

# Projet SYLVO

VALORISATION DE DECHETS ET SOUS-PRODUITS DES FILIERES  
BOIS POUR L'EPURATION ET LE TRAITEMENT DES EAUX

## Rapport final

Projet Interreg France-Suisse (N° synergie 4085)

Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg (HEIA)

- Fabienne Favre Boivin
- Bahareh Zareeipolgardani

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (HEIG-VD)

- Julien Boucher
- Feiyi Li
- Yves Borgeaud



ETAT DE FRIBOURG  
STAAT FREIBURG



## Table des matières

1.	INTRODUCTION .....	3
2.	OBJECTIFS DU PROJET .....	3
3.	ORGANISATION DU PROJET.....	4
4.	RESULTATS .....	9
4.1	<b>WP1 Production et caractérisation de biochars.....</b>	<b>9</b>
4.1.1	T1.1 - Sélection d'essences de bois locales .....	9
4.1.2	T1.2 - Tests des conditions de pyrolyse.....	10
4.1.3	T1.3 - Caractérisation et réactivité des meilleurs couples biomasses / conditions de pyrolyse	12
4.2	<b>WP2 Application industrielle du biochar au traitement des eaux .....</b>	<b>14</b>
4.2.1	T2.1 - Etudes des conditions de traitements des eaux.....	15
4.2.2	T2.2 - Analyse des capacités dépolluantes des biochars.....	16
4.2.3	Conclusions du WP2:.....	25
4.3	<b>WP3 : Aspects économiques et écologiques de la filière locale de production .....</b>	<b>26</b>
4.3.1	Objectif détaillé : .....	26
4.3.2	T3.1 - Déterminants écologiques et économiques d'une filière locale de biochars .....	26
4.3.3	T3.2 - Analyse écologique des scénarios de mise en œuvre d'une filière locale de biochars	26
4.3.4	T3.3 - Analyse économique et optimisation des scénarios à forte performance environnementale.....	36
4.3.5	Conclusions du WP3 .....	39
4.4	<b>WP4 – Dissémination et valorisation .....</b>	<b>39</b>
4.5	<b>WP 0 Gestion de projet .....</b>	<b>39</b>
5.	CONCLUSIONS – PERSPECTIVES .....	40
6.	BIBLIOGRAPHIE.....	41

## 1. Introduction

Les eaux de consommation sont aujourd'hui de plus en plus polluées par des micropolluants organiques (OMPs) tels que les résidus médicamenteux (hormones, antibiotiques, etc.), les produits de soins corporels, les pesticides, et les produits de nettoyage et d'entretien. Ces résidus qui se retrouvent dans les eaux usées ne sont à ce jour pas ou peu traités dans les circuits usuels d'épuration des eaux. Dès lors, ils poursuivent leur chemin dans les eaux de surface (rivières accueillant les eaux en sortie de station d'épuration) jusqu'à réalimenter les nappes phréatiques où est pompée l'eau de consommation distribuée au consommateur final. En plus de la contamination de l'eau potable, les OMPs ont également des effets néfastes sur les organismes aquatiques, sur lesquels ils provoquent des mutations, des dérèglements reproductifs et le développement de résistance aux antibiotiques. La législation suisse sur la protection des eaux a évolué pour prendre en compte cette problématique. L'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux, 1998) a été modifiée en 2015 et impose désormais le traitement des micropolluants dans les stations d'épuration (STEP) en ciblant une liste de 12 OMPs fréquemment trouvées dans les eaux usées. L'objectif légal est celui d'atteindre 80% d'élimination des molécules listées et, pour y parvenir, il est prévu d'ajouter une étape de traitement supplémentaire à la STEP traditionnelle. Le traitement par charbon actif est une des méthodes testées, appréciée pour sa faible dangerosité opérationnelle et sa faible consommation énergétique comparée à son alternative, le traitement par ozonation. Par contre, la production de charbon actif nécessite l'extraction de matières premières fossiles (charbon, lignite) et leur transport depuis des mines très éloignées de la Suisse ou de la France, entraînant l'émission de quantités considérables de gaz à effet de serre. La solution de traitement des eaux abordée par le projet SylvO porte sur la transformation de déchets et sous-produits de l'industrie du bois locale en un matériel similaire au charbon actif appelé biochar. Un processus de pyrolyse est à l'origine de cette transformation. Le biochar activé, matériau poreux et riche en carbone, dispose de propriétés de fixation des micropolluants et peut donc potentiellement être utilisé comme filtre actif pour éliminer les OMPs, dans les stations d'épuration mais aussi de pompage des eaux de réinfiltration des nappes phréatiques. Le biochar étant issu d'une biomasse durable et pouvant être produit localement, présente à priori une empreinte carbone inférieure par rapport au charbon actif et permet de développer des filières économiques locales pour des produits jusqu'ici peu ou pas valorisés.

## 2. Objectifs du projet

Le projet SylvO porte sur la valorisation de déchets et sous-produits des filières bois pour l'épuration et le traitement des eaux. Il poursuit donc un double objectif :

Objectif 1 : Développer une solution innovante et pertinente de filtration des eaux.

Objectif 2 : Développer l'industrie forestière locale.

La solution innovante pour la filtration des eaux proposée par ce projet est de produire du biochar activé à partir de déchets de bois non valorisés par un autre secteur. Les biochars peuvent différer selon les sources de déchets de bois et les procédés de production choisis. Le but de ce projet est d'étudier l'efficacité de ces différents biochars à traiter les OMPs dans les stations d'épuration et les eaux de réinfiltration de nappe. Il s'agit d'un travail scientifique et technique mais aussi de réflexion économique et écologique sur la possibilité de mettre en œuvre une filière locale de biochar.

Le projet Sylvo est né d'une collaboration franco-suisse (Projet européen Interreg) avec des partenaires situés en Haute-Savoie, dans les cantons de Fribourg et de Vaud. Le projet a notamment étudié la rivière Arve prenant source en Haute-Savoie et venant alimenter la nappe phréatique du genevois, qui fournit une partie de l'eau de consommation du canton de Genève. Pour des raisons administratives, les partenaires français ont abandonné le projet qui a poursuivi uniquement du côté suisse. Le présent document synthétise par conséquent, uniquement les résultats du projet obtenus par les partenaires suisses.

### 3. Organisation du projet

Les partenaires du projet sont suisses et français, le chef de fil français étant la SEMAG.

La SEMAG a quitté le projet en cours de réalisation. Pour cette raison, seuls quelques résultats de la partie française sont présentés dans ce rapport et des parties de WP à la responsabilité de la partie française sont manquants.

Le projet est organisé autour de 4 principaux workpackages (WP) dont les objectifs sont résumés dans le Tableau 1a. Dans le Tableau 1b sont recensés les livrables du projet et leur emplacement dans le présent rapport.

Tableau 1a. Liste des workpackages, résumé de leurs objectifs, liste des tâches au sein de chaque workpackage et partenaire responsable. HEIA : Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg (CH) ; HEIG-VD : Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton De Vaud (CH) ; SEMAG : Société d'économie Mixte d'Archamps et du Genevois (FR). En gris et italique, les parties sous responsabilités françaises abandonnées ou partiellement achevées.

	Intitulé	Objectifs	Tâches au sein du WP	Partenaires impliqués
<b>WP1</b>	Production et caractérisation de biochars	Définir les sous-produits du bois et les conditions de transformation par pyrolyse permettant de produire un ou des biochars a forte capacité dépolluante.	T1.1 - Sélection d'essences de bois locales	HEIA
			T1.2 - Tests des conditions de pyrolyse	HEIA
			T1.3 - Caractérisation et réactivité des meilleurs couples matière première / conditions de pyrolyse	HEIA
			<i>T1.4 - Etudes des conditions de production industrielle et des prospectives de conditionnement</i>	<i>SEMAG</i>
<b>WP2</b>	Application industrielle de biochars au traitement de l'eau	Evaluer la capacité à dépolluer les eaux des biochars identifiés au WP1 au sein d'installations réelles de traitement des eaux.	T2.1 - Etudes des conditions de traitements des eaux	HEIA/SEMAG
			T2.2 - Analyse des capacités dépolluantes des biochars	HEIA/SEMAG
			<i>T2.3 - Etude sur les aspects techniques du passage en phase industrielle d'une filtration par biochars</i>	<i>SEMAG/HEIA</i>
<b>WP3</b>	Aspects économiques et écologiques d'une filière locale de biochars	Evaluer l'impact écologique et la viabilité économique de cette filière et définir les contraintes et les possibilités.	T3.1 - Déterminants écologiques et économiques d'une filière locale de biochars	HEIG-VD
			T3.2 - Analyse écologique des scénarios de mise en œuvre d'une filière locale de biochars	HEIG-VD
			T3.3 - Analyse économique et optimisation des scénarios à forte performance environnementale	HEIG-VD
<b>WP4</b>	Dissémination et valorisation	Dissémination du projet auprès des acteurs des filières bois et eau, du monde la recherche scientifique, mais aussi auprès du grand public, éminemment concerné par la problématique de la pollution de l'eau de consommation.	<i>T4.1 - Dissémination technique du projet et de ses résultats</i>	<i>SEMAG</i>
			T4.2 - Dissémination scientifique du projet et de ses résultats	HEIA
			<i>T4.3 - Dissémination grand public par support vidéo</i>	<i>SEMAG</i>
			<i>T4.4 - Evénements grand public autour de la thématique et des résultats du projet</i>	<i>SEMAG</i>
			<i>T4.5 - Ateliers de valorisation à destination des acteurs des filières eau et bois</i>	<i>SEMAG</i>



	<b>Intitulé</b>	<b>Objectifs</b>	<b>Tâches au sein du WP</b>	<b>Partenaires impliqués</b>
			<i>T4.6 - Etude prospective d'une école interuniversitaire sur la thématique de l'eau</i>	<i>SEMAG</i>

En gris clair, les parties de WP non présentées dans ce rapport car traitées par la France.

Tableau 1b : Liste des livrables, équipes impliquées, emplacement dans le présent rapport

	Intitulé	Livrables	Partenaires impliqués	Consultable
<b>WP1</b>	Production et caractérisation de biochars	L1.2 : inscription caractéristiques biochars dans la base de données Swissbiochar L1.3 : Méthode de caractérisation des biochars <i>L1.4 Protocole de production industrielle</i>	HEIA et SEMAG	La base de donnée n'existe plus  Annexe 1
<b>WP2</b>	Application industrielle de biochars au traitement de l'eau	L2.1 : capacité dépolluantes des biochars en conditions réelles	HEIA/SEMAGE	Annexe 1
		L2.3 : processus d'interaction moléculaires . NB : partiel	HEIA/SEMAG	Rédaction en cours (annexe 2, confidentiel)
		<i>L2.2 : modèle de prédiction de la durabilité</i>	<i>SEMAG</i>	
<b>WP3</b>	Aspects économiques et écologiques d'une filière locale de biochars	L3.1 : déterminants écologiques et économiques	HEIG-VD	Annexe 1
		L3.2 : performance environnementale de la filière biochar	HEIG-VD	Annexe 1
		L3.3 : analyse économique et optimisation des scénarios	HEIG-VD	Annexe 1
<b>WP4</b>	Dissémination et valorisation	<i>L4.1 : Site web du projet</i>	<i>SEMAG</i>	
		<i>L4.2 : Publications papiers et numériques de dissémination technique du projet</i>	SEMAG	
		<i>L4.3 - Capsule vidéo de dissémination grand public</i> <i>L4.4 - Evénements grand public (Amphis pour tous)</i>	SEMAG, HEIA	Annexe 3
		<i>L4.5 - Ateliers de valorisation destinés aux acteurs des filières bois et eaux + 1 x .2-L4.7 - Communauté d'acteurs de la filière biochar</i>	SEMAG	
		L4.6 Publications scientifiques	HEIA, SEMAG	Annexe 1



	<b>Intitulé</b>	<b>Livrables</b>	<b>Partenaires impliqués</b>	<b>Consultable</b>
		<i>Ateliers de valorisation destinés aux acteurs des filières bois et eaux + 1 x .2-L4.7 - Communauté d'acteurs de la filière biochar</i>	SEMAG/HEIA	Annexe 4
		<i>1 x .1-L4.8 - Prototype d'école interuniversitaire sur la thématique de l'eau</i>	SEMAG	

En gris clair, les parties de WP non présentées dans ce rapport car traitées par la France.



## 4. Résultats

Les résultats du projets et livrables dont la réalisation est à la responsabilité des partenaires suisses sont résumés dans ce chapitre.

