27,460	N-org			9,49	1,80	N-org	
	0,0421	N-NO2			0,03	0,00	N-NO2	
	0,3342	N-NO3			0,29	0,00	N-NO3	
		N-NH3	29,964				N-NH3	
		N-NO	0,0				N-NO	
		N-N_2O	0,15				N-N2O	
		N-N_2	14,8				N-N2	
	102,746	*N Total, Entrée*	44,960		39,758	18,028	102,746	*N Total, Sortie*
P-Phosp.		P-org			0,289	1,907	P-org	
		P-PO4			5,500		P-PO4	
		P-P2O5				2,634	P-P2O5	
	10,330	*P Total, Entrée*			5,789	4,541	10,330	*P Total, Sortie*
C-Carbone		C-CO2	147,904				C-CO2	
		C-CH4	0,777				C-CH4	
	258,623	C-inerte			64,268	45,673	C-inerte	
	258,623	*C Total, Entrée*	148,682		64,268	45,673	258,623	*C Total, Sortie*

FIGURE 3.3 – Bilan de matière du traitement lagunaire

3.2.2 Inventaire des systèmes d'irrigation

Les systèmes d'irrigation de tous les scénarios sont composés d'une conduite d'amenée pour relier le traitement tertiaire à la parcelle et également de tuyaux d'irrigation en goutte à goutte. La distance de la conduite du site de Murviel a été estimée avec l'outil de mesure de Google Maps, la quantité de tuyaux d'irrigation et le matériau utilisé pour 1 hectare (unité fonctionnelle des objectifs 2 et 4, détaillés dans la section 3.1) ont été estimés en fonction de ceux mis en place sur le site expérimental, c'est à dire initialement pour une

parcelle de vignes d'un demi hectare. L'ensemble des données d'inventaires sont disponibles en annexe 3.

Le système d'irrigation comprend également une pompe centrifuge et un filtre à tamis de 400 µm pour éviter le colmatage des goutteurs. Les données proviennent des documents techniques fournis par les responsables du projet.

3.2.3 Inventaire des traitements tertiaires

1) FAS + UV : Les données de ces équipements proviennent des documents techniques fournis par les responsables du projet. Ces équipements sont adaptés pour l'irrigation de 1 hectare de vignes et seront donc modélisés tels quels.

2) Ultrafiltration : Étant donné que le module d'ultrafiltration n'existe pas sur le site expérimental, sa modélisation est basé sur les données de l'étude de [Carré 2017].

L'inventaire des données utilisées ainsi que le schéma de l'installation sont disponibles en annexe 4.

3.2.4 Inventaire du scénario de l'apport de l'eau potable par camion

Ce scénario correspond à ce qui est actuellement effectué sur le site expérimental. En effet, l'absence de forage ou d'une rivière à proximité les oblige à apporter de l'eau potable par camion sur une distance de 5 km aller-retour pour aller s'alimenter à une borne installée à Murviel. Pour cela, une citerne en plastique de 2 m^3 est utilisée pour le transport. Un réservoir de stockage en béton de 3m^3 au niveau de la parcelle est présent afin de stocker l'eau durant la période d'irrigation. L'inventaire de ces données est disponible en annexe 5.

3.2.5 Inventaire des scénarios avec l'eau brute

Afin de rendre réaliste le scénario précédent, un pompage à partir d'une rivière et d'un forage d'eau claire vont être modélisés.
1) La conduite d'amenée : celle-ci relie le point de pompage à la parcelle. Elle est commune aux deux scénarios. Son inventaire est basé sur le procédé "irrigation" de la base de données Ecoinvent (voir partie 3.3.3).
2) Forage d'eau claire : la modélisation du forage est basée sur le travail de [Pradeleix 2014] et ses collaborateurs qui évalue les impacts environnementaux de systèmes de pompage d'eau souterraine, en zone semi-aride, au centre de la Tunisie. Le forage considéré correspond à l'infrastructure PS4 c'est à dire un forage d'une profondeur de 100 m et d'une

pompe submersible de 58 kg consommant 5,5 $Wh.m^{-3}.m^{-1}$.
3) Pompage à partir d'une rivière : la modélisation de ce scénario est également basée sur la publication de [Pradeleix 2014] et ses collaborateurs. La pompe considérée est une pompe de surface électrique pesant 56 kg et consommant 8 $Wh.m^{-3}.m^{-1}$.
L'inventaire de ces scénarios est disponible en annexes 6 et 7.

3.2.6 Bilan des émissions du sol irrigué

L'irrigation des cultures provoque des différentes émissions azotées et phosphatées vers l'air, le sol et l'eau.

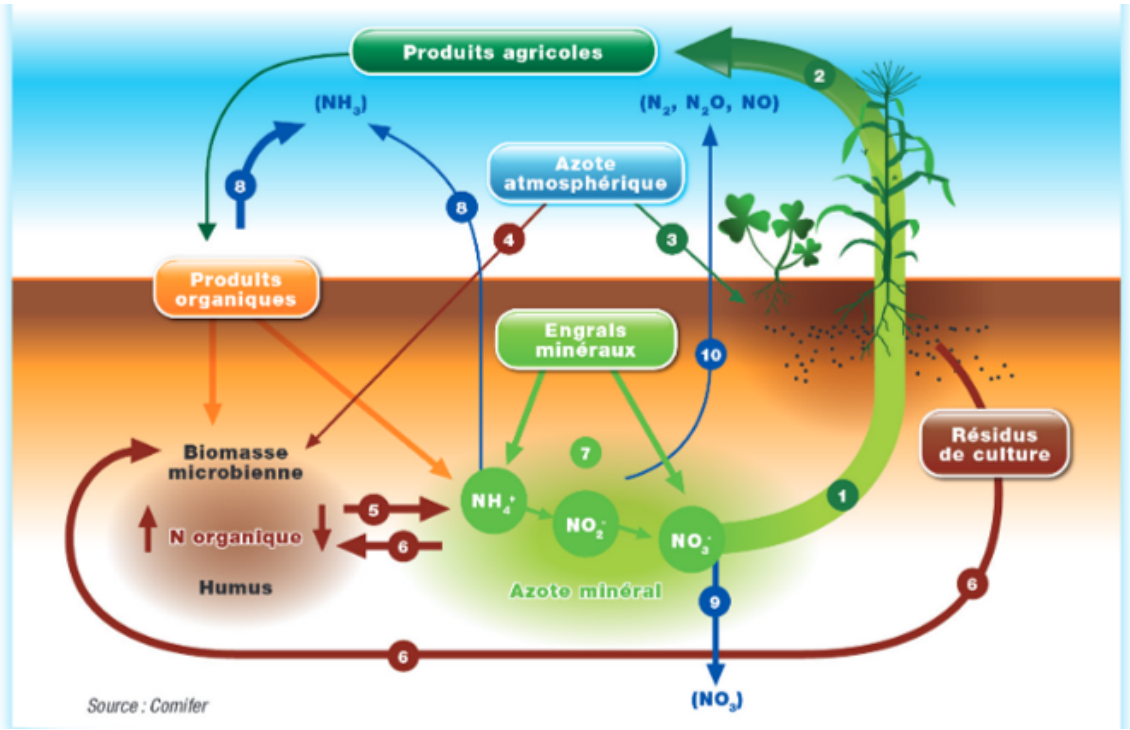


FIGURE 3.4 – Cycle simplifié de l'azote dans un sol cultivé. Légende : 1. absorption racinaire, 2. exportation par les récoltes, 3. fixation symbiotique, 4. fixation libre, 5. minéralisation, 6. organisation, 7. nitrification, 8. volatilisation, 9. lixiviation, 10. dénitrification

Ainsi, pour l'ACV, ses émissions doivent être quantifiées. Pour les émissions azotées, en l'absence de données expérimentales pour les émissions vers l'air et vers les nappes phréatiques et avec l'incohérence des données d'analyses sur le sol effectuées sur le site, ces émissions sont estimées à l'aide de modèles issus de la littérature. Dans notre cas, ces modèles proviennent des rapports Ecoinvent [Nemecek 2007] et Agribalyse [Koch 2015] car il n'existe pas encore de modèles spécifiques aux émissions dues à l'irrigation par les eaux usées traitées. Les émissions quantifiées, d'après la figure 3.4, sont : l'absorption racinaire,

la volatilisation (N-NH_3, N-N_2, N-N_2O, N-NOx) et la lixiviation (N-NO_3^-).

Les émissions phosphatées sont également calculées à l'aide de modèles. Les émissions prises en compte sont l'érosion du sol, la lixiviation et le ruissellement (toutes sous la forme de phosphate PO_4^{3-}).

Un tableau résumant les modèles utilisés pour chaque émission est disponible en annexe 8 ainsi que les valeurs obtenues pour chaque émission.

3.3 Logiciel et méthode retenus pour l'évaluation des impacts

3.3.1 Logiciel de calcul : Simapro

La réalisation d'ACV nécessite le traitement, le calcul et l'analyse de nombreuses informations. L'utilisation d'un logiciel d'ACV facilite ces différentes phases, en garantissant transparence et traçabilité. SimaPro est un logiciel de calculs qui relie les données d'inventaires, renseignées par le réalisateur de l'ACV, aux dommages environnementaux causés par les substances inventoriées. Il a été créé par les Néerlandais et est le leader mondial pour la réalisation d'ACV. Le logiciel Simapro intègre plusieurs méthodes d'évaluation (Recipe, ILCD, Usetox...) et différentes bases de données d'inventaires de cycle de vie (ICV) (Ecoinvent, ELCD, LCA Food). La base de données doit être sélectionnée lors de la construction du modèle, la méthode lors du calcul des impacts.

Simapro est basé sur un système de fiches. Ces fiches contiennent les informations suivantes (figure 3.5) :
– des entrants de la nature : ce sont les substances provenant directement de la nature sans intervention humaine (exemple : l'eau de pluie) ;
– des entrants de la « technosphère » : ce sont des matières, processus, déchets, énergies issus ou extraits par l'action humaine (issus d'une autre fiche)... ;
– des sortants vers la nature : ce sont les substances émises directement dans la nature ;
– deux sortants vers la « technosphère » : le produit fabriqué et ses éventuels coproduits, et les flux (issus de la fiche) qui intègrent des procédés nécessitant l'intervention humaine (exemple : des déchets qui intègrent un processus d'incinération de déchets) ;
– des sortants non physiques, valeurs économiques ou sociales (exemple : des bruits, des odeurs, des nombres d'emplois créés, des euros qui vont permettre de « tracer » les emplois nécessaires en cycle de vie ou de faire du life cycle costing, c'est-à-dire l'analyse des coûts économiques en cycle de vie).

Ces fiches sont toutes visualisables depuis l'interface principale de SimaPro (figure 3.6). Ces fiches peuvent être reliées entre elles pour former un réseau (appelé "arborescence") afin d'obtenir le schéma en cycle de vie du produit ou service désiré. Ce réseau indique

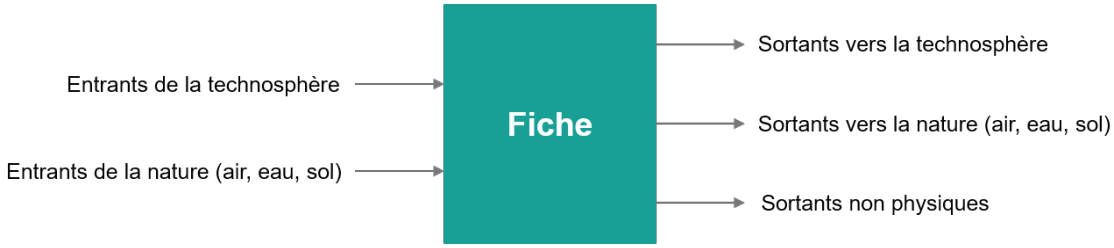


FIGURE 3.5 – Présentation des différents types d'entrants/sortants d'une fiche

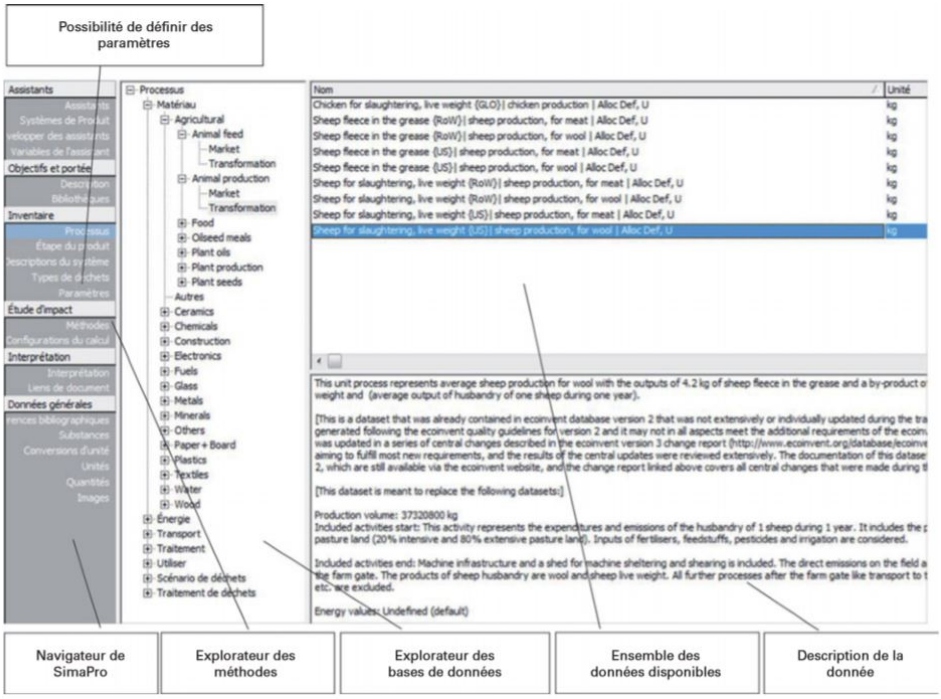


FIGURE 3.6 – Interface principale de Simapro

également la part des impacts de chaque fiche. L'annexe 9 représente le réseau du scénario EUT (FAS + UV).