### 4.1 WP1 Production et caractérisation de biochars

Le WP1 a pour objectif de définir les sous-produits du bois et les conditions de transformation par pyrolyse permettant de produire un ou des biochars a forte capacité dépolluante. Il est articulé autour de 4 activités.

#### 4.1.1 T1.1 - Sélection d'essences de bois locales

##### 4.1.1.1 Objectif détaillé :

Sélectionner la matière la plus à même de produire un biochar permettant de dépolluer efficacement les eaux.

##### 4.1.1.2 Méthode :

La sélection s'est faite selon ces 3 critères :

1. Caractéristiques des essences de bois locales conformément à la littérature scientifique et technique
2. Disponibilité de l'essence à l'échelle suisse
3. Contraintes techniques et financières liées à son exploitation

##### 4.1.1.3 Résultats :

Le bois d'épicéa a été retenu comme l'essence la plus prometteuse.

La ressource est grandement disponible dans la région de Fribourg, ce qui minimise les frais de transports. De plus, c'est la biomasse fournissant le plus de déchets de production difficilement valorisables autrement. Les sous-produits d'épicéa valorisables en tant que biochars sont les suivants (entre parenthèses les abréviations utilisées par la suite) :

1. Branches d'épicéa (SP, de *Spruce branches*)
2. Ecorce (BK, de *Bark*)
3. Délignures (rejets de coupe) provenant de la scierie sous forme de copaux (WDC, de *Wood chips*) ou sous forme de pellet (WP)

Plusieurs processus de préparation de la biomasse ont été testés. Celui retenu est décrit ci-dessous : à l'exception du pellet, les sous-produits sélectionnés ont été coupés en morceaux inférieures à 20 mm et ensuite tamisés afin d'obtenir une fraction ayant un diamètre entre 2 et 6 mm. Le résultat du tamisage, appelé *matière première biomasse préparée* dans la suite du rapport (Figure 1). Les résidus les plus grossiers (> 6 mm) ont été coupés et tamisés une deuxième fois afin de minimiser les pertes de matériel. Les résidus restants ayant échappé au tamisage ont été valorisés en tant que compost. Les pellets n'ont pas subi de transformation et ont été pyrolysés directement.



Figure 1. Résidus de branches d'épicéa brutes (A), coupées et tamisées (B), et transformées en biochar activé (C).

Les rendements de production de biochar depuis la biomasse sont bas, entre 6 et 19% (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

Tableau 2. Quantité de biomasse récoltée, biomasse et biomasse préparée, ainsi que les rendements relatifs, pour chaque type de biochar activé produit. Les paramètres différenciant les 7 types de biochars sont détaillés dans le Tableau 3.

Biochar ID	WDC	WP	SP1	SP2	SP3	BK1	BK2
Biomasse (gr)	2500	4000	13000	4000	3500	13000	2500
Biomasse (gr MS)	1775	3760	9490	2920	3325	10660	2375
Biomasse préparée et séchée (gr)	1400	3800	7600	2900	2400	8000	1200
Biochar produit (gr)	230	750	1140	350	360	990	154
Rendement Biomasse préparée/biomasse %	56	95	58	73	69	62	48
Rendement biochar/biomasse préparée %	16	20	15	12	15	12	13
Rendement biochar/biomasse %	9	19	9	9	10	8	6
Rendement biochar/biomasse sèche %	13	20	12	12	11	9	6

#### 4.1.2 T1.2 - Tests des conditions de pyrolyse

##### 4.1.2.1 Objectif détaillé :

Tester différentes conditions de pyrolyse (i.e. combustion en l'absence d'oxygène) sur la matière première sélectionnée, de manière à produire différentes sortes de biochar. La température de combustion, le degré d'humidité de la matière première et nombre d'autres paramètres techniques de la pyrolyse vont influencer le résultat obtenu.

#### 4.1.2.2 Méthode :

La pyrolyse et l'activation de la biomasse ont été réalisées en une seule étape par la machine PYREKA (Pyreg GmbH, Dörth, Allemagne) à Agroscope Reckenholz. Les biomasses préparées ont été toutes chauffées à 900 °C pendant 12 min. La vapeur d'eau déionisée a été choisie comme unique agent d'oxydation et d'activation. Les autres agents d'activation existants sur le marché ont été écartés à cause de leur effet potentiellement néfaste sur l'environnement. Le dosage de vapeur d'eau est établi en tenant compte du poids molaire du carbone de la biomasse préparée ainsi que de son taux d'humidité. Un rapport molaire de 1 entre la vapeur d'eau et le carbone a été appliqué à toutes les biomasses transformées, l'hypothèse étant que ce rapport molaire donnerait des résultats d'activation optimaux (Hagemann et al., 2020 ; Lehmann and Joseph, 2015). Des rapports molaires différents (0.5 et 2) ont été appliqués aux résidus de branches (SP) et aux écorces (BK) afin de tester leur effet sur le rendement final. Le même test n'a pas pu avoir lieu sur les autres biomasses préparées par manque de matériel. Les biochars SP3 et BK2 ont été produits environ une année après les biochars à cause des restrictions liées au COVID-19. Le matériel ayant séché entre temps, cela explique un taux d'humidité relativement plus faible dans la biomasse préparées que pour les autres batch de production. (Tableau 3).

#### 4.1.2.3 Résultats :

Les tests de pyrolyse effectués ont permis de produire 7 types de biochars activés (Tableau 3), dont 3 à partir des résidus de branches (SP1, SP2 et SP3), 2 à partir des écorces (BK1 et BK2), 1 à partir des délignures (WDC) et 1 à partir du pellet (WP).

Les biochars WP présentent le rendement maximal en biochar activé (20% de la biomasse préparée). Le rapport molaire H<sub>2</sub>O/C ne semble pas influencer le rendement (SP1 et SP3 ont le même rendement).

Tableau 3. Résultat des différents tests de pyrolyse sur les 4 biomasses sélectionnés. La taille des particules, la température de pyrolyse, le temps de résidence, ainsi que l'agent d'activation ont été maintenus constants. Varient le taux d'humidité de chaque échantillon, ainsi que le rapport molaire entre vapeur d'eau et carbone (H<sub>2</sub>O/C). Les rendements sont indiqués en pourcentage de biochar obtenu par rapport à la biomasse préparée (sous-produit du bois préparé pour la pyrolyse).

ID	Biomasse	Taille des particules (mm)	Température (°C)	Temps de résidence (min)	Agent d'activation	Humidité (%)	Rapport molaire H <sub>2</sub> O/C	Rendement (%)
SP1	Résidus de branches	2-6	900	12	Vapeur d'eau	27	1	15
WDC	Délignures	2-6	900	12	Vapeur d'eau	29	1	16.5
BK1	Ecorces	2-6	900	12	Vapeur d'eau	18	1	12.4
WP	Pellets	5-15	900	12	Vapeur d'eau	6	1	20
SP2	Résidus de branches	2-6	900	12	Vapeur d'eau	27	2	12
SP3	Résidus de branches	2-6	900	12	Vapeur d'eau	5	0.5	15
BK2	Ecorces	2-6	900	12	Vapeur d'eau	5	0.5	13

#### 4.1.3 T1.3 - Caractérisation et réactivité des meilleurs couples biomasses / conditions de pyrolyse

##### 4.1.3.1 Objectif détaillé :

Déterminer quelles sont les meilleures conditions de pyrolyse et de post-traitement de biochars pour les différentes essences de bois testées. Par « meilleures conditions », on entend celles qui permettent d'obtenir un biochar ayant un fort potentiel de fixation des micropolluants que l'on souhaite traiter et éliminer (tels les résidus médicamenteux) et le meilleur rendement de production. Les meilleurs couples matière première/conditions de pyrolyse seront retenus pour un travail expérimental de traitement de l'eau réalisé dans le cadre du WP2.

##### 4.1.3.2 Méthode :

La capacité d'échange cationique (CEC) a été choisie sur la base de la littérature scientifique (Favre et al., 2022) comme paramètre pour estimer le potentiel de fixation du biochar. La CEC étant fortement liée à la surface spécifique (SSA), elle est supposée augmenter en réduisant la taille des particules de biochar. Les biochars obtenus en phase T1.2 ont été moulus à 80 µm de diamètre afin qu'ils aient une taille comparable aux produits commerciaux, tels que le charbon actif. Les CEC d'autres tailles de particule plus grossières (300 µm, 750 µm, 1.5 mm, 5 mm) ont été testées pour vérifier cette hypothèse sur les résidus de branche (SP) et les écorces (BK) (Tableau 4).

Tableau 4. Capacité d'échange cationique (CEC) selon la taille des particules des différents biochars activés produits en phase T1.2. La fraction > 5 mm est issue de matières premières brutes (taille entre 2 et 6 mm, Tableau 3) tamisées à 5 mm et non moulues.

Echantillon	Taille des particules	CEC (cmol <sub>c</sub> /Kg)
SP2	< 80 µm	95
BK1	< 80 µm	95
BK1	> 5 mm	37
WDC	< 80 µm	105
WP	< 80 µm	57
SP1	< 80 µm	150
SP1	< 300 µm	62
SP1	< 750 µm	63
SP1	< 1.5 mm	63
SP1	> 5 mm	36
BK2	< 80 µm	98
BK2	> 5 mm	41
SP3	< 80 µm	124
SP3	> 5 mm	39

Comme attendu, la granulométrie du biochar est inversement corrélée à sa capacité d'échange cationique. La question de la taille de la particule est donc un paramètre d'optimisation du processus de production. En effet, les poudres sont plus difficiles à manipuler mais elles offrent le meilleur résultat.

Les biochars activés présentant le meilleur potentiel de fixation (i.e. les CEC les plus élevées), ont été choisis pour un test en laboratoire afin de déterminer leur pouvoir de rétention de polluants. Parmi les nombreux OMPs présents dans les rivières et les stations de traitement des eaux, quatre d'entre eux (Benzotriazole, Diclofenac, Carbamazépine, et Metoprolol) ont été choisis pour ce test car ils sont très souvent présents, ils sont difficiles à éliminer et ils couvrent l'éventail des caractéristiques physico-chimiques (ex. la charge ionique) des polluants plus communs. Les quatre molécules ont été combinées en proportions différentes dans quatre cocktails distincts (Tableau 5) reproduisant les situations les plus courantes dans les stations de traitement des eaux. Les concentrations de chaque molécule composant les cocktails ont été augmentées afin d'atteindre les limites de détection et de précision des appareils de mesure, tout en gardant les proportions visées.

Tableau 5. Concentrations des 4 OMPs choisis dans chaque cocktail testé.

Cocktail	Benzotriazole (µg)	Diclofenac (µg)	Carbamazepine (µg)	Metoprolol (µg)
Cocktail A	260	30	25	30
Cocktail B	520	60	50	60
Cocktail C	520	120	100	120
Cocktail D	1000	120	100	120

L'efficacité de rétention en polluants de chaque biochar a été mesurée par absorbance à une longueur d'onde de 269 nm (Wittmer et al. 2015) de l'échantillon pollué avant et après traitement avec le biochar. L'absorbance de l'échantillon pollué diminue proportionnellement à l'efficacité du traitement (Tableau 6). Le cocktail B s'est révélé le plus approprié pour ce genre de test car il présente un pic d'absorbance caractéristique et bien détecté. Cela permet de mieux apprécier la diminution d'absorbance suite au traitement avec biochar. Seuls les biochars ayant montré une CEC élevée (Tableau 4) ont été utilisés pour ce test, cela correspond à la fraction plus fine (< 80 µm) des biochars SP1, SP2, SP3, BK1, WDC. Le biochar SP (<1.5 mm) a également été testé.

#### 4.1.3.3 Résultats :

Tableau 6. Réduction de l'absorbance de l'échantillon pollué après traitement avec des biochars activés de type et taille de particules différents. Lorsque les tailles de particules ne sont pas spécifiées elles correspondent à la fraction la plus fine (< 80 µm).

Biochar activé ID	SP1				SP1 < 1.5 mm				SP2	SP3	BK1	BK2	WDC
	A	B	C	D	A	B	C	D	B	B	B	B	B
% de réduction de l'absorbance	100%	100%	100%	20%	100%	100%	100%	15%	100%	100%	100%	100%	100%

1. Les tailles de particules plus fines (< 80 µm) ont montré les meilleures capacités de fixation (CEC plus élevées). Les résidus de branches moulus à 80 µm (SP1 < 80 µm) ont montré la meilleure capacité de fixation parmi tous les biochars activés testés (Tableau 4).
2. Les biochars ayant une bonne capacité de fixation se sont montrés très efficaces dans la rétention des principaux cocktails de polluants. Seul le cocktail D n'a pas été suffisamment retenu par les biochars, mais il représente un cas non réaliste sur le terrain (concentrations très élevées).