3.3.2 Base de données

Les bases de données représentent les sources utilisées par les logiciels d'ACV pour calculer les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service. On distingue trois composantes principales dans la composition d'une base de données :
- Les matériaux, qui représentent la matière première des processus de fabrication (produits chimiques, métaux, matière primaire minérale et plastique, papier, biomasse, matériaux biologiques).

- Les process de production qui engendrent des impacts par les consommations énergétiques nécessaires à la transformation des matières premières ou pour le traitement des déchets (incinération, déposition, assainissement). Les inventaires de cycle de vie pour l'énergie sont souvent réalisés selon leur provenance et type (électricité, pétrole, charbon, gaz naturel, biocarburants, bioénergie, hydro-électricité, nucléaire, solaire, éolienne, biogaz).
- Le transport de mise à disposition (trafics routier, ferroviaire, aérien, maritime). Très souvent les usines ne sont pas localisées à côté des sites d'extraction de matières ou de production d'énergie. L'acheminement des énergies nécessite des infrastructures et celui des produits nécessite des étapes supplémentaires de transport afin de réaliser les assemblages finaux ou de faire subir aux produits d'autres transformations intermédiaires. Le transport vers le site de vente ainsi qu'éventuellement le transport du magasin au domicile du client doivent être quantifiés également.

On distingue deux types de bases de données :
- les bases de données généralistes : elles regroupent des informations générales sur les flux entrant et sortant liés au cycle de vie de nombreux produits et peuvent donc être utilisées pour n'importe quel type d'activités. Les plus connues sont Ecoinvent et Gabi.

- les bases de données spécifiques : elles ne traitent que des données d'un secteur particulier. Les plus connues sont LCA Food (base de données spécifique aux produits agroalimentaires) et Agribalyse (base de données spécifique à l'agriculture).

Pour cette étude, la base de données utilisée est Ecoinvent. Elle est le leader international dans le domaine des données d'écobilan et comprend 2500 usagers dans plus de 40 pays. Les données ecoinvent sont employées pour la réalisation des ACV, des déclarations environnementales de produits EPD, des bilans CO2, de la politique intégrée des produits, du management de cycle de vie, du design environnemental, de la certification environnementale et d'autres applications.

Cette base de données contient des inventaires de cycle de vie pour l'énergie (électricité, pétrole, charbon, gaz naturel, biocarburants, bioénergie, hydroélectrique, nucléaire, solaire, éolienne, biogaz), pour les matériaux (chimiques, métaux, matière primaire minérale et plastique, papier, biomasse, matériaux biologiques), pour le traitement de déchets (incinération, déposition, assainissement), pour les transports (routier, ferroviaire, aérien, maritime), pour les produits et processus agricoles, électroniques, usinage des métaux...

3.3.3 Méthode de calcul

Les méthodes de calculs visent à mettre en évidence les chaînes de causalités entre des pollutions émises, leurs effets sur l'environnement (i.e. les transformations qu'elles opèrent sur les milieux) et les dommages potentiels qui pourraient en résulter (Figure 3.7).
Le but des méthodes d'analyse de l'impact est donc de relier les données d'inventaires aux dommages environnementaux causés par les substances inventoriées. Pour ce faire, il

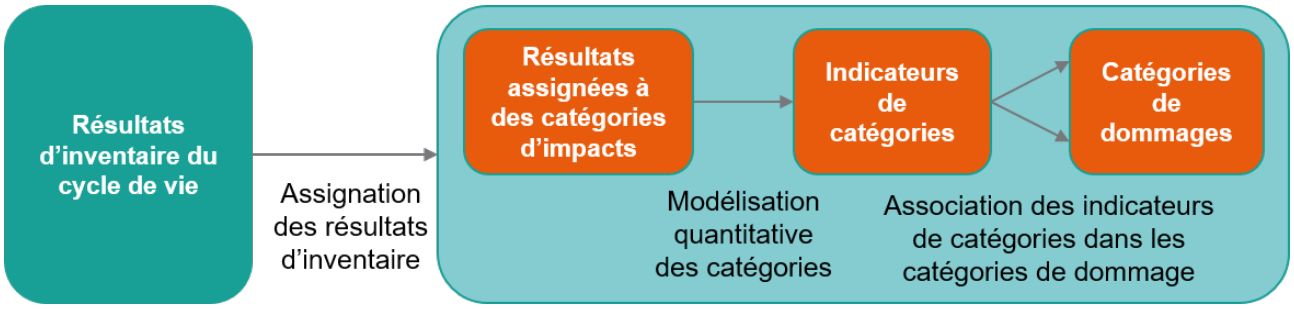


FIGURE 3.7 – Démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions sur les sujets à protéger d'après la norme ISO 14042 [2000]

est utile de grouper les résultats d'inventaire ayant des effets similaires dans des catégories d'impacts à un niveau intermédiaire, appelés "catégories intermédiaires (midpoint)". Chaque flux d'inventaire est multiplié par un "facteur de caractérisation intermédiaire" pour caractériser sa contribution à cette catégorie intermédiaire. Une étape supplémentaire permet d'allouer ces catégories intermédiaires et de calculer leur contribution à une ou plusieurs "catégories de dommages". Ces catégories considèrent les dommages sur différents sujets à protéger comme la santé humaine, la qualité des écosystèmes ou encore la consommation des ressources. La catégorie de dommages est représentée par un indicateur de dommages. Du fait que chaque étape de l'analyse de l'impact implique généralement des hypothèses et des incertitudes supplémentaires dans la caractérisation des dommages, l'incertitude des résultats augmente à mesure que l'on avance de l'inventaire à la catégorie intermédiaire puis de la catégorie intermédiaire aux résultats de dommages.

Pour cette étude, la méthode de calcul utilisée est ILCD (International Life Cycle Data system) 2011. Cette méthode est recommandée par la Commission européenne qui a analysé plusieurs méthodologies d'évaluation de l'impact sur le cycle de vie pour parvenir à un consensus sur la méthode recommandée pour chaque thème environnemental, aux niveaux midpoint et endpoint.

Les méthodes endpoint, cependant, ne sont pas incluses dans SimaPro. Aucune méthode endpoint n'a été élaborée pour la méthode ILCD, celle-ci donne donc des résultats qu'en midpoint.

Les catégories d'impacts retenues pour la méthode ILCD sont représentées par la figure 3.8.

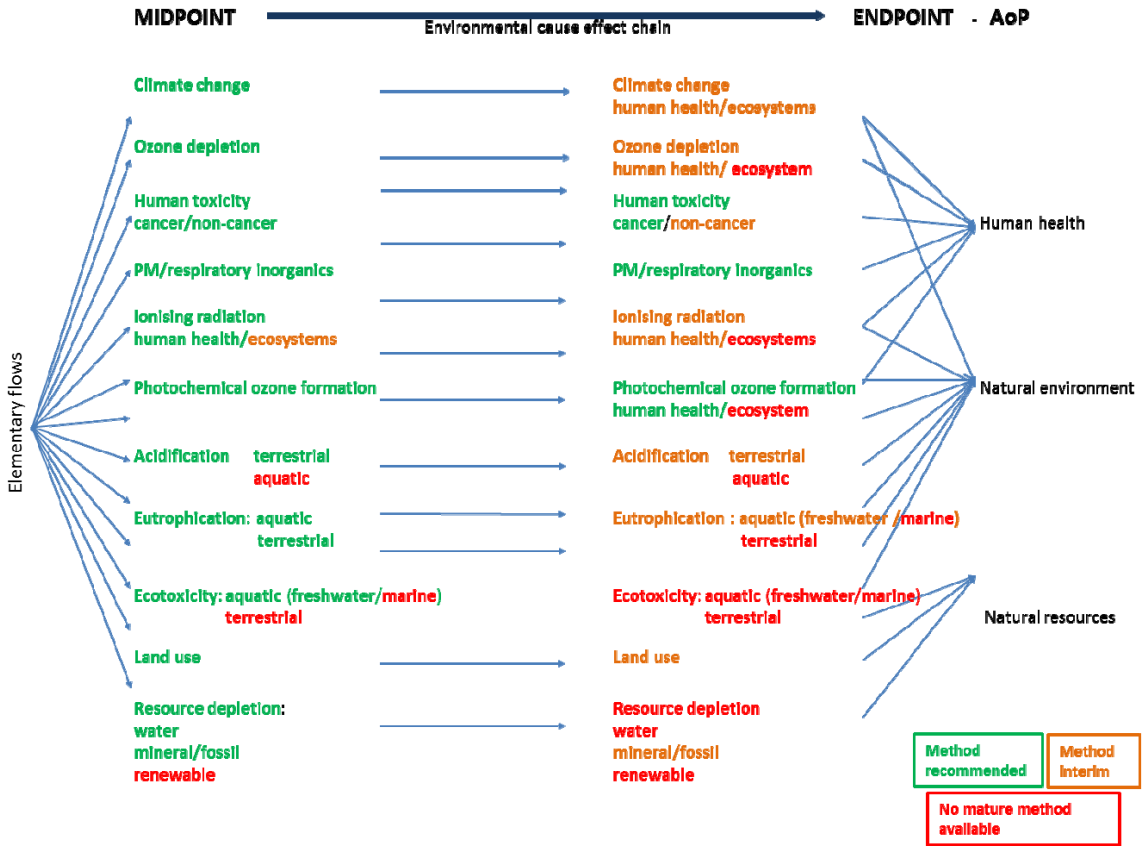


FIGURE 3.8 – Schéma des catégories d'impact traitées dans la méthode ILCD sur l'évaluation de l'impact du cycle de vie aux niveaux midpoint et endpoint. En vert, les catégories d'impact pour lesquelles une méthode a été identifiée et recommandée ; en orange, celles pour lesquelles une méthode est considérée comme prometteuse, mais pas assez robuste pour être recommandée (provisoire) ; en rouge, celles pour lesquelles aucune méthode mature n'est disponible

Les catégories d'impacts retenues pour cette étude sont : le changement climatique, la toxicité humaine (cancérigène / non cancérigène), les radiations ionisantes, l'acidification, l'eutrophisation (terrestre, eau douce et marine), écotoxicité des eaux douces et l'épuisement des ressources (en eau, fossiles, renouvelables et minérales). Ces catégories ont été choisies en se basant sur la littérature [Moretti 2019] et [Carré 2017].

Chapitre 4

Résultats et discussions

Ce chapitre a pour objectif d'exploiter et d'interpréter les résultats obtenus de l'ACV de la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures selon les différents axes développés dans la section 3.1. Les graphiques présentés sont issus des résultats d'impact donnés par Simapro.

4.1 Analyse de contribution des impacts de la station d'épuration par lagunage

Le but de l'analyse de contribution de la station d'épuration par lagunage est de situer les principaux impacts liés à ce traitement. Le périmètre correspond à l'axe 1 de la figure 3.1.

La figure 4.1 montre que l'infrastructure des lagunes génère la majorité des impacts pour les catégories du changement climatique, de la toxicité humaine, des radiations ionisantes, de l'écotoxicité de l'eau douce et de l'épuisement des ressources. Cela est dû au terrassement et au démantèlement de la station, car ils nécessitent de nombreuses heures de travail avec des véhicules de chantier consommant du diesel et rejetant du CO_2.

Les émissions dues au traitement lagunaire constituent la quasi-totalité des impacts pour l'eutrophisation et l'acidification. En effet, ce traitement émet dans l'air de l'azote, ce qui contribue à l'acidification des milieux, ainsi que des nutriments (azote et phosphore) dans l'eau lors du rejet dans la rivière qui engendre un déséquilibre du milieu et provoque ainsi de l'eutrophisation.

Le curage et l'épandage des boues ainsi que l'entretien de la station (désobstruction du dégrillage, analyse mensuelle des eaux et désherbage mécanique des abords de la station 1 fois par an) ne représentent pas d'impact significatif.

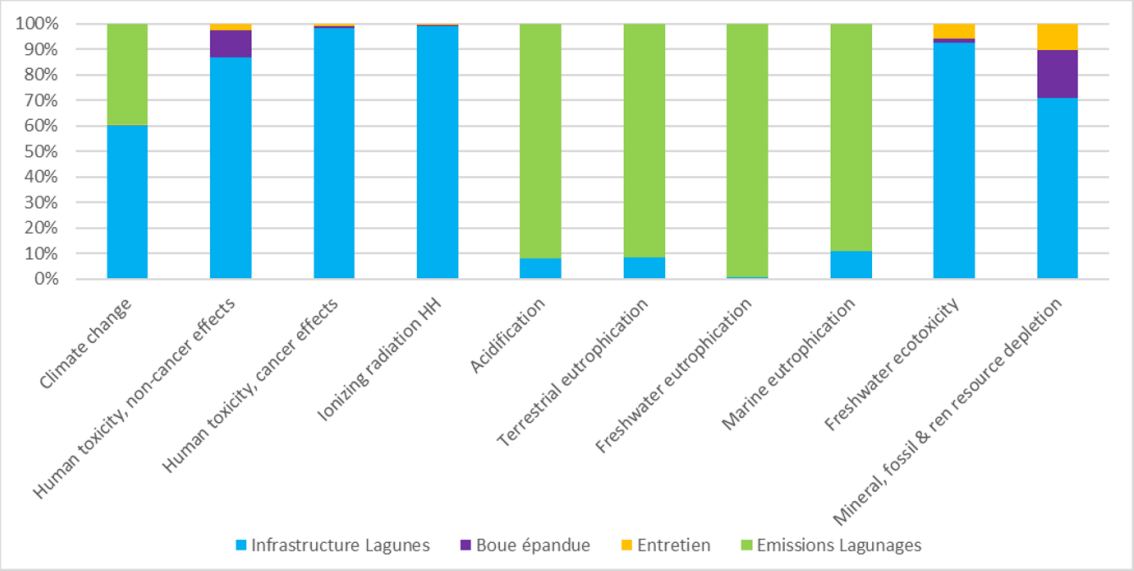


FIGURE 4.1 – Analyse de contribution des impacts de la station d'épuration par lagunage

4.2 Analyse de contribution du système de référence

Le système de référence est modélisé pour 1 hectare de vigne irrigué avec de l'eau usée traitée par lagunage et un traitement tertiaire composé d'un filtre à sable et d'une désinfection UV. Le but de l'analyse de contribution du système de référence est de déterminer la part des impacts attribués à chaque partie du système.

Les résultats présentés par la figure 4.2 démontrent que la part des impacts dus à l'ajout d'un traitement tertiaire est visible uniquement sur la catégorie des radiations ionisantes. Cela est dû à la consommation d'électricité du traitement tertiaire. Les impacts liés au traitement tertiaire sont probablement masqués sur les autres catégories par les impacts des autres parties du système, notamment l'exploitation du champ et l'application de produits phytosanitaires sur les vignes.

Les impacts dus aux émissions du rejet de l'eau traitée par lagunage dans la rivière sont importants, car malgré la réutilisation des eaux usées traitées, la part d'eau usée rejetée dans la rivière reste élevée. En effet, l'irrigation se fait sur une courte période de l'année. En faisant l'hypothèse que 10 hectares puissent être irrigués avec de l'EUT, cela permettrait d'augmenter la quantité d'eau réutilisée et ainsi diminuer le rejet du lagunage vers la rivière (en rose sur le graphique). Cependant, le graphique resterait inchangé, car les impacts sont proportionnels à la quantité d'hectares irrigués.

Il en va de même pour les fertilisants évités (en rouge sur le graphique) : ils correspondent à la quantité de fertilisants organiques ou minéraux non appliqués grâce à l'apport de nutriments avec les eaux usées traitées. Cela se voit sur les catégories d'impacts du

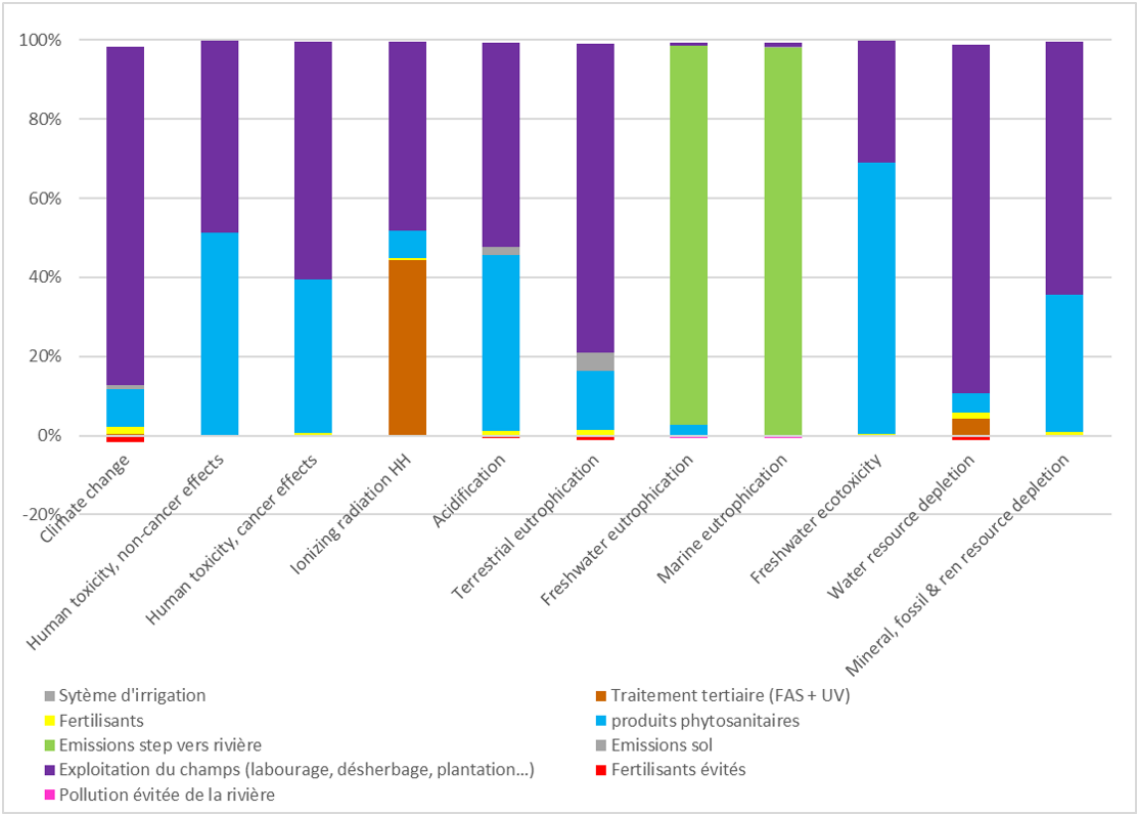


FIGURE 4.2 – Analyse de contribution du système de référence (avec traitement tertiaire FAS + UV) pour 1 hectare de vignes irrigué

changement climatique, de l'acidification et de l'eutrophisation terrestre (en effet, moins de minéraux seront extraits) mais également sur l'épuisement des ressources en eau (ici, c'est de l'eau d'arrière plan, c'est-à-dire l'eau qui a été nécessaire pour produire les fertilisants). Á l'échelle d'un hectare, l'eau usée traitée permet d'apporter la moitié des besoins de la plante en azote et un quart des besoins en phosphore.

Les impacts engendrés par l'exploitation du champ et l'application de produit phytosanitaire sur la catégorie d'épuisement des ressources en eau représentent en fait de l'eau consommée en arrière-plan, c'est-à-dire l'eau qui a été consommée pour la fabrication des produits phytosanitaires, des machines agricoles, des matériaux etc...

4.3 Analyse comparative des différentes technologies de traitement tertiaire

Le but de l'analyse comparative de deux technologies de traitement tertiaire (FAS+UV et UF) est d'aider à la décision quant au choix du traitement tertiaire à mettre en œuvre.

L'unité fonctionnelle de cette comparaison est "1 m^3 d'eau usée traitée" et inclut uniquement le traitement tertiaire. L'abattement des pathogènes n'est pas pris en compte.

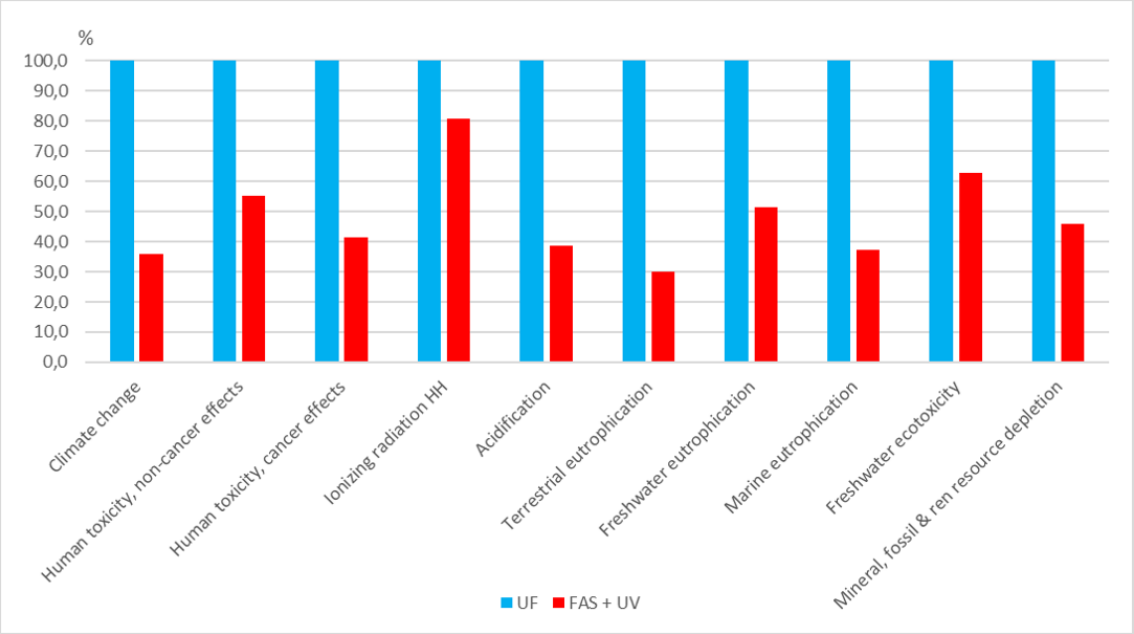


FIGURE 4.3 – Analyse comparative des différentes technologies de traitement tertiaire pour 1 m^3 d'eau usée traitée

Les résultats de Simapro présentés par la figure 4.3 montre que l'UF se révèle être plus impactante dans toutes les catégories d'impacts. Cela est majoritairement dû à la consommation en électricité, en effet l'UF consomme 3 kWh/m^3 contre 0.8 kWh/m^3 pour le FAS + UV. Ici, pour chaque catégorie d'impact, le pourcentage de la plus petite valeur est calculé par rapport à la plus grande valeur qui est fixée à 100 %.

4.4 Comparaison des différents scénarios d'irrigation

4.4.1 Scénarios eau usée traitée

Cette comparaison a pour objectif de déterminer quel scénario est le moins impactant pour l'environnement entre irriguer avec de l'eau n'ayant pas subi de traitement tertiaire et avec de l'eau traitée par filtre à sable et désinfection UV ou par ultrafiltration. L'unité fonctionnelle est "1 hectare de vigne irrigué". Ici, pour chaque catégorie d'impact, le pourcentage de la plus petite valeur est calculé par rapport à la plus grande valeur qui est fixé à 100 %.

La figure 4.4 montre qu'il n'y a pas de différence significative entre aucun traitement

tertiaire et ajout d'un FAS + UV et ce sur toutes les catégories d'impacts. Cela s'explique par la grande différence de valeurs des impacts, en effet, ceux du scénario EUT (UF) sont nettement supérieurs aux autres scénarios, ce qui tend à minimiser leurs impacts (hormis pour les catégories d'impact de l'eutrophisation, car les émissions vers l'eau, l'air et le sol sont considérées comme identiques quelque soit la technologie utilisée).

Cependant, la prise en compte de l'impact des pathogènes sur la santé humaine pourrait représenter une différence d'impact. En effet, le FAS+UV permet l'abattement jusqu'à 4 LOG de pathogènes alors que sans traitement tertiaire, les pathogènes peuvent représenter un risque pour la santé humaine. Le traitement tertiaire par ultrafiltration apparaît donc comme le plus impactant sur l'environnement, et ce sur toutes les catégories d'impacts. Cependant c'est la technologie qui permet d'abattre le plus grand nombre de pathogènes et limiterait donc un risque pour la santé.

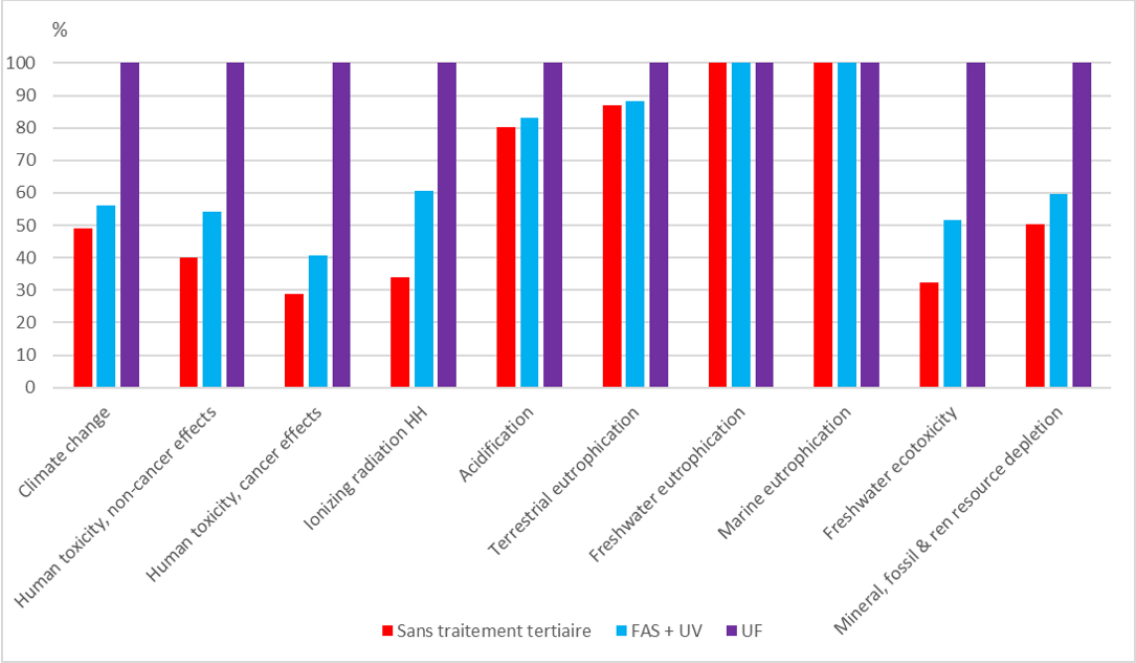


FIGURE 4.4 – Analyse comparative des différents scénarios d'irrigation d'un hectare de vignes avec de l'eau usée traitée

4.4.2 Scénarios eau potable et eau usée traitée

La figure 4.5 compare les scénarios d'irrigation avec de l'eau usée traitée (avec ou sans traitement tertiaire) et avec de l'eau potable transportée par camion (situation actuelle sur le site de Murviel).