Compte tenu de la CEC, de la complexité des procédures de production et des rendements mesurés, il a été choisi de retenir les biochars suivants pour l'application industrielle au traitement des eaux (WP 2) : **SP1, WDC et BK1, les trois dans la granulométrie la plus fine (< 80 µm).**

Le pellet (WP) a été écarté malgré son bon rendement, à cause de sa faible CEC et de la complexité de la méthode de production relativement aux autres biomasses préparées.



## 4.2 WP2 Application industrielle du biochar au traitement des eaux

Le WP2 a pour objectif d'évaluer les capacités dépolluantes des biochars issus du WP1 en situation contrôlée (laboratoire) et non contrôlée (station d'épuration des eaux usées, station de réinfiltration), et de déterminer les conditions d'industrialisation de filtres à biochar pour le traitement des eaux. Cette dernière partie est sous la responsabilité du partenaire français et n'est pas présentée dans ce rapport.

La station d'épuration choisie pour ce projet est la STEP d'Aire, qui traite les eaux usées de la ville de Genève, et qui se situe le long du Rhône à sa sortie de la ville (Figure 2).



Figure 2. Localisation de la station d'épuration d'Aire, le long du Rhône.

La station de réinfiltration analysée se trouve le long de l'Arve, affluent du Rhône et prenant sa source en France (Figure 3). Les eaux de l'Arve sont utilisées pour réalimenter la nappe phréatique suite à sa surexploitation.



Figure 3. Point d'échantillonnage de la rivière Arve en correspondance de la station de réinfiltration. La ligne mauve représente la frontière entre la Suisse et la France.

#### 4.2.1 T2.1 - Etudes des conditions de traitements des eaux

##### 4.2.1.1 Objectif détaillé :

L'objectif est d'étudier les conditions de traitements des eaux, qu'il s'agisse d'eaux usées (traitement en station d'épuration) ou d'eaux de surface (station de réinfiltration). Avec l'aide notamment des Services Industriels de Genève, l'objectif est de définir les critères et contraintes de mise en place et d'exploitation dans ces différentes installations de solutions de traitements des eaux innovantes utilisant des biochars. Il est notamment question d'évaluer les différences entre France et Suisse, où les contraintes réglementaires en matière de traitement des eaux et éventuellement les procédés peuvent différer. Ce rapport présente l'étude de la partie Suisse uniquement.

##### 4.2.1.2 Méthode :

Le traitement des eaux se fait traditionnellement par traitement avec du charbon actif. Les mises en œuvre sont diverses : sous forme de colonne, en batch en post traitement, en batch en même temps que le traitement biologique, pour citer quelques exemples. Plusieurs paramètres sont importants à prendre en compte dans le traitement, tels que la concentration du charbon actif, son temps de contact avec la solution aqueuse, sa granulométrie, ainsi que le point de traitement dans la chaîne. Ces paramètres ont été repris dans le cadre de ce projet et appliqués au traitement avec biochars activés. Le but du projet est en effet d'évaluer la performance des biochars en restant le plus proche possible des conditions de traitement actuellement en vigueur pour le charbon actif. Des expériences précédentes de traitement des eaux avec biochars ont été également utilisées pour définir les meilleures conditions de traitement.

##### 4.2.1.3 Résultats :

###### Station d'épuration des eaux :

- Temps de contact : 30 min, comme pour le charbon actif.
- Concentration en biochar : 10 mg/l. Cela se base sur des expériences précédentes avec le charbon actif dans les stations d'épuration du Locle (Ribi, 2014) et de Vidy (Margot et al., 2011) ainsi que dans la littérature scientifique (Boehler et al., 2012).
- Fraction granulométrique : < 80  $\mu\text{m}$ , sous forme de poudre tel qu'est utilisé parfois le charbon actif.
- Point de traitement dans la chaîne : le traitement avec biochar intervient souvent après le traitement biologique, tout comme ferait le charbon actif. Il est en effet important que le biochar intervienne en dernier dans la chaîne de traitement, afin de ne pas saturer ces surfaces réactives avec d'autres molécules ou particules appelées à disparaître dans la chaîne de traitement classique (Siegrist and Joss, 2012).

###### Station de réinfiltration (rivière Arve):

En ligne générale, il existe moins d'essais de traitement des eaux de rivière pour réinfiltration via du charbon actif par rapport aux traitements en stations d'épuration. On trouve cependant les références suivantes :

- Temps de contact : 17 min. Cette durée a été choisie en s'inspirant du traitement des eaux de surface avec filtres multicouches (Chappaz et Jaussi, 2000). Dans ce contexte, le volume d'eau à traiter est en contact de la masse filtrante pendant 7 à 27 minutes, suivant la perte de charge dans le filtre, celle-ci dépendant notamment de la turbidité de l'eau. Pour ce projet, il a été choisi de fixer le temps de contact à 17 minutes, correspondant à une moyenne entre 7 et 27 minutes. D'autres temps de contact n'ont pas pu être testés par manque de temps et de matériel.



- Concentration en biochar : 10 mg/l comme cela semble être le meilleur compromis en termes d'efficacité de traitement et de disponibilité de matériel. Des concentrations bien plus élevées (de l'ordre de plusieurs grammes/l) sont normalement utilisées dans les tests effectués sur colonnes de filtrations. La concentration choisie ici sera pertinente uniquement pour les tests en batch.
- Fraction granulométrique : < 80 µm, pour les mêmes raisons que dans la STEP.
- Point de traitement dans la chaîne : en sortie du filtre avant la réinfiltration.

#### 4.2.2 T2.2 - Analyse des capacités dépolluantes des biochars

##### 4.2.2.1 Objectif détaillé :

Evaluer les capacités dépolluantes des biochars sélectionnés dans le cadre des travaux du WP1. Il s'agit ici de tester en conditions contrôlées (en laboratoire) mais dans des conditions de traitement réalistes pour une application in situ, dans quelle mesure ces biochars permettent de traiter des eaux polluées.

##### 4.2.2.2 Méthode :

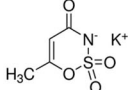
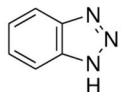
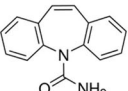
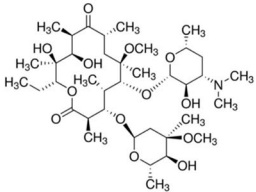
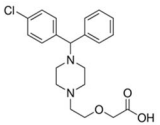
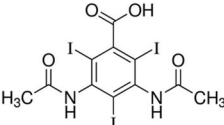
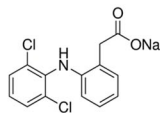
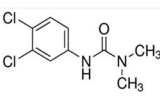
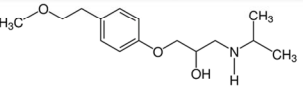
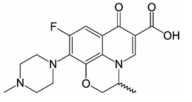
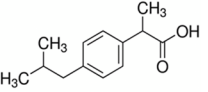
Cette évaluation repose sur des analyses d'eau (avant et après traitement par les biochars) et une analyse physico-chimique fine des biochars eux-mêmes (effectuée par le partenaire français). Les biochars activés qui ont été utilisés dans ces analyses sont : SP1, WDC et BK1. La taille de particules la plus fine (< 80 µm) a été retenue pour les trois. A chaque analyse, un produit de référence à base de charbon actif industriel ("DOLDER AC Pure") a été testé également en guise de comparaison.

Micropolluants ciblés:

Les micropolluants ciblés sont pour les eaux usées ceux recommandés par l'OEau (1998) et pour l'ARVE, une liste discutée en partenariat avec les partenaires français en début de projet. Elle recoupe en partie celle des eaux usées et contient des molécules supplémentaires fréquemment rencontrées en eaux de surface. Les caractéristiques de ces polluants sont indiquées dans le Tableau 7



Tableau 7. Liste des 11 OMPs cibles retenus pour l'étude de l'efficacité de traitement dans les eaux de l'Arve et les eaux usées dans le cadre de ce projet, leur structure moléculaire, le poids moléculaire, la charge à pH 7.4, la constante de dissociation octanol/eau et la constante d'acidité.

OMP	Structure moléculaire	Poids moléculaire (gr/mol)	Charge à pH 7.4	Log $K_{ow}$	pKa
Acesulfame		201.242	Neutre	-1.33	3.2
Benzotriazole		119	Neutre	1.44	8.37
Carbamazepine		263.3	Neutre	2.45	13.9
Clarithromycin (CLM)		747.9	Cationique	3.16	12
Cetirizine		388.89	Anionique	1.7	3.6
Diazotric acid		613.9	Anionique	1.37	1.13
Diclofenac (DFC)		296.1	Anionique	4.51	4.15
Diuron (DIN)		233.1	Neutre	2.68	13.18
Metoprolol (MTP)		267.36	Cationique	14	1.88
Ofloxacin		361.36	Anionique	-0.39	5.45
Ibuprofen		206.3	Anionique	3.97	4.91

### Traitement des eaux usées

Trois campagnes d'échantillonnage ont été effectuées à la Station d'épuration (STEP) d'Aire de Genève : la première en octobre 2021, la deuxième en janvier 2022 et la troisième en mars 2022. Cette STEP traite les eaux usées de 445 000 équivalents habitants, ce qui équivaut à un débit de 2000 litres par seconde par temps sec. Elle est composée d'un décanteur primaire, d'un traitement conventionnel par boues activées et d'une filtration sur sable à lit profond. Les traitements avec les biochars ont eu lieu sur les eaux usées décantées après le traitement biologique. Les analyses ont été effectuées dans les laboratoires de la STEP.

Les principaux paramètres décrivant la qualité de l'eau de la STEP ont été mesurés lors de chaque campagne (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Tableau 8 : Paramètres mesurés dans la STEP D'Aire lors des trois campagnes d'échantillonnage : matière en suspension (MES), pH, Azote total, Chlorures, Sulfates, Sodium, Magnésium, Calcium et Carbone organique dissout.

	MES mg/L	pH	N mg/L	P mg/L	Cl mg/L	SO <sub>4</sub> mg/L	Mg mg/L	Ca mg/L	DOC mg/L
Octobre 2021	11	8.5	25	1.78	78	62	8.7	60.9	7.5
Janvier 2022	8	8.4	22.65	1.01	81	60	9	97	7.3
Mars 2022	14	8.4	27	1.18	87	67	8.8	55.2	7.5

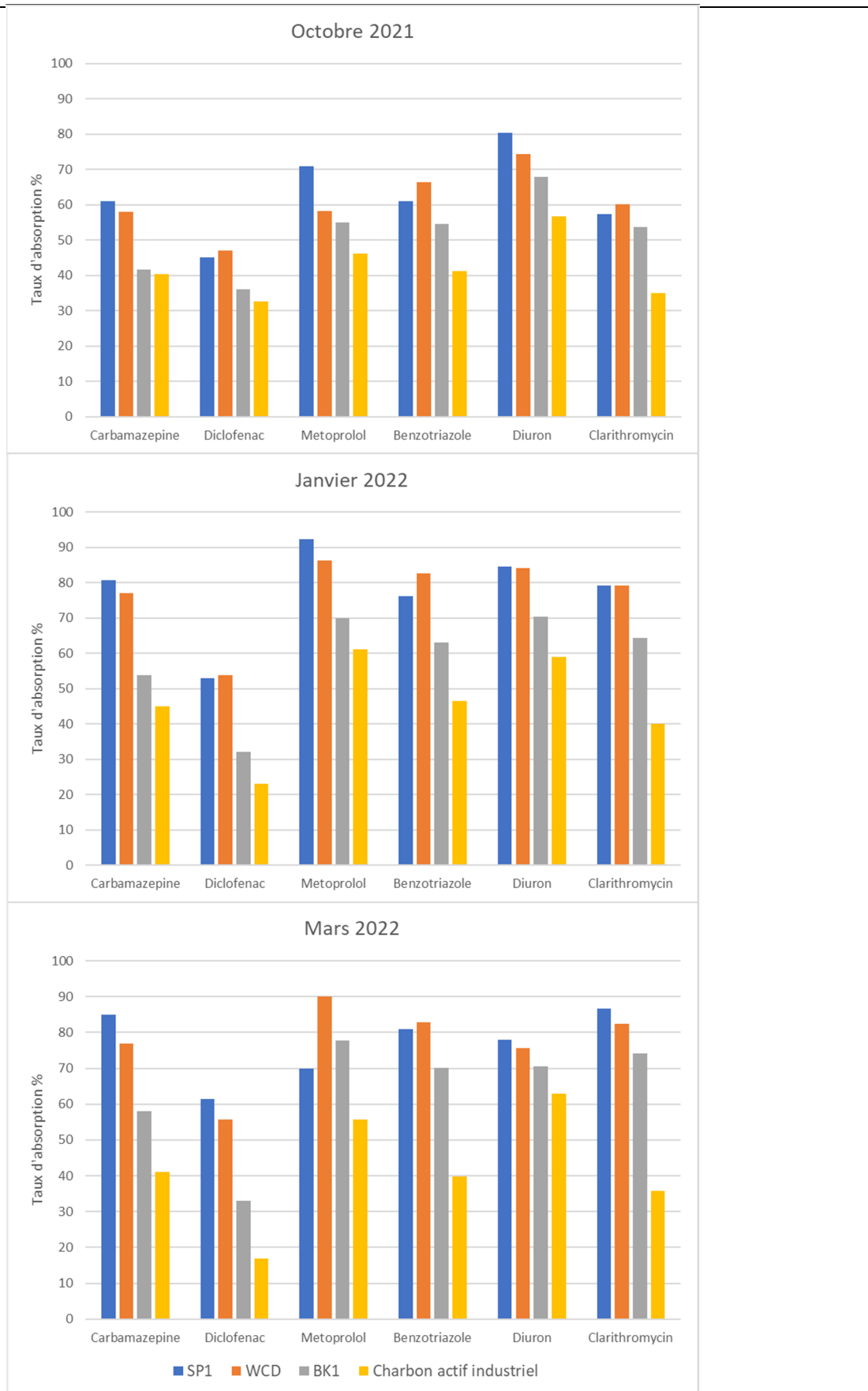
Six OMPs sont régulièrement analysés à la STEP et l'ont été pour cette étude également lors de chaque campagne: Carbamazepine, Diclofenac, Metoprolol, Benzoatriazole, Diuron, Clarithromycin (Tableau 9).