Ce dernier est plus impactant sur toutes les catégories d'impacts sauf pour les radiations

ionisantes qui sont dues à la consommation en électricité des traitements tertiaires (pour le scénario sans traitement tertiaire cela est dû à la consommation électrique de la pompe inclue dans le système d'irrigation). L'impact de l'irrigation pour l'eau potable transportée

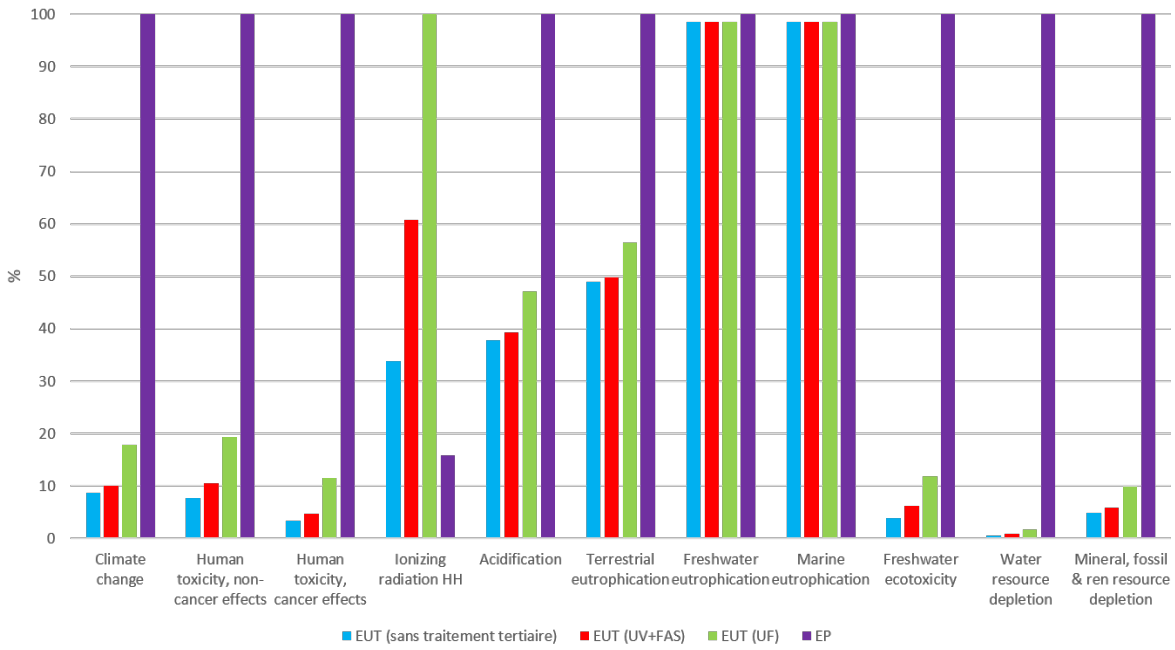


FIGURE 4.5 – Analyse comparative de l'irrigation d'un hectare de vignes avec les scénarios suivants : EP (apport par camion) et EUT (sans traitement tertiaire, avec UF et avec UV + FAS)

par camion sur l'eutrophisation de l'eau douce et marine, est due au fait que la totalité de l'eau traitée par la station est rejetée dans la rivière. Pour les scénarios de REUT, les impacts sont identiques sur ces deux catégories d'impacts malgré que moins d'eau soit rejetée dans la nature par rapport au scénario EP. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la quantité d'eau réutilisée est négligeable devant le volume rejeté : 500 m^3 recyclés pour l'irrigation de 1 hectare contre 73000-500 = 72500 m^3 rejetés dans le milieu naturel.

Cependant, les impacts des scénarios EUT sont identiques pour les trois cas sur toutes les catégories d'impacts (sauf les radiations ionisantes) alors qu'il a été montré précédemment que le scénario avec l'ultrafiltration était le plus impactant. Cela pourrait s'expliquer par la grande différence de valeurs des impacts. En effet, ceux du scénario d'irrigation avec de l'eau potable sont nettement supérieurs à ceux des scénarios EUT, ce qui tend à minimiser leurs impacts.

Á ce stade, l'apport d'eau potable par camion sur une distance de 5km aller-retour est plus impactant que la REUT à partir de la station située à 600 m de la parcelle. Le scénario EUT sans traitement tertiaire est le moins impactant. Toutefois, ce dernier

pourrait présenter des risques sanitaire. Suite aux résultats de cette section, le scénario d'irrigation avec de l'eau usée traitée par filtre à sable et désinfection UV est retenu pour la suite de cette étude et sera comparé à d'autres scénarios d'irrigation avec de l'eau brute.

4.5 Analyse de contribution du scénario eau potable apportée par camion

Le but de cette analyse de contribution est de déterminer où se situent les impacts les plus élevés dans le scénario de l'irrigation avec de l'eau potable afin de pouvoir proposer des pistes d'amélioration.

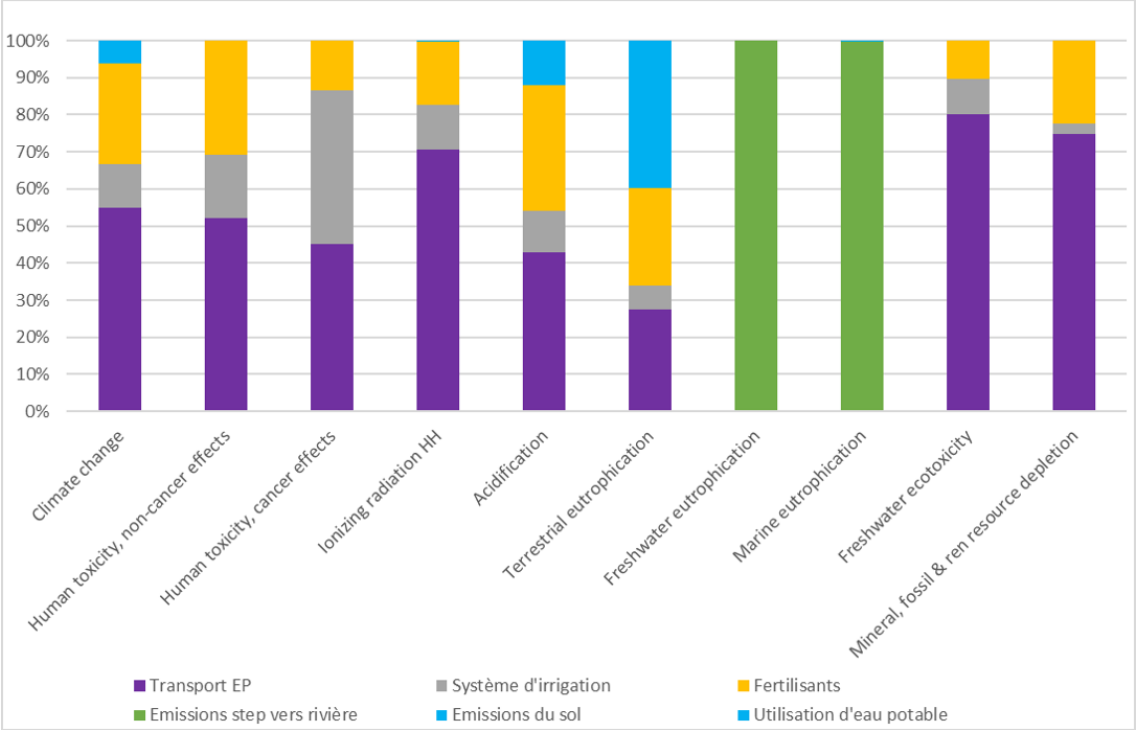


FIGURE 4.6 – Analyse de contribution du scénario EP (transport par camion) pour l'irrigation de 1 hectare de vignes

D'après les résultats présentés par la figure 4.6, le transport de l'eau potable représente la majorité des impacts pour les catégories d'impact du changement climatique, de la toxicité humaine, des radiations ionisantes, de l'écotoxicité terrestre et de l'épuisement des ressources. Cela est dû à la consommation de diesel et au rejet de CO_2. Sachant cela, il est intéressant de modéliser d'autres scénarios, par exemple l'apport d'eau claire par pompage à partir d'une rivière ou encore par forage. Les autres impacts dus aux fertilisants, aux

émissions dues au rejet de l'eau dans la rivière et l'utilisation de l'eau potable peuvent être diminués grâce à la REUT.

4.6 Comparaison des différents scénarios avec de l'eau potable et de l'eau brute

Cette analyse compare le scénario EP (apport par camion), EB rivière (pompage à partir d'une rivière) et EB forage. L'unité fonctionnelle est "1 hectare de vigne irrigué".

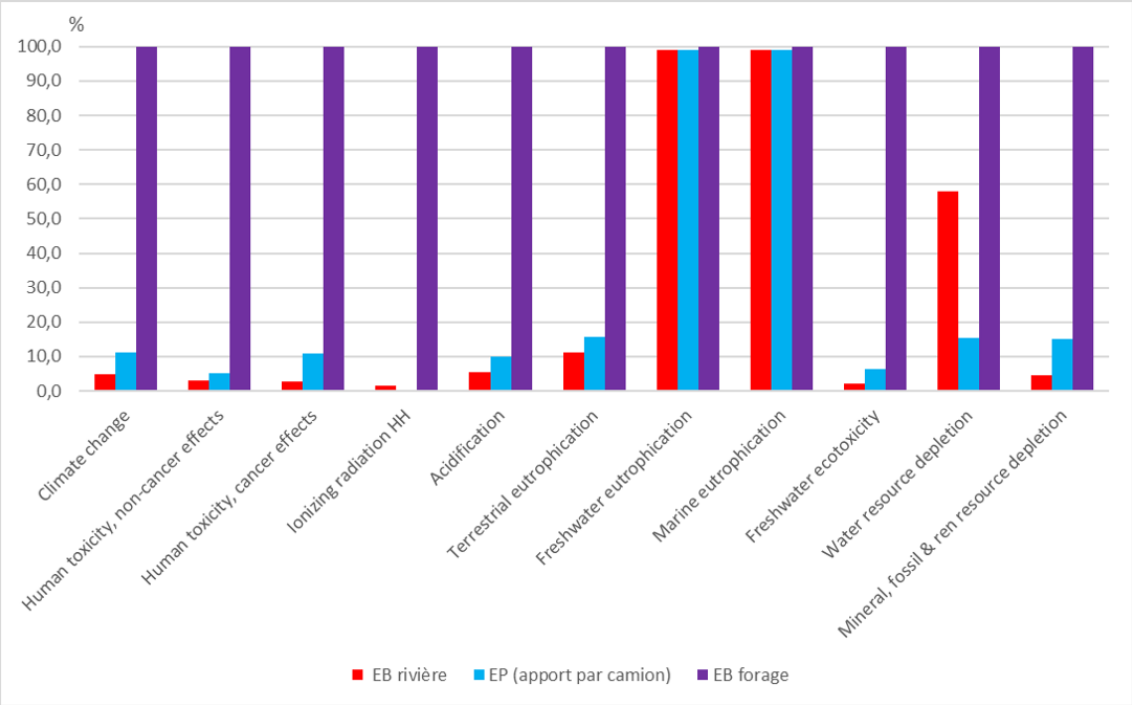


FIGURE 4.7 – Analyse comparative de l'irrigation d'un hectare de vignes avec les scénarios suivants : EP (apport par camion) EB (pompage à partir d'une rivière) et EB (forage)

Les résultats de Simapro montrés par la figure 4.7 montrent que le forage est plus impactant sur toutes les catégories d'impacts. Cela est dû à son infrastructure (dû au forage) et à la pompe utilisée (consommation nettement supérieure aux pompes des autres scénarios) résumées par la figure 4.8.

Pour les catégories de l'eutrophisation, les impacts sont les mêmes pour les trois scénarios car la quantité d'eau traitée par la station rejetée dans la rivière est identique. Les impacts de l'épuisement de la ressource en eau sont majoritairement dus à la quantité d'eau qu'il a fallut pour construire les infrastructures du forage et du pompage à partir d'une

rivière. Le scénario du pompage de l'eau brute à partir d'une rivière se révèle être moins impactant que l'apport d'eau potable par camion.

	Infrastructure	Type de pompe	Poids pompe (kg)	Consommation pompe (kWh/m^3)
EP	-	Surface	8	0,0178
EB rivière	Pompe + conduite d'amenée enterrée	Surface	56	8
EB forage	Pompe + conduite d'amenée enterrée + forage	Submersible	58	550

FIGURE 4.8 – Infrastructure et pompes utilisées pour les scénarios EP et EB

D'après les résultats de la section 4.4.2, il paraissait évident que la REUT était le scénario à privilégier. Cependant, le scénario eau potable apportée par camion n'est pas réaliste (le transport de l'eau potable par camion a une grande part de responsabilité dans les impacts). Dans la réalité, les agriculteurs se procurent l'eau d'une autre façon (par pompage ou forage par exemple). C'est donc le scénario d'apport d'eau brute par pompage dans une rivière est donc retenu pour la suite de l'étude.

4.7 Comparaison de l'irrigation avec de l'eau usée traitée et avec de l'eau de rivière

Suite aux résultats des sections 4.4.2 et 4.6, les scénarios EUT (FAS + UV) et EB (pompage rivière) ont été retenus et comparés. La figure 4.9 montre les résultats de l'étude.

Le scénario EB (pompage rivière) se révèle être le plus impactant sur toutes les catégories d'impacts sauf pour l'eutrophisation car la quantité d'eau rejetée dans la rivière après le traitement lagunaire est similaire dans les deux cas (72500 m^3 pour EUT et 73000 m^3 pour EB rivière).