Tableau 9. Concentrations initiales (avant traitement) des OMPs dans l'eau de la STEP d'Aire au cours des trois campagnes de mesure.

OMP	Concentration (µg/L)		
	oct.21	janv.22	mars.22
Benzotriazole	2.02 ± 0.0	1.93 ± 0.0	1.30 ± 0.0
Carbamazepine	0.211 ± 0.0	0.208 ± 0.0	0.289 ± 0.0
Clarithromycin	0.216 ± 0.0	0.199 ± 0.0	0.181 ± 0.0
Diclofenac	0.88 ± 0.0	0.732 ± 0.0	1.137 ± 0.0
Diuron	0.022 ± 0.0	0.018 ± 0.0	0.012 ± 0.0
Metoprolol	0.582 ± 0.0	0.517 ± 0.0	0.421 ± 0.0

4.2.2.3 Résultats :

Figure 4. Taux d'absorption des OMPs par les biochars activés ainsi que le charbon actif de référence dans la STEP d' Aire lors des trois campagnes d' échantillonnage entre 2021 et 2022.



On constate peu de différence d'une campagne à l'autre. Les biochars sont toujours autant ou plus performants que le charbon actif de référence. Les taux d'élimination des molécules ciblées varient entre 30 et 90%. La molécule la plus difficilement éliminée est le diclofenac. Les biochars les plus performants sont SP1 et WDC.

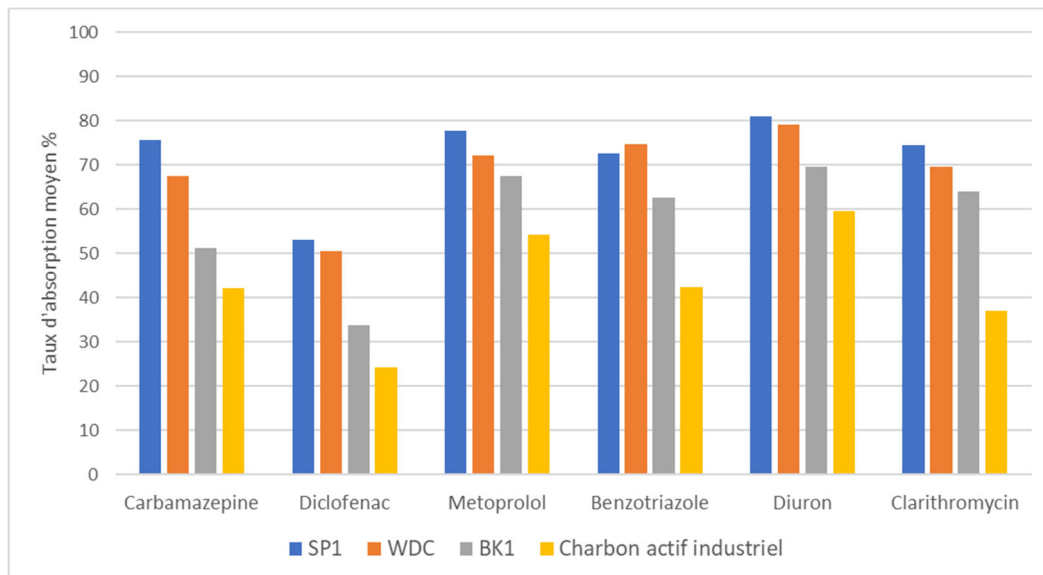


Figure 5. Taux d'absorption moyen des OMPs par les biochars activés ainsi que le charbon actif de référence dans la STEP d'Aire lors des trois campagnes d'échantillonnage entre 2021 et 2022.

En moyenne sur les trois campagnes, les taux d'élimination des molécules varient entre 30 et 80%.

1. Les biochars activés testés ont pu éliminer entre 30 et 90% des polluants cibles présents dans la STEP (Figure 4).
2. Les trois biochars testés ont montré des efficacités relativement différentes dans l'élimination des molécules détectées tout en restant systématiquement plus ou autant efficaces que le charbon actif de référence. Les biochars SP1 et WDC se sont montrés plus performants que le BK1 dans le traitement des six OMPs analysés.
3. La molécule la plus difficile à éliminer est le Diclofenac (taux d'élimination maximum environ de 50%), que ce soit avec des biochars ou du charbon actif.

#### Traitement des eaux de surface (rivière Arve)

Quatre campagnes d'échantillonnage sur la rivière Arve ont été réalisées entre août 2021 et mai 2022 (Figure 6).



Figure 6. Echantillonnage de la rivière Arve (17.11.2021)

Ces campagnes d'échantillonnage ont été réalisées en tenant compte du niveau de la nappe phréatique, du débit de la rivière et des précipitations des jours précédant l'échantillonnage (Figure 7).



Figure 7. Hydrogramme des moyennes journalières (ligne continue) et courbe des valeurs classées moyennes journalières (ligne traitillée) en  $m^3/s$  pour la station de réinfiltration de l'Arve – Bout du Monde, pour l'année 2021. Graphique tiré de [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch)

A chaque campagne, les principaux paramètres décrivant la qualité de l'eau de rivière ont été mesurés (Tableau 10).

Tableau 10. Paramètres mesurés dans la rivière Arve en août 2021, novembre 2021, février 2022 et mai 2022: Température, Pression atmosphérique, Alcalinité, Conductivité, pH, Oxygène, Demande biochimique en oxygène, Carbone organique dissout, Azote total, Phosphore total, Chlorure, Sulfate, Sodium, Potassium, Magnésium, Calcium.

	T. C°	Alca	Cond.	pH	O <sub>2</sub>	BOD	DOC	N <sub>tot</sub>	P <sub>tot</sub>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub>	Na	K	Mg	Ca
	C°	meq /l	μS/cm	-	mg/L										
<b>Aout 21</b>	10.8	2.68	320	8.17	11.2	1.7	1	0.6	0.105	4.07	29.6	3.97	1.18	0.4	2.69
<b>Nov. 21</b>	6.2	3.19	489	8.21	11.9	2.74	1	1.06	0.049	10.81	80	8.49	1.77	0.74	4
<b>Févr. 22</b>	5.2	3.58	547	8.27	11.7	2.54	1.28	1.47	0.067	2.15	66	13.05	1.88	0.67	4.07
<b>Mai 22</b>	7.5	2.41	344	8.23	11.6	2.59	0.79	0.7	0.045	5.2	46	4.27	0.93	0.45	2.7

Le nombre, le type et la concentration des OMPs détectés dans la rivière varient au cours des campagnes, suivant le débit de la rivière (dilution des OMPs) et des sources de polluants prédominantes (Tableau 11).

Tableau 11. Concentrations initiales (avant traitement) des OMPs dans l'eau de la rivière Arve au cours des quatre campagnes de mesure.

OMP	Concentration (ng/L)			
	août.21	nov.21	févr.22	mai.22
<b>Benzotriazole</b>	20	83	64	20
<b>Valsartan</b>	-	36	36	15
<b>Carbamazepine</b>	-	10	-	5
<b>Clarithromycin</b>	-	-	-	-
<b>Diclofenac</b>	-	32	10	-
<b>Irbesartan</b>	15	99	39	15
<b>Metoprolol</b>	-	-	-	-
<b>Acesulfam</b>	44	84	175	43
<b>Diatrizoic acid</b>	-	-	-	-
<b>Ibuprofen</b>	-	15	15	-
<b>Metformin</b>	103	308	419	99

Onze OMPs ont été recherchés dans l'eau de rivière suite à une sélection faite en début de projet. Parmi celles-ci, des molécules venant de la liste de polluants cibles des stations d'épuration et d'autres molécules souvent détectées dans les eaux de rivières. De plus, cinq molécules ainsi que trois autres polluants absents de la liste préétablie mais souvent cités dans la littérature dans des conditions similaires, ont été détectés dans la rivière Arve au cours des quatre campagnes (Figure 8 et Figure 9). Les analyses ont été effectuées dans les laboratoires de l'Office cantonale des eaux de Genève.

4.2.2.4 Résultats :

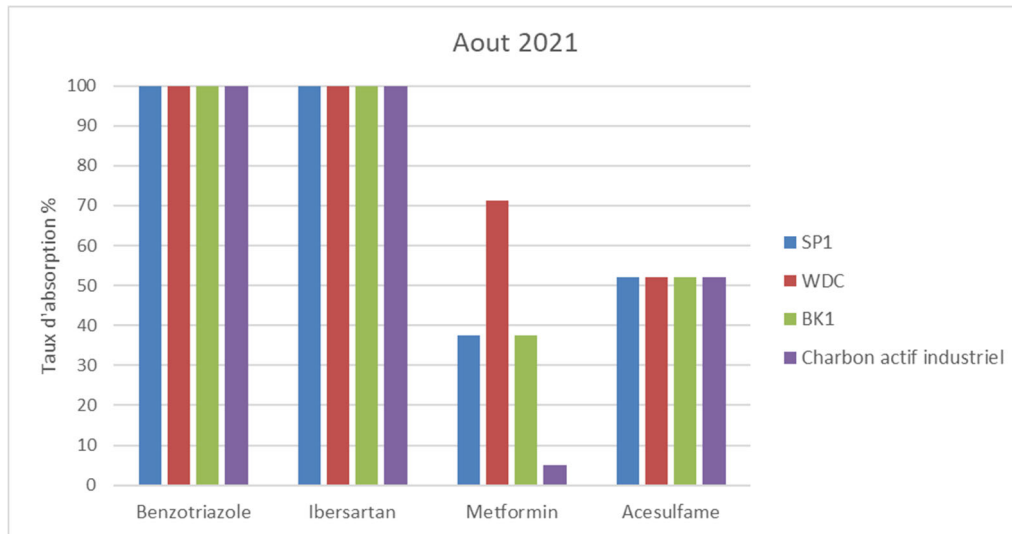


Figure 8. Taux d'absorption des OMPs par les biochars activés ainsi que le charbon actif de référence dans la rivière Arve lors de la première campagne d'échantillonnage en août 2021.