Pour la catégorie de l'épuisement de la ressource en eau, le scénario EB rivière apparaît comme le plus impactant car l'utilisation de cette ressource peut priver la rivière d'une partie de son eau. Cependant, si l'eau est réutilisée en sortie de station, celle-ci ne sera pas rejetée dans la rivière. Cela devrait donc revenir au même.

De plus, il n'est peut-être pas pertinent de rejeter de l'eau dans la rivière et de la pomper un peu plus loin pour l'irrigation. Installer un traitement tertiaire et réutiliser l'eau directement serait donc plus avantageux (car le traitement tertiaire est moins impactant que l'infrastructure nécessaire au pompage dans une rivière) et permettrait de diminuer la pollution rejetée dans la rivière.

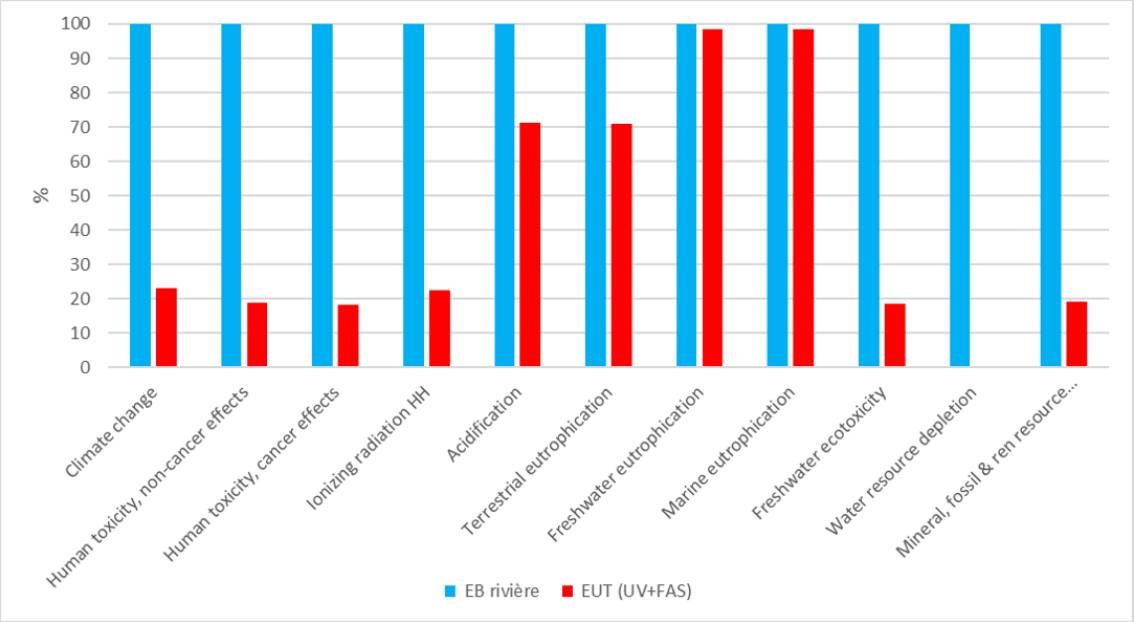


FIGURE 4.9 – Analyse comparative pour l'irrigation d'un hectare de vignes avec de l'eau usée traitée par lagunage puis par un traitement tertiaire (UV + FAS) ou avec de l'eau brute issue d'une rivière

Cette étude permet de conclure que la réutilisation des eaux usées retraitées par filtre à sable et désinfection UV est le scénario le moins impactant pour l'environnement et le plus adapté pour la commune de Murviel-Lès-Montpellier.

Conclusions et perspectives

Cette étude visait à réaliser une analyse des impacts environnementaux liés à l'irrigation d'un hectare de vignes avec des eaux usées traitées et de comparer avec l'utilisation de l'eau potable et de l'eau brute de surface ou de forage. Cette étude est basée sur le projet expérimental AERMC de Murviel-Lès-Montpellier.

Les impacts du changement climatique, de la toxicité (pour l'homme et l'eau douce), de l'eutrophisation (terrestre, marine et eau douce), de l'acidification, de l'épuisement des ressources et des radiations ionisantes ont été analysés selon la méthode d'évaluation des impacts ILCD.

L'analyse de contribution du système de référence (irrigation d'un hectare de vignes avec de l'eau usée traitée par lagunage et filtre à sable suivis d'une désinfection UV) a montré que la part des impacts dus à l'ajout d'un traitement tertiaire est visible uniquement sur la catégorie des radiations ionisantes. Cela est dû à la consommation en électricité du traitement tertiaire.

Deux technologies de traitement tertiaire ont ensuite été comparées : l'ultrafiltration s'est révélée être plus impactante que le filtre à sable suivi d'une désinfection UV.

L'irrigation d'un hectare de vignes avec des EUT donne de meilleurs résultats que l'irrigation avec de l'EP apportée par camion pour les catégories d'impact de l'écotoxicité (humaine et eau douce), l'acidification et le changement climatique. Par rapport aux ressources en eau potable, les impacts potentiels de la réutilisation des EUT sur les radiations ionisantes sont affectés par l'ajout d'un traitement tertiaire pour traiter l'eau afin de respecter la réglementation de plus en plus sévère.

Afin de rendre le scénario EP plus réaliste, deux scénarios d'EB provenant d'un forage ou d'une rivière ont été modélisés. Le scénario EB forage est le plus impactant. Cela est dû à la puissance de la pompe et à l'infrastructure du forage. C'est donc le scénario EB rivière qui est comparée au scénario EUT (FAS+UV) et celui-ci s'est avéré moins impactant et plus adapté à l'échelle de la commune de Murviel-Lès-Montpellier.

Bien que les flux d'entrées et de sorties soient directement liés à l'emplacement et aux caractéristiques spécifiques du champ expérimental, l'étude a identifié les domaines de contribution bénéfique et les principales sources de dommages environnementaux liés à la

réutilisation des EUT pour l'irrigation des cultures.

Par rapport aux ressources en eau conventionnelles, les impacts environnementaux de la REUT en agriculture sont affectés en partie par la phase de traitement. Cependant, la REUT permet de diminuer les rejets de la station d'épuration dans les milieux naturels et ainsi contribue à diminuer l'acidification et l'eutrophisation des rivières. De plus, dans notre cas, l'eau usée traitée permet d'apporter la moitié des besoins de la plante en azote et un quart des besoins en phosphore, ce qui permet de diminuer l'apport de fertilisants organiques ou minéraux.

Pour les perspectives de cette études, nous pouvons nous demander quelle est la consommation effective en eau aux différents stades du cycle de vie de notre système (1 hectare de vignes irrigué) et quel est la solution a privilégier selon le stress hydrique de la zone considérée ? L'empreinte eau est un outil qui permettrait de répondre à ses questions.

L'empreinte eau du système ainsi que la prise en compte des pathogènes dans l'ACV fera l'objet de recherches futures. Cela permettra de mieux comprendre les conséquences environnementales de la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture. En effet, les pathogènes peuvent représenter un risque sanitaire, mais ce risque n'a encore jamais été quantifié en ACV.

Les résultats de cette étude donnent des éléments utiles, comme le remplacement des engrais, les effets sur la disponibilité de l'eau et la qualité de l'écosystème, pour redéfinir les réglementations, aider à la décision et accroître l'acceptabilité sociale de la réutilisation des eaux usées dans l'agriculture.

Annexes

Annexe 1 : Inventaire du traitement lagunaire

1) Inventaire des émissions :

Émissions pour 1 m^3	Quantité	Unité	Données Ecoinvent
Vers l'air	36.5	g	Ammonia
	0.2	g	Dinitrogen monoxide
	14.8	g	Nitrogen, atmospheric
	547.8	g	Carbon dioxide, biogenic
	1.04	g	Methane, biogenic
Vers l'eau	38.4	g	Ammonium, ion
	9.5	g	Nitrogen, organic bound
	0.1	g	Nitrogen dioxide
	1.25	g	Nitrate
	0.3	g	Phosphorus
	16.7	g	Phosphate
	64.2	g	Carbon
	0.0025	g	Carbamazepine
Vers le sol	20.8	g	Ammonium, ion
	1.8	g	Nitrogen
	1.9	g	Phosphorus
	5.9	g	Phosphorus pentoxide
	45.6	g	Carbon

FIGURE A1 – Inventaire des émissions liées au traitement de 1 m^3 d'eau usée par lagunage

2) Arbre des procédés :

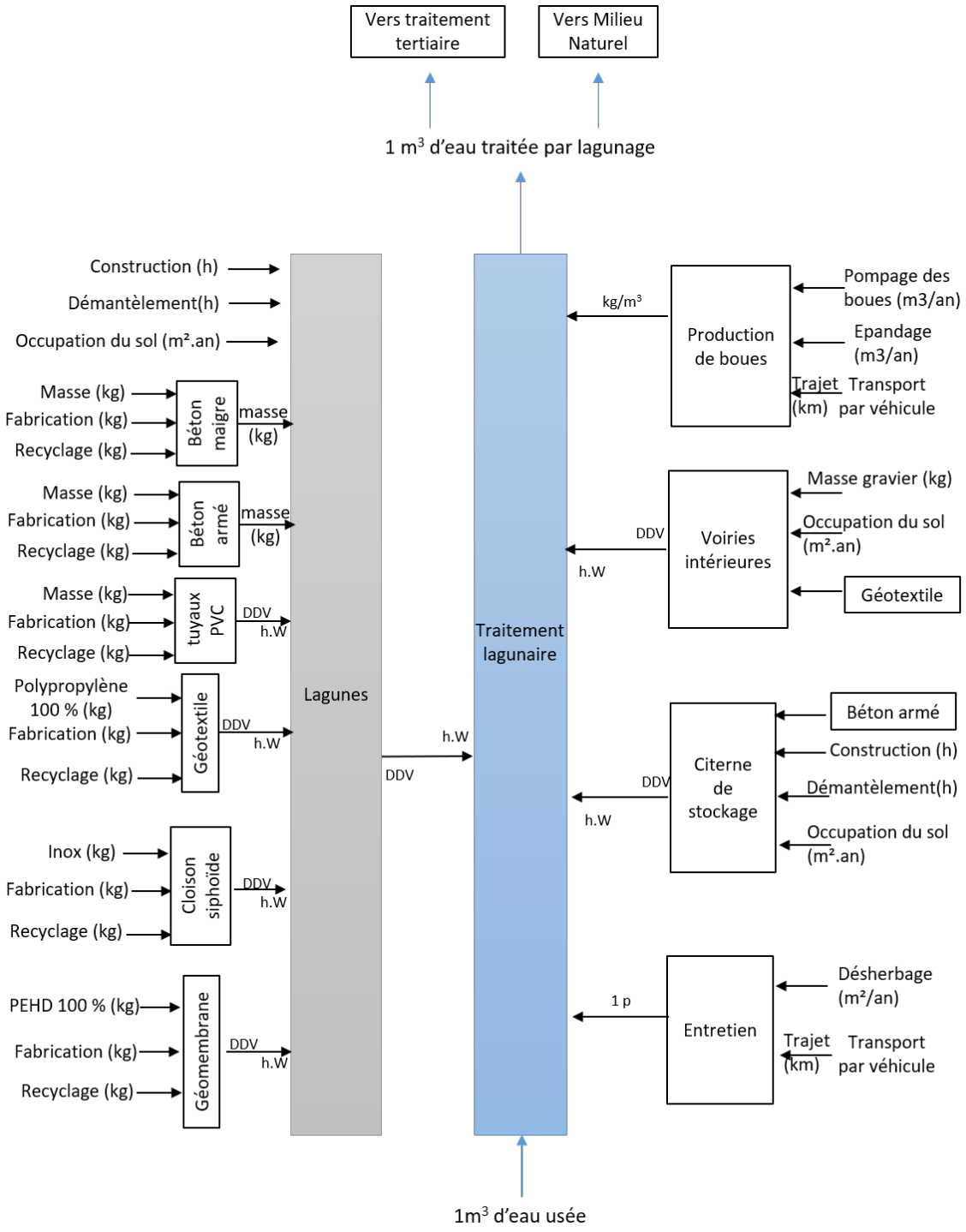


FIGURE A2 – Arbre des procédés du traitement lagunaire

3) Inventaire des matériaux et procédés :

La légende est la suivante : [1] acv4e [2] ecoinvent [3] hypothèse

Matière/Process	Quantités/Flux		Sources des données	Source Ecoinvent	Fin de vie incluse	Commentaires
	Valeur	Unité				
CONSTRUCTION						
Béton armée (fabrication et mise en œuvre)	31750	m^3	[2]	Concrete, sole plate and foundation {RoW}| market for | Cut-off, S	non	conversion kg → m^3 en multipliant par la masse volumique du béton armé 2400 kg/m^3 , différents process disponibles qui les différent juste par le volume de production
Béton armée (fin de vie)		kg	[3]	Waste reinforced concrete {Europe without Switzerland}| treatment of waste reinforced concrete, collection for final disposal | Cut-off, S	oui	tout ce qui est utilisé est recyclé
Béton maigre (fabrication et mise en œuvre)	8800	m^3	[2]	Lean concrete {RoW}| market for | Cut-off, S	non	conversion kg → m^3 en multipliant par la masse volumique du béton armé 2250 kg/m^3 , différents process disponibles qui les différent juste par le volume de production
Béton maigre (fin de vie)		kg	[3]	Waste concrete, not reinforced {Europe without Switzerland}| treatment of waste concrete, not reinforced, collection for final disposal | Cut-off,	oui	tout ce qui est utilisé est recyclé
PVC (masse de tuyaux)	1200	kg	[1]	Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO}| market for | Cut-off, S	non	somme des mètres de tuyaux en pcv multiplié par la masse volumique du pvc
PVC (transformation)			[3]	Extrusion, plastic pipes {RER}| production | Cut-	non	
PVC (fin de vie)			[3]	PVC (waste treatment) {GLO}| recycling of PVC |	oui	tout ce qui est utilisé est recyclé
PEHD (Géomembrane)	24284,9	kg	[1]	Polyethylene, high density, granulate {GLO}|	non	
PEHD (mise en œuvre)			[3]	Extrusion, plastic film {RER}| production | Cut-	non	
PEHD (fin de vie)			[3]	PE (waste treatment) {GLO}| recycling of PE | Cut-	oui	tout ce qui est utilisé est recyclé
PP (géotextile)	14498,7	kg	[1]	Polypropylene, granulate {GLO}| market for |	non	
PP (mise en œuvre)			[3]	Extrusion, plastic film {RER}| production | Cut-	non	
PP (fin de vie)			[3]	PP (waste treatment) {GLO}| recycling of PP | Cut-	oui	tout ce qui est utilisé est recyclé
Inox (cloison siphoïde)	20	kg	[1]	Steel, chromium steel 18/8 {GLO}| market for |	non	
Inox (mise en œuvre)			[3]	Metal working, average for chromium steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-	non	
Inox (fin de vie)			[3]	Steel and iron (waste treatment) {GLO}| recycling of steel and iron | Cut-off, S	oui	tout ce qui est utilisé est recyclé
Gravier	1428000	kg	[1]	Gravel, round {RoW}| market for gravel, round |	non	
Chantier usage tractopelle (Terrassement et démantèlement)	1537170	m^3	[1]	Excavation, skid-steer loader {RER}| processing | Cut-off, S	oui	émissions prise en compte
Occupation du sol	5,44E+05	m^2.a	[1]	Occupation, industrial area	oui	Zones revêtues artificiellement (avec du béton, de l'asphalte ou stabilisées, p. ex. terre battue) sans végétation sur la majeure partie de la zone en question, qui contient également des bâtiments et/ou des zones avec végétation. surface terrain step multiplié par durée de vie step
EXPLOITATION/MAINTENANCE						
Transport pour entretien step	600	km/an	[1] + [3]	Transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4 {GLO}| market for | Cut-off, S	oui	désherbage + interventions dégrilleur + réalisation bilan 24 h , émissions prises en compte
Désherbage	7646	m^2/an	[3]	Mowing, by motor mower {RoW}| processing |	oui	
Fin de vie des boues	0,002712329	m^3de boue/m^3 d'eau	[1]	Excavation, skid-steer loader {RER}| processing |	oui	Curage
			[1]	Liquid manure spreading, by vacuum tanker {RoW}| processing | Cut-off, S	oui	Epandage

FIGURE A3 – Inventaire des matériaux et des procédés de la station d'épuration par lagunage

Annexe 2 : Inventaire des procédés communs

La légende pour les annexes suivantes est : [1] acv4e [2] hypothèse [3] Données expérimentales du projet [4] Ecoinvent [5] Bilans [6] Carré et al. 2017 [7] Pradeleix et al. 2014

COMMUN						
Procédés	Unité fonctionnelle	Quantité	Unité	Source Ecoinvent	Types d'émissions	Sources
Fumier de bergerie	Pour 1 tonne	6,7	kg/t de fumier	Nitrogen fertiliser, as N {GLO}| market for | Cut-off, S	-	[4]
		4	kg/t de fumier	Phosphate fertiliser, as P2O5 {GLO}| market for | Cut-off, S	-	[4]
		12	kg/t de fumier	Potassium fertiliser, as K2O {GLO}| market for | Cut-off, S	-	[4]
		1	ton	Solid manure loading and spreading, by hydraulic loader and spreader {RoW}| processing | Cut-off, S	-	[1]
Produit phytosanitaire	Pour 1L	0,8	kg	Copper sulfate {GLO}| market for | Cut-off, S	-	[3]
		0,2	kg	Lime, hydrated, loose weight {RoW}| market for lime, hydrated, loose weight | Cut-off, S	-	[3]
Fertilisants évités avec les EUT	Pour 1 ha	15	kg	Nitrogen fertiliser, as N {GLO}| market for | Cut-off, S	-	[4]
		4	kg	Phosphate fertiliser, as P2O5 {GLO}| market for | Cut-off, S	-	[4]
		15	kg	Potassium fertiliser, as K2O {GLO}| market for | Cut-off, S	-	[4]
Emissions lagunage vers l'eau	Pour 1 m³	38,4	g	Ammonium, ion	eau	[5]
		9,49	g	Nitrogen, organic bound	eau	[5]
		0,1	g	Nitrogen dioxide	eau	[5]
		1,25	g	Nitrate	eau	[5]
		0,289	g	Phosphorus	eau	[5]
		16,665	g	Phosphate	eau	[5]
		64,268	g	Carbon	eau	[5]
		0,0025	g	Carbamazepine	eau	[5]
Emissions dues à l'irrigation avec EUT	Pour 1 ha	0,9	kg	Ammonia	air	[5]
		2,6	kg	Nitrogen, atmospheric	air	[5]
		0,3	kg	Dinitrogen monoxide	air	[5]
		0,35	kg	Nitrogen dioxide, FR	air	[5]
		21,3	kg	Nitrate	eau	[5]
		1,115	kg	Phosphate	eau	[5]

FIGURE A4 – Inventaire des procédés communs

Annexe 3 : Inventaire du système d'irrigation

SYSTÈME D'IRRIGATION							
Equipements	Durée de vie	Quantité	Unité	Source Ecoinvent	Fin de vie incluse	Sources	Commentaires
Conduite d'amenée EUT(distance traitement tertiaire - parcelle)	5 ans	133	kg	Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO}| market for | Cut-off, S	non	[1] + [3]	600m : distance traitement tertiaire - parcelle
		134	kg	Extrusion, plastic pipes {RER}| production | Cut-off, S	non	[4]	1 kg of this process equals 0.996 kg of extruded plastic pipes.
		133	kg	PVC (waste treatment) {GLO}| recycling of PVC | Cut-off, S	oui	[4]	
Conduite d'amenée EP (distance cuve de stockage - parcelle)	5 ans	23	kg	Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO}| market for | Cut-off, S	non	[1] + [3]	100 m : distance cuve stockage ep _parcelle
		23,1	kg	Extrusion, plastic pipes {RER}| production | Cut-off, S	non	[4]	1 kg of this process equals 0.996 kg of extruded plastic pipes.
		23	kg	PVC (waste treatment) {GLO}| recycling of PVC | Cut-off, S	oui	[4]	
Tuyaux d'irrigation de la parcelle (EUT, EP, EB)	5 ans	157	kg	Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO}| market for | Cut-off, S	non	[1] + [3]	700 m de tuyaux d'irrigation sur 1 hectare
		158	kg	Extrusion, plastic pipes {RER}| production | Cut-off, S	non	[4]	1 kg of this process equals 0.996 kg of extruded plastic pipes.
		157	kg	PVC (waste treatment) {GLO}| recycling of PVC | Cut-off, S	oui	[4]	
Pompe centrifuge 5HM (EUT sans traitement, EUT FAS+UV, EP)	2 ans	20	kg	Steel, unalloyed {GLO}| market for | Cut-off, S	non	[1] + [3]	
		20	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RoW}| processing | Cut-off, S	non	[4]	
		20	kg	Steel and iron (waste treatment) {GLO}| recycling of steel and iron | Cut-off, S	oui	[4]	
		0,0178	kWh/m³	Electricity, medium voltage {FR}| market for | Cut-off, S	non	[1] + [3]	
Filtre autonettoyant Amiad 400 µm (EUT sans traitement tertiaire, EUT FAS+UV)	5 ans	25	kg	Steel, unalloyed {GLO}| market for | Cut-off, S	non	[1] + [3]	
		0,5	kg	Polypropylene, granulate {GLO}| market for | Cut-off, S	non	[4]	
		25	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, S	non	[4]	
		0,5	kg	Blow moulding {RER}| production | Cut-off, S	non	[4]	
		0,5	kg	PP (waste treatment) {GLO}| recycling of PP | Cut-off, S	oui	[4]	
		25	kg	Steel and iron (waste treatment) {GLO}| recycling of steel and iron | Cut-off, S	oui	[4]	

FIGURE A5 – Inventaire des systèmes d'irrigation

Annexe 4 : Inventaire des scénarios EUT

1) Arbre des procédés :

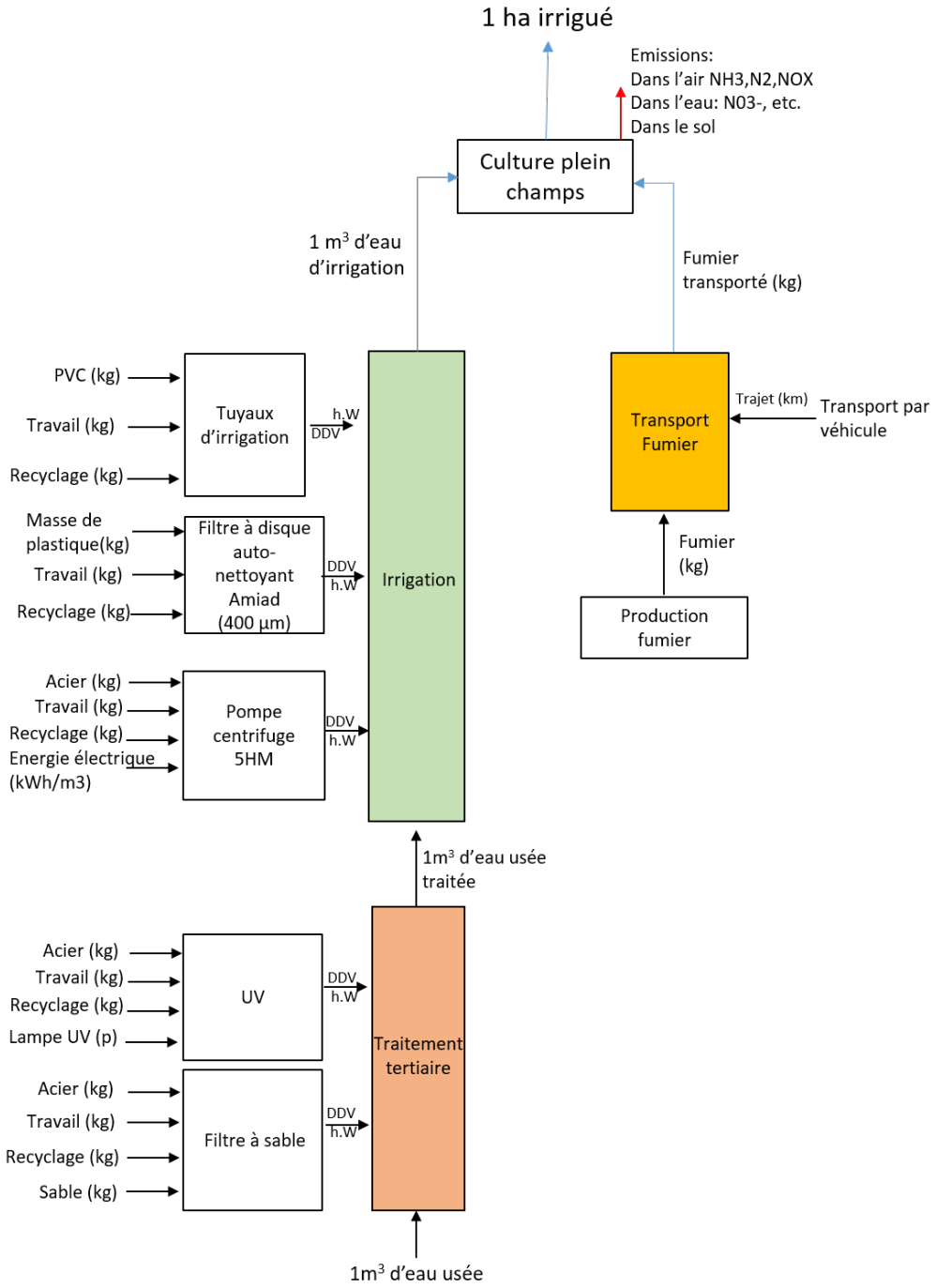


FIGURE A6 – Arbre des procédés du scénario EUT (FAS + UV)

2) Inventaire des matériaux et procédés :

SCENARIOS EUT						
Equipements	Durée de vie	Quantité	Unité	Source Ecoinvent	Fin de vie incluse	Sources
Reacteur UV	16 000 h	36,8	kg	Steel, unalloyed {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[3] et [4]
		36,8	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, S	Non	[3] et [4]
		3	p	Ultraviolet lamp {GLO}| market for | Cut-off, S	Oui	[3] et [4]
		36,8	kg	Steel and iron (waste treatment) {GLO}| recycling of steel and iron | Cut-off, S	Oui	[3] et [4]
		0,8	Wh/m³	Electricity, medium voltage {FR}| market for | Cut-off, S	Non	[3] et [4]
Filtre à Sable	5 ans	235,5	kg	Steel, unalloyed {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[3] et [4]
		175	kg	Sand {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[3] et [4]
		235,5	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, S	Non	[3] et [4]
		235,5	kg	Steel and iron (waste treatment) {GLO}| recycling of steel and iron | Cut-off, S	Oui	[3] et [4]
		175	kg	Inert waste {Europe without Switzerland}| market for inert waste | Cut-off, S	Oui	[3] et [4]
Ultra filtration	Pour 1 m³ (durée de vie déjà prise en compte)	0,000165	kg	Aluminium, cast alloy {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[6]
		0,00169	kg	Cast iron {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[6]
		0,000111	kg	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {RER}| production | Cut-off, S	Non	[6]
		0,00642	kg	Polyethylene, high density, granulate {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[6]
		1,11E-05	kg	Polymethyl methacrylate, sheet {RER}| production | Cut-off, S	Non	[6]
		3,69E-06	kg	Polycarbonate {RER}| production | Cut-off, S	Non	[6]
		0,00028	kg	Polyethylene, low density, granulate {RER}| production | Cut-off, S	Non	[6]
		0,000459	kg	Polypropylene, granulate {RER}| production | Cut-off, S	Non	[6]
		0,00247	kg	Polyvinylidenchloride, granulate {RER}| production | Cut-off, S	Non	[6]
		4,80E-05	kg	Tetrafluoroethylene {RER}| production | Cut-off, S	Non	[6]
		0,000275	kg	Steel, low-alloyed {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[6]
		2,4	g	Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RER}| market for | Cut-off, S	Non	[6]
		6,87	g	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER}| chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell | Cut-off, S	Non	[6]
		6,66	g	Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {RER}| sodium hypochlorite production, product in 15% solution state | Cut-off, S	Non	[6]
		0,81	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {GLO}| market for | Cut-off, S	Oui	[6]
		0,000136	kg	Silica sand {DE}| production | Cut-off, S	Non	[6]
		2,94	kWh/m³	Electricity, medium voltage {FR}| market for | Cut-off, S	Non	[6]
Fumier de bergerie		2,3	ton			[5]
Produit phytosanitaire		433	L/ha			[3]
Emissions lagunage vers		72500	m³			[2]
Emissions dues à l'irrigation avec EUT		1	ha			[5]