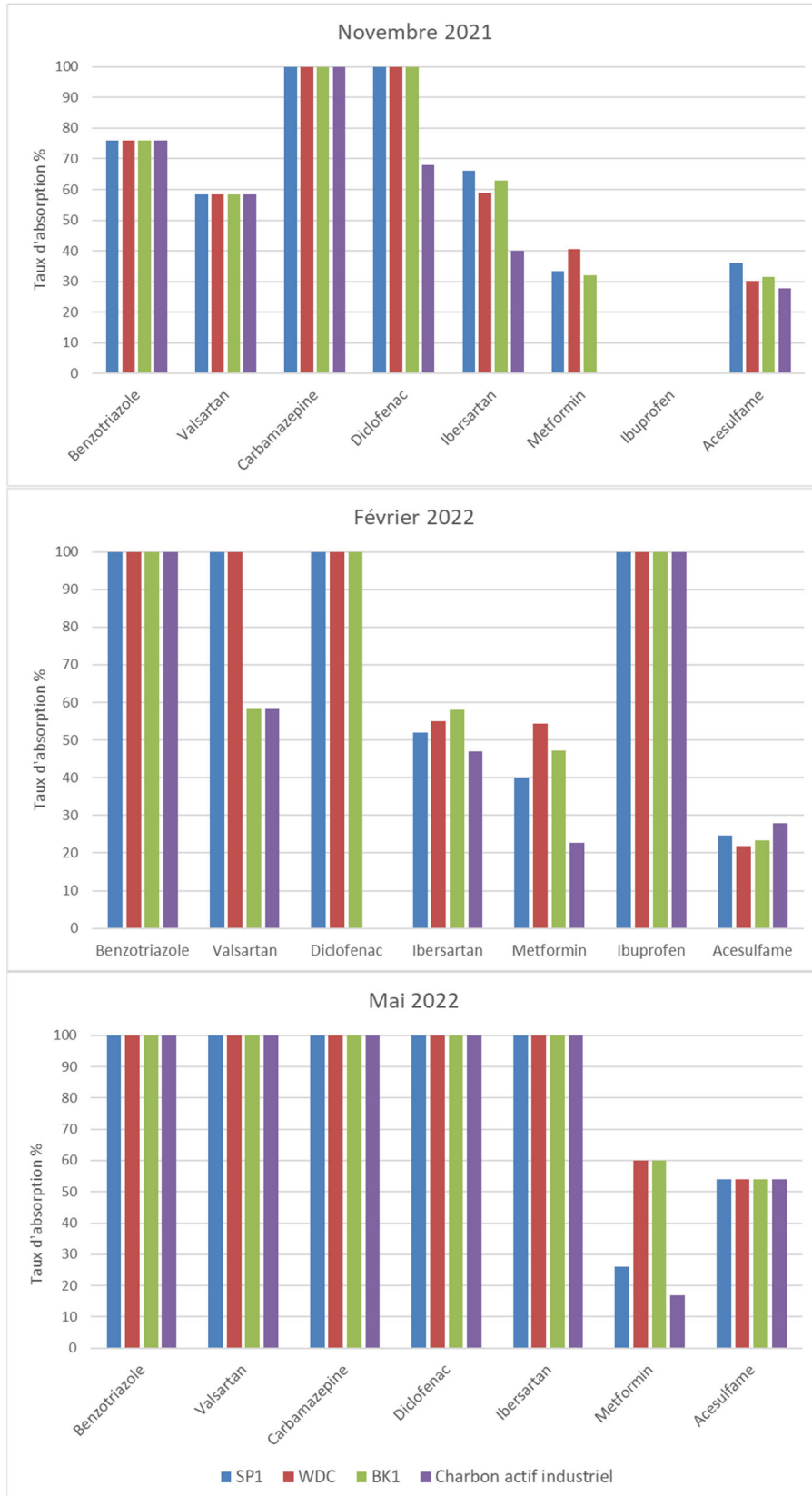


Figure 9. Taux d'absorption des OMPs par les biochars activés ainsi que le charbon actif de référence dans la rivière Arve lors des campagnes d'échantillonnage de novembre 2021, février et mai 2022.



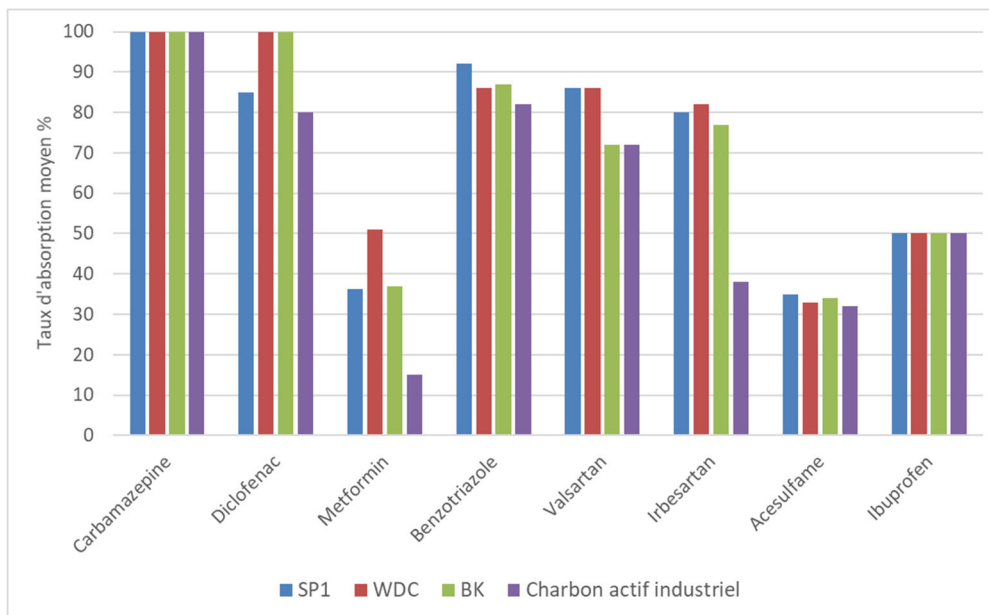


Figure 10. Taux d'absorption moyen des OMPs par les biochars activés ainsi que le charbon actif de référence dans la rivière Arve lors des quatre campagnes d'échantillonnage entre 2021 et 2022. Parmi ces molécules, 4 ont été détectées dans chaque campagne : Benzotriazole, Irbesartan, Acesulfame et Metformin.

1. Les biochars activés testés ont pu éliminer de 20 à 100% des différents polluants présents dans la rivière (Figure 10).
2. Les trois biochars testés ont montré des efficacités comparables dans l'élimination des molécules détectées et, le plus souvent, ils ont été plus efficaces que le charbon activé de référence.
3. Les différences de rendement d'élimination entre biochars sont faibles mais souvent élevées par rapport au charbon activé commercial.
4. La molécule la plus réfractaire au traitement est l'Acesulfame.
5. Sans surprise, les efficacités de traitement sont variables d'une campagne à l'autre.

#### 4.2.3 Conclusions du WP2:

Les biochars activés produits à partir de résidus des filières d'exploitation du bois offrent des performances supérieures ou égales aux charbons activés utilisés habituellement. Celles-ci varient d'une molécule à l'autre, et d'une qualité d'eau traitée, comme attendu, étant donné que les mécanismes d'immobilisation des OMPs sont dépendants de leur propriétés chimiques et physiques et de celles des eaux dans lesquelles ils se trouvent.

**Les biochars produits sont compétitifs du point de vue des performances de traitement.**

## 4.3 WP3 : Aspects économiques et écologiques de la filière locale de production

### 4.3.1 Objectif détaillé :

Le WP3 vise à étudier la viabilité économique et écologique d'une filière locale de biochars utilisant le procédé de transformation résultant des WP1 et 2. Ne sont considérés d'un point de vue économique que le ou les scénarios de mise en œuvre d'une telle filière dont l'écobilan (performance environnementale) est satisfaisant.

### 4.3.2 T3.1 - Déterminants écologiques et économiques d'une filière locale de biochars

#### 4.3.2.1 : Objectif détaillé

Cette tâche vise à préciser les étapes du cycle de vie et l'ensemble des paramètres d'une filière locale de biochars mettant en œuvre le procédé de transformation résultant des WP1 et 2. Les données telles que l'origine de la matière première, les zones de chalandises d'approvisionnement et de commercialisation, l'efficacité énergétique ou les caractéristiques d'une installation standard de transformation par pyrolyse seront prises en compte pour le territoire suisse.

#### 4.3.2.2 Méthode :

La réponse à ces questions a été recherchée lors de séances de discussion avec les professionnels du bois, dans la bibliographie et lors de la préparation de la modélisation du système biochar. Les résultats sont présentés dans le chapitre 4.3.3 et 4.3.4.

### 4.3.3 T3.2 - Analyse écologique des scénarios de mise en œuvre d'une filière locale de biochars

#### 4.3.3.1 Objectif détaillé :

- La question à laquelle nous souhaitons répondre est : Les biochars SYLVO sont-ils plus avantageux écologiquement que le charbon actif pour des applications dans le traitement de l'eau en Suisse, et dans quelles conditions ?
- L'approche utilisée pour répondre à cette question est une analyse comparative basée sur la méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie. Il s'agit d'un écobilan screening, basé sur des données de la littérature et l'interview d'expert. L'écobilan se focalise sur l'indicateur d'impact sur le changement climatique (GWP100) et n'a pas été soumis à une revue critique au sens des normes ISO14040-44.

#### 4.3.3.2 Périmètre et Champs d'étude de l'écobilan

- L'objectif spécifique de cet écobilan a été de comparer le bilan carbone du biochar SYLVO avec du charbon actif (CA) pour une application de traitement de l'eau ou recharge de nappe
- L'unité fonctionnelle retenue est : 1 m<sup>3</sup> d'eau traitée à niveau de qualité donnée
- 2 points de vue principaux ont été retenus : les biochars SYLVO (selon plusieurs scénarios d'approvisionnement) et les biochars SYLVO (selon une fourchette haute moyenne et basse d'impact décrit dans la littérature)
- Les frontières du système ont été définies de telle manière que les étapes du cycle de vie identiques entre les deux scénarios ont été exclues du périmètre d'analyse.

#### 4.3.3.3 Résumé des scénarios :

La démarche d'analyse implique la définition de scénarios. Ils sont présentés à la Figure 11.

##### **Système 1 BIOCHAR**

Le système est modélisé dans le cadre d'un déploiement du projet SYLVO en suisse. Il intègre 3 étapes principales : (1) l'approvisionnement de la **MATIERE PREMIERE**, (2) la **FABRICATION** du Biochar, et (3) son **UTILISATION**.

##### **Système 2 Charbon Actif**

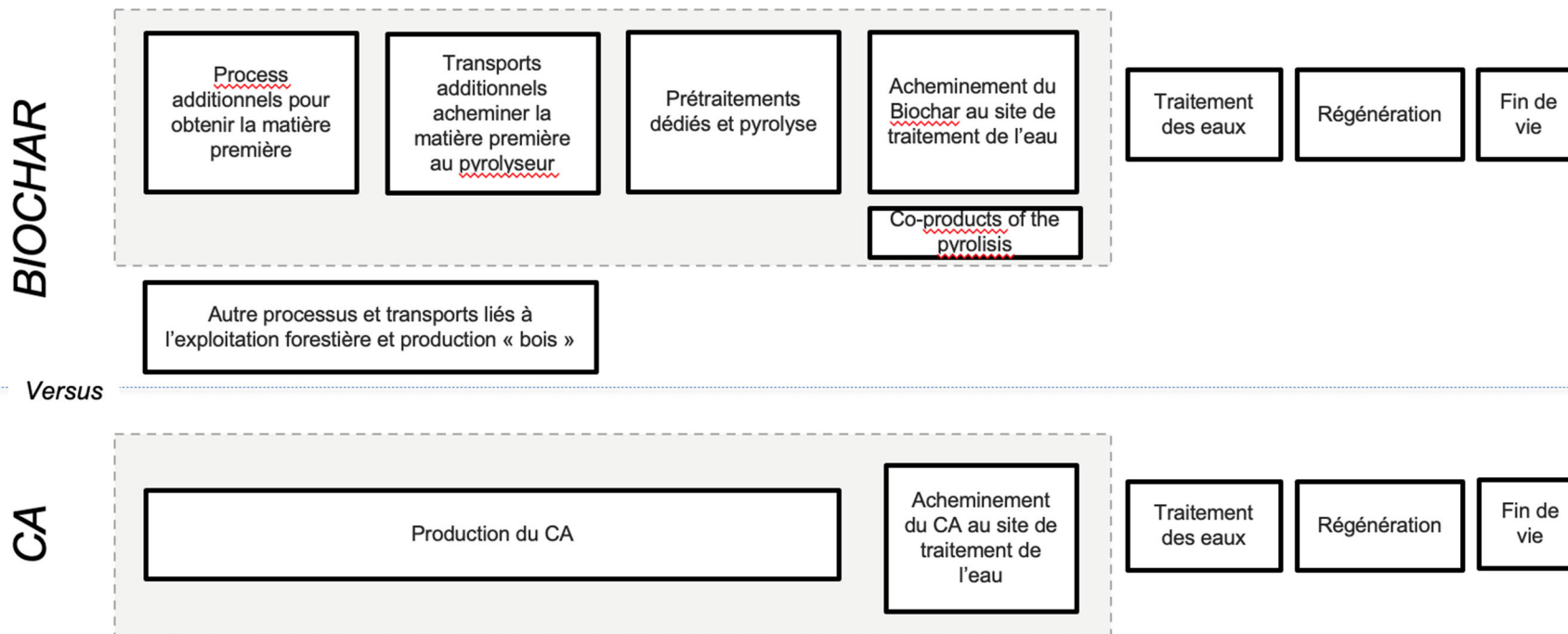
Le système est modélisé en prenant des données de la littérature

Les éléments communs entre les deux systèmes peuvent être exclus des limites du système considéré dans le cadre de la comparaison des scénarios

Figure 11 : présentation des deux systèmes étudiés.