FIGURE A7 – Inventaire des scénarios utilisant de l'EUT

Annexe 5 : Inventaire du scénario EP

1) Arbre des procédés :

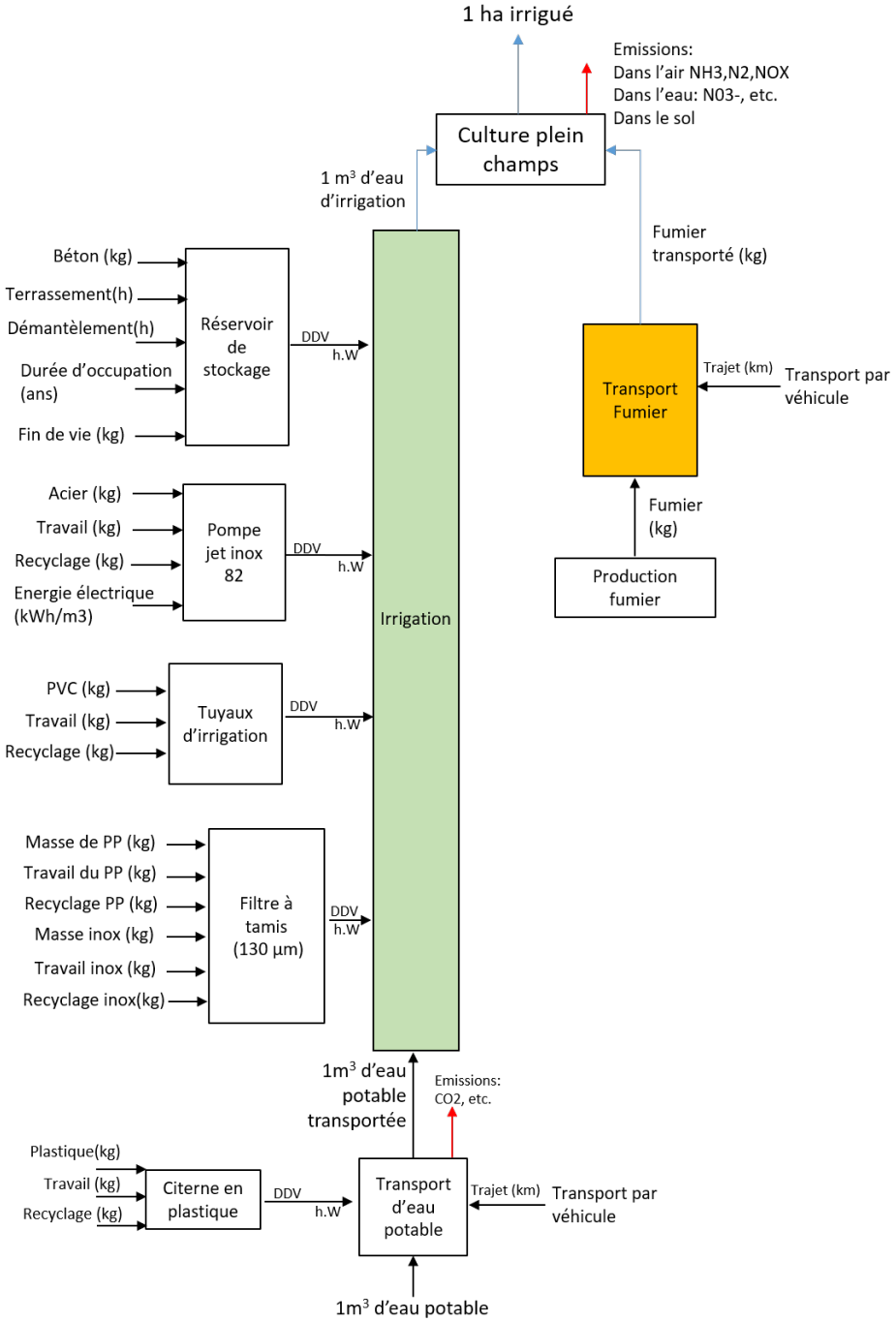


FIGURE A8 – Arbre des procédés du scénario EP

2) Inventaire des matériaux et procédés :

SCENARIO EP (APPORT PAR CAMION)							
Equipements	Durée de vie	Quantité	Unité	Source Ecoinvent	Fin de vie incluse	Sources	Commentaires
Transport	-	5	km/m³	Transport, passenger car, EURO 4 {RER}| market for | Cut-off, S	Oui	[3] + [1]	
Pompe Jetinox 82	5 ans	8	kg	Steel, unalloyed {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[3]	
		8	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, S	Non	[3]	
		8	kg	Steel and iron (waste treatment) {GLO}| recycling of steel and iron | Cut-off, S	Oui	[3]	
		0,015	kWh/m³	Electricity, medium voltage {FR}| market for | Cut-off, S	Non	[3]	
Filtre à tamis 130 µm	3000 h	0,2	kg	Metal working, average for chromium steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, S	Non	[3]	
		0,2	kg	Steel, chromium steel 18/8 {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[3]	
		1	kg	Polypropylene, granulate {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[3]	
		1	kg	Blow moulding {RER}| production | Cut-off, S	Non	[3]	
		0,2	kg	Steel and iron (waste treatment) {GLO}| recycling of steel and iron | Cut-off, S	Oui	[3]	
		1	kg	PP (waste treatment) {GLO}| recycling of PP | Cut-off, S	Oui	[3]	
Citerne béton parcelle	25 ans	37,5	m2a	Occupation, industrial area	-	[1]	
		20	m³	Excavation, skid-steer loader {RER}| processing | Cut-off, S	Oui	[1] + [3]	Terrassement + démantelement
		3	m³	Concrete, sole plate and foundation {RoW}| market for | Cut-off, S	Non	[1] + [3]	
		24	kg	Waste reinforced concrete {Europe without Switzerland}| treatment of waste reinforced concrete, collection for final disposal | Cut-off, S	Oui	[1] + [3]	
Eau potable	-	1	m³	Tap water {Europe without Switzerland}| tap water production, conventional treatment | Cut-off, S	Oui	[3]	
Citerne de transport plastique	25 ans	42	kg	Polyethylene, high density, granulate {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[3]	
		42,1	kg	Blow moulding {RER}| production | Cut-off, S	Non	[3]	1 kg of this process equals 0.997 kg of blow moulded plastics
		718	kg	Reinforcing steel {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[3]	
		718	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, S	Non	[3]	
		42	kg	PE (waste treatment) {GLO}| recycling of PE | Cut-off, S	Oui	[3]	
		718	kg	Steel and iron (waste treatment) {GLO}| recycling of steel and iron | Cut-off, S	Oui	[3]	
Fertilisants	-	4,6	ton		-	[2]	
Emissions irrigation avec EP	Pour 1 ha	0,9	kg	Ammonia, FR	-	[5]	vers air
		2,7	kg	Nitrogen, atmospheric	-	[5]	vers air
		0,3	kg	Dinitrogen monoxide	-	[5]	vers air
		0,36	kg	Nitrogen dioxide, FR	-	[5]	vers air
		23	kg	Nitrate	-	[5]	vers eau
		1,006	kg	Phosphate	-	[5]	vers eau
Emissions lagunage vers		73000	m³	-	-	[2]	-
Produit phytosanitaire		433	L/ha	-	-	[3]	-

FIGURE A9 – Inventaire du scénario utilisant de l'EP apportée par camion

Annexe 6 : Inventaire du scénario EB (pompage rivière)

SCENARIO EB (Pompage rivière)						
Equipements	Durée de vie	Quantité	Unité	Source Ecoinvent	Fin de vie incluse	Sources
Système de transport de l'eau	25 ans	1300	kg	Agricultural machinery, unspecified {GLO}| market for | Cut-off, S	Oui	[4]
		45	kg	Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[4]
		2,51E+03	kg	Extrusion, plastic film {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[4]
		100	m^3	Excavation, hydraulic digger {GLO}| market for | Cut-off, S	Oui	[4]
		3,78	kg	Tractor, 4-wheel, agricultural {GLO}| market for | Cut-off, S	Oui	[4]
		2,46E+03	kg	Polyethylene, high density, granulate {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[4]
		45	kg	Waste polyvinylchloride product {Europe without Switzerland}| market for waste polyvinylchloride product | Cut-off, S	Oui	[4]
		2,46E+03	kg	Waste polyethylene {Europe without Switzerland}| market for waste polyethylene | Cut-off, S	Oui	[4]
Pompe rivière	2 ans	40	kg	Cast iron {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[7]
		40	kg	Metal working, average for metal product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, S	Non	[7]
		12	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, S	Non	[7]
		12	kg	Steel, unalloyed {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[7]
		4	kg	Copper {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[7]
		52	kg	Steel and iron (waste treatment) {GLO}| recycling of steel and iron | Cut-off, S	Oui	[7]
		8	kWh/m^3	Electricity, medium voltage {FR}| market for | Cut-off, S	Non	[7]
Eau de rivière		1	m^3	Water, river, FR	-	[4]
Fumier de bergerie		4,6	ton	-	-	[2]
Produit phytosanitaire		433	L/ha	-	-	[3]
Emisions irrigation avec EP		1	ha	-	-	[5]
Emissions lagunage vers		73000	m^3	-	-	[2]

FIGURE A10 – Inventaire du scénario utilisant de l'EB pompée dans une rivière

Annexe 7 : Inventaire du scénario EB (forage)

SCENARIO EB (forage)						
Equipements	Durée de vie	Quantité	Unité	Source Ecoinvent	Fin de vie incluse	Sources
Système de transport de l'eau	25 ans	1300	kg	Agricultural machinery, unspecified {GLO}| market for | Cut-off, S	Oui	[4]
		45	kg	Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[4]
		2,51E+03	kg	Extrusion, plastic film {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[4]
		100	m³	Excavation, hydraulic digger {GLO}| market for | Cut-off, S	Oui	[4]
		3,78	kg	Tractor, 4-wheel, agricultural {GLO}| market for | Cut-off, S	Oui	[4]
		2,46E+03	kg	Polyethylene, high density, granulate {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[4]
		45	kg	Waste polyvinylchloride product {Europe without Switzerland}| market for waste polyvinylchloride product | Cut-off, S	Oui	[4]
		2,46E+03	kg	Waste polyethylene {Europe without Switzerland}| market for waste polyethylene | Cut-off, S	Oui	[4]
Pompe forage	4,4 ans	100	kg	Steel, unalloyed {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[7]
		100	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RoW}| processing | Cut-off, S	Non	[7]
		13	kg	Copper {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[7]
		12	kg	Synthetic rubber {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[7]
		100	kg	Steel and iron (waste treatment) {GLO}| recycling of steel and iron | Cut-off, S	Oui	[7]
Infrastructure forage	30 ans	1096	kg	Reinforcing steel {GLO}| market for | Cut-off, S	Non	[7]
		1750	kg	Gravel, round {CH}| market for gravel, round | Cut-off, S	Non	[7]
		562	tkm	Transport, freight, lorry, unspecified {GLO}| market for | Cut-off, S	Oui	[7]
		220	kWh	Electricity, medium voltage {FR}| market for | Cut-off, S	Non	[7]
Emisions irrigation avec ep		1	ha	-	-	[5]
Fumier de bergerie		4,6	ton	-	-	[2]
Emissions lagunage vers		73000	m³	-	-	[2]
Produit phytosanitaire		433	L/ha	-	-	[3]

FIGURE A11 – Inventaire du scénario utilisant de l'EB provenant d'un forage

Annexe 8 : Les bilans Azote et Phosphore liés à un sol cultivé

1) Sources bibliographiques : Les sources bibliographiques sont : [Nemecek 2015] [Brentrup 2000] [Koch 2015] et le fichier Comifer [2]. Elles sont résumés par les tableaux suivants :

	Sources	Types d'émissions
N-NH3	World food database Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products page 33 (Nemeck et al,2015b)	Air
N-N2	Brentrup et al (2000)	Air
N-N2O	World food LCA (Page 37)	Air
N-Nox	World food database Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products page 36 (Nemeck et al,2015b)	Air
N-NO3-	World food database Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products page 43 (Nemeck et al,2015b)	Nappes
N-N	COMIFER teneur en azote des organes végétaux récoltes, page 3	Absorbé par la plante

FIGURE A12 – Sources bibliographiques pour la réalisation du bilan Azote sur la plante

	Emissions érosion	Emissions lixiviation	Emissions ruissellement	Emissions dues à l'irrigation avec des eaux usées traitées
Phosphate	Rapport méthodologique Agribalyse 2015 V1.2			

FIGURE A13 – Sources bibliographiques pour la réalisation du bilan Phosphore sur la plante

2) Résultats obtenus :

	INPUTS (kg/ha)			OUTPUTS (kg/ha)					
					Emissions et rejets directs			Culture	TOTAL
					Emissions air	Emissions sol	Emissions vers nappes		
N-Azote	Fumier	N	30,82	N-NH3	0,9296				
				N-N2	2,7050				
	Eaux Potable	N-NH4+	0,1400	N-N2O	0,3099				
				N-Nox	0,3607				
		N-NO3-	0,0250	N-NO3-			23,787		
	Résidu sol	N-N	26,602	N-N		0,0		32,20	
	Ntot, entrée (sans résidu)		30,985	N Total, Sortie					57,587
		N Total, Entrée	57,587						

FIGURE A14 – Bilan Azote pour l'irrigation de vignes avec de l'eau potable

	INPUTS (kg/ha)			OUTPUTS (kg/ha)					
					Emissions et rejets directs			Culture	TOTAL
					Emissions air	Emissions sol	Emissions vers nappes		
N-Azote	Fumier	N	14,88	N-NH3	0,9000				
				N-N2	2,6190				
	Eaux usées traitées	N-NH4+	14,975	N-N2O	0,3000				
				N-Nox	0,3492				
		N-NO3-	0,143	N-NO3-			21,305		
	Résidu dans le sol	N-N	25,075	N-N		0,00		32,20	
	Ntot, entrée (sans résidu)		30,000	N Total, Sortie					55,055
		N Total, Entrée	55,075						

FIGURE A15 – Bilan Azote pour l'irrigation de vignes avec de l'eau usée traitée

	INPUTS (kg/ha)			OUTPUTS (kg/ha)						
				Emissions et rejets directs						TOTAL
				Phosphate immobilisé	Emissions érosion	Emissions lixiviation	Emissions ruissellement	Emissions fertirrigation	Uptake plante	
P-Phosphore	Eau potable	P	0,315	0,000	0,72014	0,07	0,191	0,016	8	
	Fumier	P	8,0							
	Résidu Sol	P	0,648							
		P Total, Entrée	8,997	P Total, Sortie						8,997

FIGURE A16 – Bilan Phosphore pour l'irrigation de vignes avec de l'eau potable

	INPUTS (kg/ha)			OUTPUTS (kg/ha)						
				Emissions et rejets directs						TOTAL
				Phosphate immobilisé	Emissions érosion	Emissions lixiviation	Emissions ruissellement	Emissions fertirrigation	Uptake plante	
P-Phosphore	Eau usée traitée	P	2,895	0,000	0,72014	0,07	0,183	0,145	8	
	Fumier	P	4,0							
	Résidu Sol	P	2,207							
		P Total, Entrée	9,118	*P Total, Sortie*						9,118

FIGURE A17 – Bilan Phosphore pour l'irrigation de vignes avec de l'eau usée traitée

Annexe 9 : Arborescence du scénario EUT (FAS + UV)

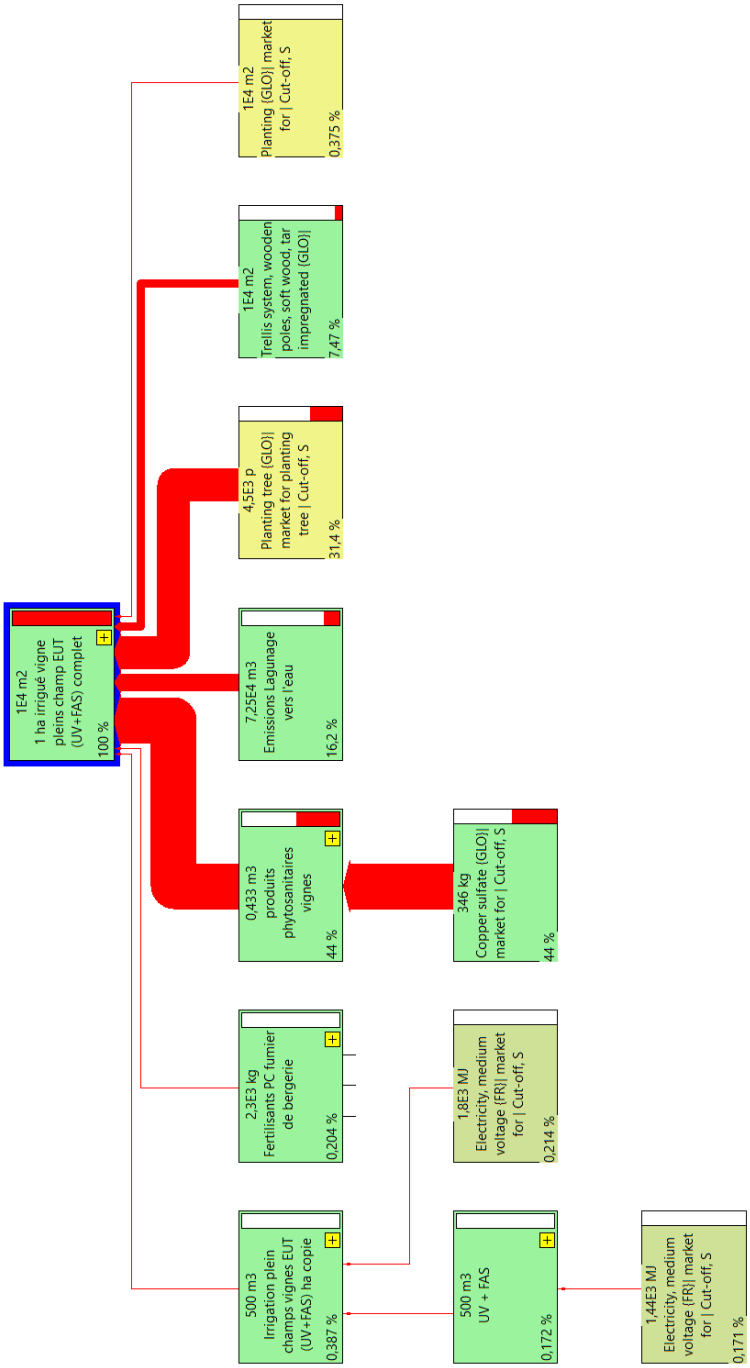


FIGURE A18 – Exemple d'arborescence : scénario EUT (FAS + UV)

Bibliographie

[1] *Hypothèses pour la modélisation dès filières extensives de traitement des eaux usées.* https://acv4e.irstea.fr/wp-content/uploads/2018/04/Hypoth%C3%A8ses-mod%C3%A9lisation-fili%C3%A8res-extensives.pdf.

[2] *teneurs en azote des organes végétaux récoltés, pour les cultures de plein champ, les principaux fourrages et la vigne, tableau de référence 2013.* https://comifer.asso.fr/images/publications/brochures/Table%20des%20exportations%20azote.pdf.

[3] *Bilans de matière des stations d'épuration modélisées pour ACV4E : hypothèses et calculs.* https://acv4e.irstea.fr/wp-content/uploads/2018/06/Bilans-mati%C3%A8re-des-STEP_avril2018.pdf.

[Boutin 2011] Heduit Mur Risch-Roux Boutin Gillot. *Modèle ACV – Filière de traitement des eaux usées par Boues Activées (BA) Rapports d'ACV et données d'inventaire.* Onema, Domaine Ecotechnologies et pollution Action n 28-1, 2011.

[Brentrup 2000] Lammel et al Brentrup Küsters. *Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector.* 2000.

[Carré 2017] Jauzein Junqua Lopez-Ferber Carré Beigbeder. *Life Cycle Assessment Case Study : Tertiary Treatment Process : Options for Wastewater Reuse.* Integrated Environmental Assessment and Managementt - Volume 13, Number 6-pp. 1113-1121, 2017.

[Koch 2015] Salou Koch. *Agribalyse Rapport Méthodologique.* Version 1.2. Ed ADEME, Angers, France. 393 p, 2015.

[Meneses 2010] Castells Meneses Pasqualino. *Environmental assessment of urbanwastewater reuse : treatment alternatives and applications.* Chemosphere 81, 266–272, 2010.

[Moretti 2019] Camposeo Pedrero-Dogot Lebailly Vivaldi Moretti Van Passel. *Modelling environmental impacts of treated municipal wastewater reuse for tree crops irrigation in the Mediterranean coastal region.* Elsevier, 2019.

[Muñoz 2009] Fernández-Alba Muñoz Del Mar Gómez. *Life cycle assessment of biomass production in a Mediterranean greenhouse using different water sources : groundwater, treated wastewater and desalinated seawater.* Agric. Syst. 103, 1–9, 2009.

[Muñoz 2010] Rosal Fernández-Alba Muñoz Rodríguez. *Life Cycle Assessment of urban wastewater reuse with ozonation as tertiary treatment : A focus on toxicity-related impacts.* Science of The Total Environment, Volume 407, Issue 4, 2009, Pages 1245-1256,Agricultural Systems, Volume 103, Issue 1, 2010, Pages 1-9, 2010.

[Nemecek 2007] Kägi Nemecek. *Life Cycle Inventories of Swiss and European Agricultural Production Systems. Final report ecoinvent V2.0 No. 15a.* Agroscope Reckenholz-Taenikon Research Station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zurich and Dübendorf, CH, 2007.

[Nemecek 2015] Lansche Rossi-Humbert-Mouron Riedener Nemecek Bengoa. *World Food LCA Database Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products.* 2015.

[Pradeleix 2014] Bouarfa Jaouani-Lili-Bellon Pradeleix Roux. *Environmental impacts of contrasted groundwater pumping systems assessed by life cycle assessment methodology : contribution to the water-energy nexus study.* Wiley Online Library, Irrig. and Drain. 64 : 124–138, 2014.

[Risch 2011] Roux Heduit Risch Boutin. *Modèle ACV – Filière de traitement des eaux usées par filtres plantés de roseaux à flux verticaux (FPRv).* Onema, Domaine Ecotechnologies et pollution Action n 28-1, 2011.

[Rodriguez 2011] Herna Moreira-Feijoo-Hospido Rodriguez Molinos. *Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants.* Water Res. 45, 5997–6010, 2011.

[Rousseaux 2005] Rousseaux. *Analyse du Cycle de Vie (ACV).* Technique de l'ingénieur, oct 2005.

Résumé

La réutilisation des eaux usées (REUT) offre des solutions pour lutter contre la diminution de la disponibilité en eau pour l'agriculture. La présente étude quantifie les impacts environnementaux, dans un contexte méditerranéen, de l'irrigation d'un hectare de vignes avec des eaux usées traitées (EUT), de l'eau potable (EP) et des eaux brutes (EB) de surface ou de forage. Cette étude se base sur les données expérimentales du projet AERMC de Murviel-Lès-Montpellier. Les impacts ont été évalués avec la méthode ILCD. L'irrigation d'un hectare de vignes avec des EUT donne de meilleurs résultats que l'irrigation avec de l'EP apportée par camion pour les catégories d'impact de l'écotoxicité (humaine et eau douce), l'acidification et le changement climatique. La REUT a des conséquences sur les radiations ionisantes, cela est dû à l'ajout d'un traitement tertiaire afin de respecter la réglementation de plus en plus sévère. Deux technologies de traitement tertiaire, filtre à sable + désinfection UV (FAS+UV) et ultrafiltration (UF), ont été comparés et le FAS+UV s'est avéré le moins impactant pour l'environnement sur toutes les catégories d'impacts. Afin de rendre le scénario EP plus réaliste, deux scénarios d'EB provenant d'un forage ou d'une rivière ont été modélisés. Le scénario EB forage est le plus impactant. Cela est dû à la puissance de la pompe et à l'infrastructure du forage. Le scénario EB rivière est comparé au scénario EUT (FAS+UV) et celui-ci s'est avéré moins impactant et plus adapté à l'échelle de la commune. Cette étude fournit des résultats qui permettent de mieux comprendre les conséquences environnementales potentielles de la REUT en agriculture. L'utilisation de l'EUT permet de diminuer l'apport de fertilisants et de diminuer la pollution rejetée par la station dans la rivière.

Mots clés : REUT, ACV, Traitement tertiaire, Impacts environnementaux, Vignes

---

Abstract

Wastewater reuse offers solutions to prevent the decrease in water availability for agriculture. This study quantifies the environmental impacts, in a Mediterranean context, of the irrigation of one hectare of vines with treated wastewater (TW), well water (WW) and raw water (RW) from surface or borehole. This study is based on experimental data from the Murviel-Lès-Montpellier AERMC project. The impacts were assessed using the ILCD method. Irrigation of one hectare of vines with TW gives better results than irrigation with WW for the ecotoxicity impact categories (human and fresh water), acidification and climate change. The impacts of the REUSE are on ionizing radiation, this is due to the addition of tertiary treatment to treat water in order to comply with increasingly stringent regulations. Two tertiary treatment technologies, Sand Filter + UV Disinfection (SF+UV) and Ultrafiltration (UF), were compared and SF+UV was found to have the lowest environmental impact on all impact categories. In order to make the WW scenario more realistic, two RW scenarios from a borehole or river have been modelled. The RW borehole scenario is the most impacting. This is due to the power of the pump and the borehole infrastructure. It is therefore the RW river scenario that is compared to the TW scenario (SF+UV) and this one has proved to be less impacting and more adapted to the scale of the municipality of Murviel-Lès-Montpellier. This study provides results that allows a better understanding of the potential environmental consequences of REUSE in agriculture. The use of TW reduces the supply of fertilizers and reduces pollution released by the wastewater treatment plant into the river.

Keywords : REUSE, LCA, Tertiary treatment, Environmental impacts, Vines