#### 4.3.3.4 Scénarios comparatifs retenus pour l'analyse :

Les scénarios sont ensuite détaillés (Figure 12) et les étapes identiques dans les deux scénarios identifiées. En effet, elles ne seront pas incluses dans l'analyse comparative puisque identiques.



Les éléments identiques dans les deux scénarios sont exclus de l'analyse, donc la partie **UTILISATION**

Le traitement des eaux n'est pas inclus dans le système mais la quantité de de Biochar/CA nécessaire est elle une fonction du rendement d'épuration

Figure 12 : Scénarios détaillés du cycle de vie du biochar et du charbon actif.

4.3.3.5 Modélisation du système considéré pour l'analyse des BIOCHAR:

Le système biochar est ensuite modélisé : les différentes étapes depuis la matière première jusqu'à l'utilisation sont répertoriées (Figure 13 et Figure 14).

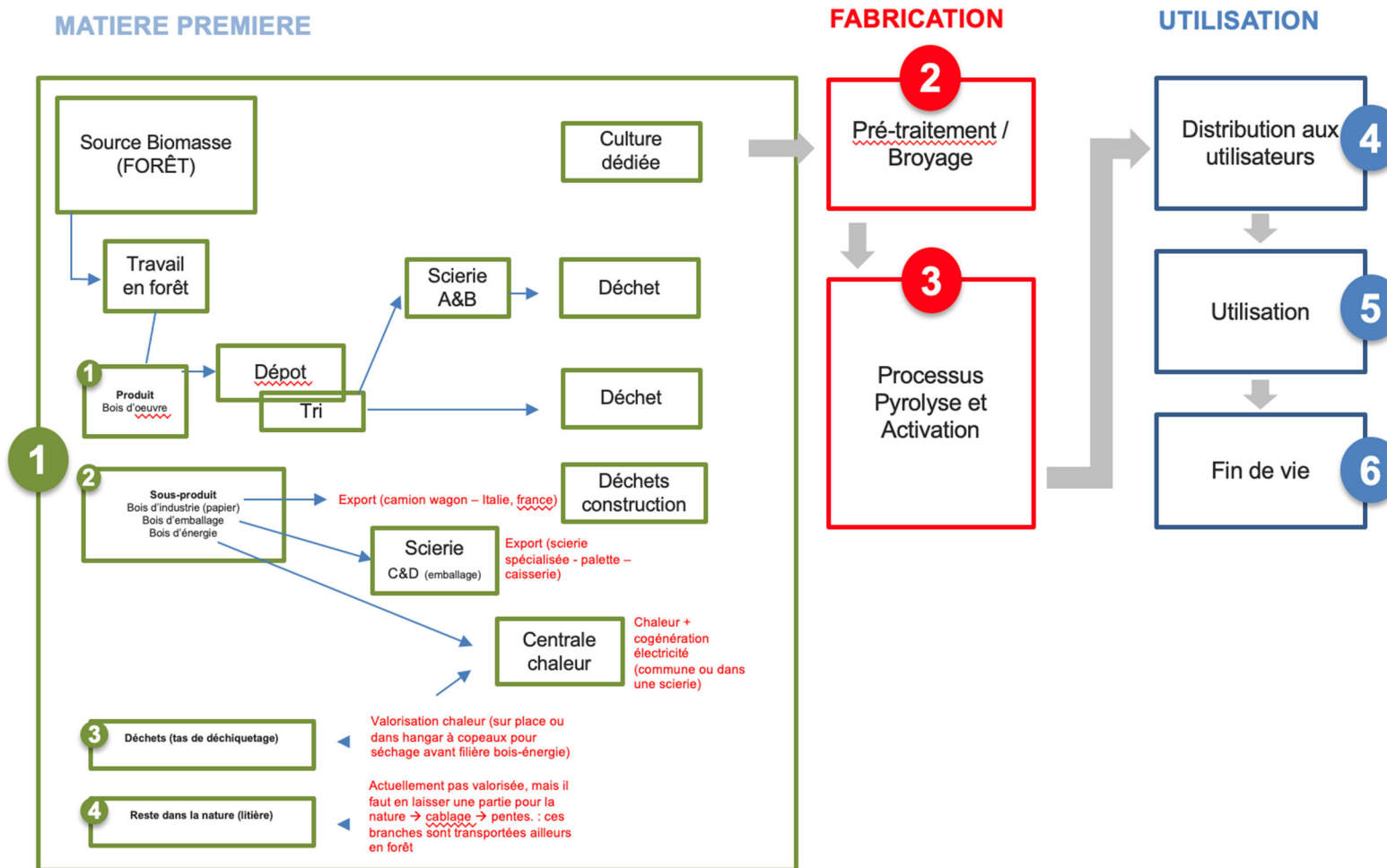


Figure 13 : Modélisation du système biochar

SOURCE

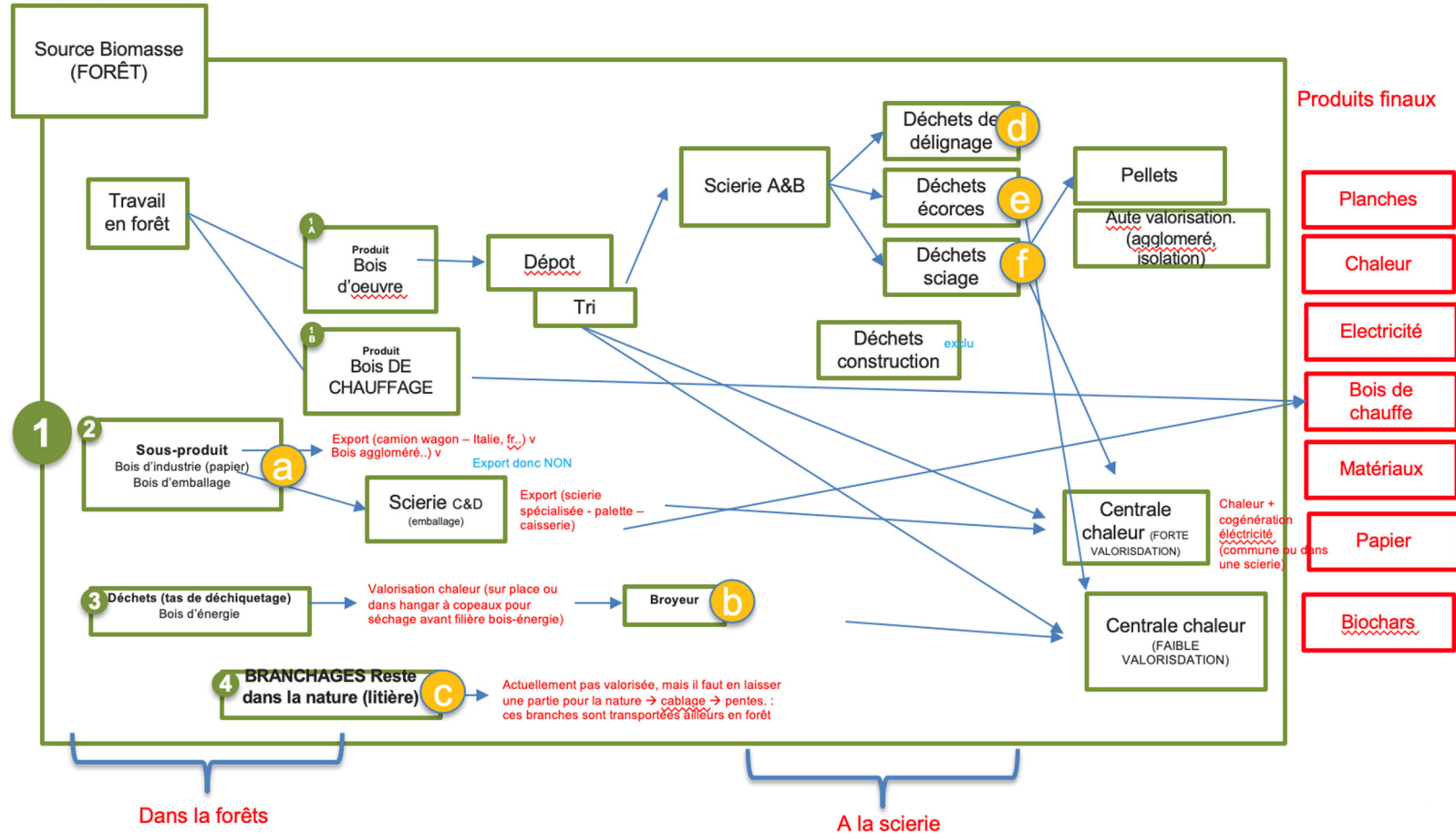


Figure 14 : détails relatifs aux sources de biomasse et aux produits finaux

L'additionalité des processus nécessaires à la fabrication du BIOCHAR doit être déterminée afin de savoir si des impacts doivent être alloués à ces étapes. Il s'agit ici de déterminer si les différentes sources (lettres a à f de la Figure 14) nécessitent des processus additionnels ou si il s'agit de coproduits d'un autre processus déjà existant. Les processus additionnels sont listés dans le Tableau 12.

La catégorie c, « branchages restés dans la nature, nécessite des étapes supplémentaires (consommatrices d'énergie). Elle est donc de ce point de vue-là à éviter par rapport aux autres. En outre, les branchages laissés en sous-bois contribuent au stockage du carbone dans les sols.

		Processus additionnel par rap. à existant	Processus additionnel besoin de pré-traitement
a	Sous-produit bois d'industrie (e.g. papier) ou d'emballage	non	oui
b	Bois de déchetage (bois normalement pour énergie)	non	oui
c	Branchages restés dans la nature	oui	oui
d	Scierie, déchets de délignage	non	oui
e	Scierie, déchets d'écorce	non	oui
f	Scierie déchets de sciage	non	non

Tableau 12 : Nécessité de processus additionnels par type de biomasse

#### 4.3.3.6 Principales hypothèses retenues :

Le calcul des bilans est fait en retenant certaines hypothèses. Elles sont rassemblées dans le Tableau 13.

BIOCHAR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seul le sous-scénario C « branchages restés dans la nature – litière » implique des processus additionnels qui ne sont pas déjà mis en œuvre par l'industrie forestière</li> <li>• Puisqu'on utilise des filières qui existent déjà, la taille du bassin versant n'intervient plus</li> <li>• Rendement massique de production BIOCHAR par biomasse : 10%</li> <li>• Les émissions de CO<sub>2</sub> pendant la pyrolyse sont biogéniques donc non comptabilisées</li> <li>• Hypothèses de transport local 100 km en camion</li> <li>• 10g de BIOCHAR/CA par m<sup>3</sup> d'eau traitée</li> </ul>
CA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valeur moyenne d'impact pour le CA vendu en Suisse : si le charbon vient de Chine, le transport externe doit être pris en compte. Les hypothèses suivantes ont été prises : transport depuis la Chine via le Havre (18'000 km bateau, 750 km camion)</li> </ul>
Conditions thermiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Production de chaleur : 3000 KWh/tonne</li> <li>• Hypothèse de valorisation 50%</li> <li>• Production de chaleur valorisée 1500 KWh/tonne</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intrans énergétique du pyrolyseur 5000 KWh/tonne biomasse (basé sur calcul économique)</li> <li>• Conditions thermiques : il faut atteindre 350° pour que la réaction soit exothermique. Il faut donc chauffer la biomasse à l'entrée.</li> <li>• La quantité volatilisée dépend de la température du pyrolyseur → plus on chauffe moins il y a de gaz → dans notre cas on veut chauffer pour avoir une condensation plus complète             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Si chauffe à 400° reste 50% de la biomasse</li> <li>- Si chauffe à 850° avec réactif il reste plus que 10% de biomasse → avec 1 tonne de biomasse on peut produire 100 kg de CA (mais à partir de 600° la réaction devient endothermique)</li> <li>- À 600° on récupère 50% de l'énergie dans le gaz (50% du C)</li> </ul> </li> <li>• L'infrastructure est considérée comme amortie sur 25 ans et 5000 tonnes de biomasse traitée par an, modélisée sur la base d'une BOM simplifiée (3 tonnes d'inox), le tout représentant moins de 1% de l'impact global.</li> <li>• Inox pour haute température + un peu d'électronique</li> <li>• Dépend de la machine (grosse. / petite – 1200 à 5000 tonnes de biomasse)</li> <li>• Durée de vie de l'installation (au moins 25 ans)</li> </ul>
--	--

Tableau 13 : hypothèses retenues

Les analyses sont faites sous différents scénarios définis dans le Tableau 14.

Scénarios comparés	Description
BIO_low	Biochar standard sous-scénarios a, b, d, e (Figure 14) d=WDC e=BK
BIO_pretraité	Biochar en format prétraité sous-scénarios f
BIO_high	Biochar standard sous-scénarios c = SP
CA1	CA low impact (selon littérature)
CA_REF	CA base de données Ecoinvent
CA2	CA high impact (selon littérature)

Tableau 14 : scénarios testés.



#### 4.3.3.7 Résultats

Tous les biochars produits séquestrent plus de CO<sub>2</sub> qu'ils n'en produisent, contrairement aux charbons actifs importés. Le processus de fabrication est celui qui émet le plus de CO<sub>2</sub> pour les charbons actifs importés.

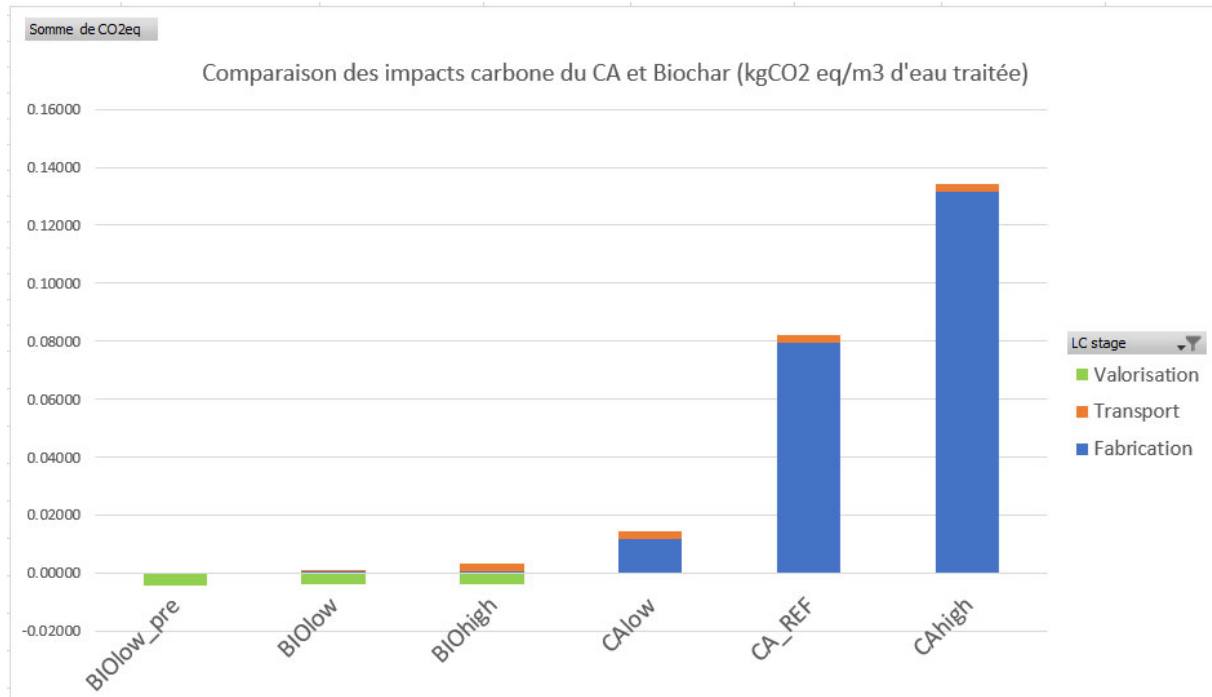


Figure 15 : somme des CO<sub>2</sub> équivalent produits par types de biochar et par type de CA sous les différents scénarios testés (tableau 14).  
BIOlow-pre : biochar prétraité = wood pellet ; BIOlow : = WDC ou BK. Bio-High : = SP.

Le bilan de production de CO<sub>2</sub> est négatif pour les biochars produits dans le cadre du projet Sylvo car le processus permet une valorisation de la chaleur. Le biochar SP nécessite du transport supplémentaire. C'est l'élément qui pèse le plus négativement dans la balance des émissions qui demeurent cependant légèrement négatives. Elles sont très clairement négatives pour les biochars BK et WDC.

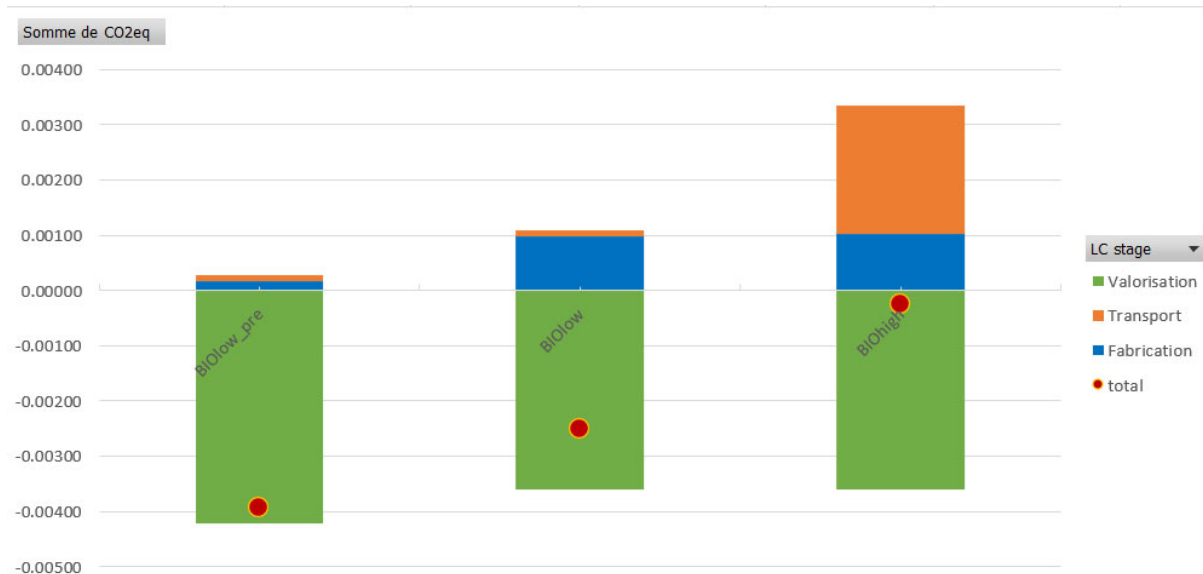


Figure 16 : détail des sommes de CO2 équivalent produit par types de biochar sous les différents scénarios testés (tableau 14). BIOlow-pre = wood pellet ; BIOlow : = WDC ou BK. Bio-High : = SP.

Les valeurs de gaz à effet de serre et d'énergie nécessaire à la production de biochar ou de charbon actifs ont été comparées avec les valeurs trouvées dans la littérature Tableau 15. Elles sont en cohérence.

	Emissions de gaz à effet de serre [kg CO2eq/kg ]	Demande en énergie [MJ/kg]
<b>Résultat Sylvo</b>		
Bio_low	-0.25	1.28
Bio_high	-0.027	-
CA	1.48 à 13.8	
<b>Résultats de la littérature</b>		
CA (Alhashimi et al., 2017)	6.6	-
Wood waste biochar (Alhashimi et al., 2017)	-1.3 à -0.2	6.1
Willow woodchips biochar (Hamedani et al., 2019)	-1.65	-
Slow pyrolysis biochar (Hammond et al., 2010)	-1.3 à -0.7	-
Biochar production guide	-0.89	-

Tableau 15 : demande en énergie et CO2 émis pour la production de biochars selon des valeurs de la littérature.

Les résultats sont présentés dans Figure 15 et 16. Ils montrent que :

- Le Biochar est une alternative intéressante au CA du point de vue de l'empreinte carbone.
- Chaque kilo de Biochar utilisé permet la réduction d'émission de GES de 1.48 à 8.45 kg CO2eq.
- Les valeurs de benchmark dans la revue littérature confirment le résultat de SYLVO. Il est à noter que les résultats pour SYLVO présentent un bénéfice moindre que ceux de la littérature



pour le Biochar ; ceci est lié au fait que les limites des système pour SYLVO intègrent toutes les étapes de transport (pas les résultats de la littérature).

- La production de Biochar demande moins d'énergie (1.28 MJ) que celle de CA (6.1 MJ)

#### 4.3.3.8 Conclusions partie écologique de la filière biochars

1. Le Biochar est une alternative intéressante au CA du point de vue de l'empreinte carbone. Ceci reste vrai pour tous les scénarios pour autant que les hypothèses de valorisation énergétique au pyrolyseur soient maintenues.
2. Il existe une grande variabilité dans les données relatives au CA, qui font que le gain obtenu par le Biochar varie entre 103% et 118 %.

#### 4.3.4 T3.3 - Analyse économique et optimisation des scénarios à forte performance environnementale

##### 4.3.4.1 *Evaluation succincte du marché des eaux usées*

La consommation d'eau par habitant en suisse est estimée à environ 300 litres par habitant et par jour. En partant d'une estimation de la population suisse à environ 8'500'000 habitants, la quantité d'eau à traiter dans les stations d'épuration est estimée à environ 930 millions de m<sup>3</sup> par an si l'on considère que la totalité de l'eau y est traitée.

##### 4.3.4.2 *Evaluation succincte du marché du charbon actif ou du biochar*

En partant de l'hypothèse que 50% de l'eau sera traitée par des charbons actifs et que la quantité de charbon actif nécessaire est de l'ordre de 10 gr / m<sup>3</sup> d'eau, la quantité totale de charbon actif sera donc d'environ 4650 tonnes / an.

Si le biochar à la même efficacité que le charbon actif et que 20% des stations d'épuration utilise du biochar plutôt que du charbon actif, alors la quantité de biochar nécessaire pour la suisse serait de l'ordre de 930 tonnes / an.

##### 4.3.4.3 *Evaluation du nombre de pyrolyseurs à prévoir en suisse et en Suisse romande*

En partant de l'hypothèse que la production d'un pyrolyseur « classique » est de l'ordre de 500 tonnes / an, le nombre de pyrolyseurs en Suisse serait de deux.

A noter qu'en considérant la taille de la population de Suisse romande, de l'ordre de 2'040'000, le marché romand est trop petit pour l'installation d'un pyrolyseur, sauf si une partie de la zone de chalandise de se pyrolyseur se trouve en Suisse allemande. Il est à noter qu'à ce jour, les zones de chalandise de producteurs de biochars ne se limitent pas à une région linguistique.

##### 4.3.4.4 *Hypothèses économiques sur le pyrolyseur et ses installations connexes*

L'investissement pour la réalisation d'un pyrolyseur et de ses installations connexes est compris entre CHF 700'000.- et 1'200'000.- pour un pyrolyseur de capacité susmentionnée (500 T / an).

La marge nécessaire pour amortir et rentabiliser l'investissement sur 10 ans avec un taux de rentabilité du capital investi de 15%, compte tenu du risque, est comprise entre environ CHF 280.- /T à CHF 480.- / T.

Si la rentabilité exigée augmente à 20%, la marge augmente à environ CHF 335.- / T à CHF 570.-/T.

##### 4.3.4.5 *Hypothèses sur les frais d'exploitation*

Pour exploiter un pyrolyseur, il faut entre 1 à 2 personnes à plein temps auxquelles s'ajoute des frais d'entretien estimé entre 2% et 4 % du coût de la machine.

3 scénarios sont évalués. La probabilité du scénario 3 est réelle étant donné que la production de biochar correspond à une action bénéfique pour le climat.

- **Scénario 1** : 2 personnes à plein temps, frais d'entretien élevé et biomasse au prix du marché
- **Scénario 2** : 1 personne à plein temps, frais d'entretien normal et biomasse à 50% du prix du scénario 1
- **Scénario 3** : Emplois subventionnés, frais d'entretien normal et biomasse à 50% du prix du scénario 1

*Personnel et entretien :*

- Scénario 1 : Dans l'évaluation présente, le coût total est estimé à CHF 250'000.-, soit 500.- / T de biochar produite.
- Scénario 2 : Le coût total est estimé à CHF 120'000.-, soit 240.- / T de biochar produite.
- Scénario 3 : Le coût total est estimé à CHF 30'000.-, soit 60.- / T de biochar produite

*Intrants : biomasse et énergie (gaz et électricité), etc.*

- Scénario 1 : Le coût des intrants, soit les branches broyées à l'entrée du pyrolyseur sont estimées à CHF 100 / T. Si, le coefficient de transformation de 10 se confirme (rendement de 10%), cela signifie que la matière première coûte 1'000.-/T de biochar. De plus comme autre intrant il y a la consommation de gaz et d'électricité qui est estimée à CHF 90.- / T de biochar.

Le total des frais d'exploitation se monte donc à CHF 1590.- / T de biochar pour le scénario 1.

- Scénario 2 : Le coût des intrants soit les branches broyées à l'entrée du pyrolyseur sont estimées à CHF 50 / T. Si, le coefficient de transformation de 10 se confirme, cela signifie que la matière première coûte 500.-/T de biochar. La consommation de gaz et d'électricité est estimée à CHF 90.- / T de biochar.

Le total des frais d'exploitation se monte donc à CHF 830.- / T de biochar pour le scénario 2

- Scénario 3 : Le coût des intrants soit les branches broyées à l'entrée du pyrolyseur sont estimées à CHF 50 / T. Si, le coefficient de transformation de 10 se confirme, cela signifie que la matière première coûte 500.-/T de biochar. La consommation de gaz et d'électricité est estimée à CHF 90.- / T de biochar.

Le total des frais d'exploitation se monte donc à CHF 650.- / T de biochar pour le scénario 3

N : b : les coûts de l'énergie ont été estimés avant la guerre en Ukraine

*4.3.4.6 Hypothèse sur la marge commerciale*

Sur ce type de produit la marge commerciale hors frais de livraison sur prix de vente est estimée à 25% (la rentabilité de l'investissement étant déjà prise en compte).

*4.3.4.7 Estimation du prix de vente de la tonne de biochar*

Le prix de vente de la tonne de biochar est estimé :

- Scénario 1 : Entre **CHF 2490.- / T** à **CHF 2880.- / T**
- Scénario 2 : Entre **CHF 1480.- / T** à **CHF 1870.- / T**
- Scénario 3 : Entre **CHF 1240.- / T** à **CHF 1630.- / T**

A noter que la vente de la chaleur dégagée par le pyrolyseur pourrait faire diminuer ce prix de l'ordre de CHF 90.- / T (0.03 CHF le kWh thermique), voir un peu plus en diminuant aussi la marge

commerciale, mais cela nécessite d'avoir à proximité une installation qui a besoin de cette énergie thermique ainsi que des investissements supplémentaires pas pris en compte dans cette étude.

#### 4.3.4.8 *Le prix de vente du charbon actif*

Les fourchettes de prix du charbon actif se situe entre CHF 1'100.-/ T et 1'500.-/ T. Le prix du biochar ci-dessus n'est donc compétitif que sous le scénario 3, c'est-à-dire si la production est au bénéfice d'une subvention.

#### 4.3.4.9 *Discussion des hypothèses principales*

Dosage du biochar : les résultats du WP2 ont montré que la recette de pyrolyse fournissait des biochar aux capacités de traitement supérieures à ce qui est légalement nécessaire. Dans ces conditions, l'optimisation de cette chaîne de valeur peut se faire de deux façon : soit en baissant la température de pyrolyse ou le temps de pyrolyse, avec un impact sur le rendement de production, soit en diminuant le dosage de biochar dans les eaux usées. Dans la première hypothèse, le rendement de production serait augmenté. Les coûts de fabrication des biochars en seraient réduits d'autant. Dans le deuxième cas, les coûts d'exploitation des STEP en seraient réduits d'autant, rendant le biochar compétitif par rapport au CA. Des tests à plus faible dosage devraient être testés.

Valorisation énergétique : le prix de l'énergie fluctue énormément de nos jours, à l'achat ou à la revente. Une hausse du prix de revente, probable vu l'augmentation de la demande, augmenterait la compétitivité du biochar. Cependant, on peut s'attendre qu'en même temps, les matières premières qui peuvent être valorisées sous forme de chaleur (WDC et BK) voient également leur prix augmenter. Du point de vue de cet aspect SP serait un candidat offrant des conditions de marché plus stables.

Hypothèse sur les techniques de traitement : la tendance actuelle est au mélange des solutions techniques de traitement : ozonation + charbon actif. Ceci conduirait donc à une production plus importante de biochar, augmentant la taille du marché.

#### 4.3.4.10 *Conclusions de la partie économique de la filière biochars*

Les conditions d'une filière rentable co-produits du bois – biochars pour le traitement des eaux sont donc sous les hypothèses estimées :

- Une subvention pour couvrir les frais de personnel
- La proximité d'une centrale à chaleur pour pouvoir revaloriser la chaleur produite
- Une zone de vente au-delà des frontières cantonales.

Les paramètres qui font le plus fluctuer les prix avec un effet d'amélioration de la compétitivité du biochar sont : les prix de revente de la chaleur et surtout, le dosage des traitements au biochar dans les eaux usées.

A noter que cette étude a nécessité beaucoup d'hypothèses et si celles-ci devaient changer, la situation et la compétitivité du biochar devrait être réévaluée.

#### 4.3.5 Conclusions du WP3

1. Au prix actuel du charbon actif, le biochar n'est pas compétitif, sauf sous l'hypothèse d'emplois subventionnés dans le cadre de mesure pour le climat par exemple.
2. On notera également que la solution est écologiquement la meilleure car elle permet de stocker du carbone tout en traitant l'eau.

#### 4.4 WP4 – Dissémination et valorisation

##### **Conference:**

*The 3rd Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI 2021), held online on 10–13 June 2021.*

Title of Paper (ID# 549): Activated biochar from spruce and pine wood applied for pharmaceutical molecules removal from water

Author(s): Ahmed Amine Azzaz, Laurence Reinert, Sylvie Guittonneau, Nathalie Cottin, Michel Ondarts, Benjamin Golly, Fabienne Favre Boivin, Bahareh Zareeipolgardani, Laurent Duclaux

*Salon du bois, 11 février 2023 Bulles.*

Valorisation de déchets et sous-produits des filières bois pour l'épuration et le traitement des eaux.  
Fabienne Favre Boivin.

##### **Présentation de poster**

*The 11<sup>th</sup> International Conference Interface Against Pollution (IAP 2021) Wuhan China 2021*

Title: Wood branches: from an environmental burden to efficient biochars for micropollutants removal in aqueous solution

Authors: A. A. Azzaz, C. Gibeaux, L. Reinert, S. Guittonneau, N. Cottin, M. Ondarts, B. Golly, F. Favre Boivin, B. Zareeipolgardani, L. Duclaux

##### **Publication scientifique:**

Eliminate organic micropollutant by wood waste biomass (base) activated biochars in biologically treated wastewater and river media

Authors: F. Favre Boivin, B. Zareeipolgardani. In process

##### **Presse locale:**

La liberté, 13 février. Région: du bois pour dépolluer les eaux usées. Maude Tornare.

##### **Interview radiophonique:**

<https://frapp.ch/fr/articles/stories/une-2e-vie-pour-les-dechets-de-la-filiere-du-bois-du-canton>

##### **Journal en ligne:**

Plateforme Frapp: Une 2e vie pour les déchets de la filière du bois du canton?

#### 4.5 WP 0 Gestion de projet

Le projet Sylvo a rencontré des écueils majeurs dans sa réalisation qui ont pu être surmontés.

- L'annonce tardive de l'obligation de marché public du côté français qui a désynchronisé le projet avec les calendriers académiques et donc les possibilités de recrutement de main d'œuvre.



- La pandémie COVID qui nous a tenus éloignés des laboratoires et sites de prélèvements pendant 7 mois.
- L'interruption de la collaboration avec la France pour des raisons administratives.

Nous tenons à remercier les partenaires du projet, les promotions économiques cantonales, et les administrateurs suisses du projet pour leur aide pragmatique et efficace durant ces difficultés et pour leur enthousiasme tout au long du projet.

## 5. Conclusions – Perspectives

**La possibilité de créer des biochar performants à partir de co-produits de l'industrie du bois pour le traitement de l'eau usée et de réinfiltration de nappes a été démontrée dans ce projet.**

**La performance écologique de la filière biochar est clairement avérée par rapport à la filière charbons actifs importés étant donné qu'elle permet un stockage de carbone – alors que la filière charbon en émet- et une consommation d'énergie moindre.**

**D'un point de vue économique, le biochar n'est compétitif aujourd'hui, dans le cadre des hypothèses posées, que sous réserve de subventions.** Cette solution est réaliste puisque cette filière représente une voie de limitation d'émissions de CO<sub>2</sub>, bénéfique pour le climat.

Des voies d'amélioration de la filière de production et d'utilisation sont à développer :

- Amélioration des propriétés mécaniques pour des applications nécessitant des particules ou des grains tout en gardant les capacités d'épuration
- Dosage minimal possible à déterminer sous forme de poudre ou sous une autre forme
- Possibilité d'augmentation du rendement de production des biochars sans perte de propriétés d'épuration



## 6. Bibliographie

- Alhashimi, H.A., Aktas, C.B. 2017. Life cycle environmental and economic performance of biochar compared with activated carbon: A meta-analysis. *Resources Conservation and Recycling*, 118, 13-26.
- Boehler M., Zwickenpflug B., Hollender J., Ternes T., Joss A. & Siegrist H. (2012). Removal of micropollutants in municipal wastewater treatment plants by powder-activated carbon. *Water Sci Technol* 66 (10): 2115–2121.
- Chappaz A., Jaussi R. (2000). Traitement d'une eau de rivière alpine à fortes variations de turbidité. Réhabilitation de la station de réalimentation de Vessy. GWA 1.
- Conseil fédéral suisse. Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) (1998).
- Favre Boivin F., Slijepcevic A., Piantini U., Frey U., Abiven S., Schmidt H.-P., Charlet, L. (2022). Real wastewater micropollutant removal by wood waste biomass biochars: A mechanistic interpretation related to various biochar physico-chemical properties. *Bioresource Technology Reports*, Volume 17, 100966.
- Hagemann N., Schmidt H.-P., Kägi R., Böhler M., Sigmund G., Maccagnan A., McArdell C. S., & Bucheli T. D. (2020). Wood-based activated biochar to eliminate organic micropollutants from biologically treated wastewater. *Science of The Total Environment*, 730, 138417.
- Hamedani, S.R., Kuppens, T., Malina, R., Bocci, E., Colantoni, A., Villarini, M. 2019. Life Cycle Assessment and Environmental Valuation of Biochar Production: Two Case Studies in Belgium. *Energies*, 12(11).
- Hammond, J., Shackley, S., Sohi, S., Brownsort, P. 2011. Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK. *Energy Policy*, 39(5), 2646-2655
- Lehmann J., & Joseph S. (2015). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. Routledge.
- Margot J., Magnet A., Thonney D., Chevre N., de Alencastro F., Rossi L. (2011). Traitement des micropolluants dans les eaux usées – Rapport final sur les essais pilotes à la STEP de Vidy (Lausanne). Ed. Ville de Lausanne.
- Ribi SA. et al., 2014. Traitement des micropolluants par dosage de CAP dans la boue activée d'un MBR. Documentation interne.
- Siegrist H., Joss A. (2012). Review on the fate of organic micropollutants in wastewater treatment and water reuse with membranes. *Water Sci Technol* 1 September; 66 (6): 1369–1376. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2012.285>
- Wittmer A., Heisele A., McArdell CS., Böhler M., Longree P., Siegrist H. (2015). Decreased UV absorbance as an indicator of micropollutant removal efficiency in wastewater treated with ozone. *Water Sci Technol.*; 71(7):980-5. doi: 10.2166/wst.2015.053. PMID: 25860699.

## 7. Remerciements

Nous adressons nos vifs remerciements aux partenaires du projets :

**Interreg Suisse**

**Promotion économique du canton de Fribourg**

**Office des affaires extérieures, canton de Vaud**

**Services industriels de Genève**

**Office cantonal de l'eau (OCEau, Genève)**

**Entreprises Dolder AG et Desponds SA**

**ForêtFribourg**

**Lignum Fribourg**

**Service de la faune et de la flore du canton de Fribourg**

**Service de l'environnement du canton de Fribourg**