



Outil PEAC : Guide utilisateur

Version **v02.1**

15 octobre 2021



Auteurs :

Camille Maesele, INRAE

Philippe Roux, INRAE



Sommaire

1.	Présentation générale	5
1.1.	Description du calculateur	5
1.2.	Boîte à outil MINIMEAU	5
1.3.	L'Analyse du Cycle de Vie	5
2.	Structure du calculateur	6
2.1.	Structure générale.....	6
2.2.	Périmètre des systèmes étudiés	7
2.3.	Architecture des bases de données	8
2.4.	Parcours de l'utilisateur	9
3.	Parcourir et enrichir les BDD	9
3.1.	BDD WSmix.....	10
3.1.1.	BDD WSmix niv-1.....	10
3.1.	BDD REUT	11
3.1.1.	BDD REUT niv-1	11
3.2.	BDD STEP	12
3.3.	BDD Ressources en eau	13
3.3.1.	Où chercher les valeurs de CF pour les méthodes WSI & AWARE	14
3.3.2.	Comment renseigner les CF pour les méthodes ReCiPe et EF.	14
4.	Modéliser les scénarios	14
4.1.	Interface utilisateur	14
4.2.	Données PINCH	15
5.	Résultats d'ACV & Empreinte eau	15
5.1.	Impacts et dommages environnementaux	15
5.2.	Méthodes	16
5.2.1.	Méthodes ACV	17
5.2.2.	Empreinte eau	19
5.3.	Afficher et interpréter les résultats.....	21
5.3.1.	Comment lire ce type de graphique ?	21
5.3.2.	Comment interpréter ce type de graphique ?	22
5.4.	ACV comparative et aide à la décision multicritère	22
6.	Exemple illustratif.....	24
6.1.	Données d'entrée.....	24
6.1.1.	Description de l'usine	24
6.1.2.	Scénario de REUT.....	24

6.2.	Saisie dans l'interface	24
6.2.1.	Paramètres globaux.....	24
6.2.2.	Débits.....	25
6.2.3.	Boucle de régénération	25
6.3.	Affichage des résultats	26
6.3.1.	ACV	26
6.3.2.	Empreinte eau	28
6.4.	Scénarios alternatifs.....	29
6.4.1.	Cas littoral.....	30
6.4.2.	Cas zone aride continentale	31
6.4.3.	Cas eau d'origine souterraine non renouvelable	31
6.4.4.	Mix électrique non-renouvelable	32
6.4.5.	REUT sans traitement de régénération	33
	Références.....	35
	Annexe 1.....	36

Figures

Figure 1 – Cycle de vie d'un produit alimentaire, source : P. Roux, projet Sustain'apple.	6
Figure 2- Architecture générale du calculateur PEAC	7
Figure 3 – Périmètre des systèmes étudiés : scénario de référence (haut) et scénario REUT (bas).....	8
Figure 4 – Architecture des bases de données de PEAC.	9
Figure 5 – Parcours de l'utilisateur dans l'outil PEAC.....	9
Figure 6 – Schéma de présentation du modèle WSmix. Source : Leao et al. 2018.....	10
Figure 7 - Illustration des approches orientées "impacts" et "dommages" en ACV. Source : ACV4E, Guérin-Schneider et Roux 2018.	16
Figure 8 - Représentation des relations entre les catégories d'impact, midpoint, et les zones de protections (endpoint) de la méthode ReCiPe (source : Huijbregts et al. 2017).	19
Figure 9 – Exemple de graphique de résultats avec la méthode ReCiPe 2016 adaptée.	21
Figure 10 – Procédure d'aide à la décision pour une ACV comparative multicritère (Guérin-Schneider et al. 2018).....	23
Figure 11 - Saisie des paramètres globaux.	25
Figure 12 – Saisie du débit entrant du scénario de référence.	25
Figure 13 - Saisie du débit entrant du scénario de REUT.	25
Figure 14 - Saisie du débit d'eau consommée dans l'usine (si connu).	25
Figure 15 - Saisie du débit sortant de la boucle de REUT.....	25
Figure 16 – Saisie des caractéristiques (traitement, réseau, stockage) d'une boucle de REUT.....	26
Figure 17 – Création d'un traitement de régénération personnalisé.	26
Figure 18 – Résultats ReCiPe endpoint de l'exemple illustratif.	27
Figure 19 - Résultats EF (midpoint) de l'exemple illustratif.	28
Figure 20 - Résultats AWARE et WSI de l'exemple illustratif.	29
Figure 21 – Résultats ACV ReCiPe endpoint, cas d'étude en zone littorale.	30
Figure 22 – Résultats empreinte eau WSI et AWARE, cas d'étude en zone littorale.	30
Figure 23 - Résultats ACV ReCiPe endpoint, cas d'étude en zone aride.	31
Figure 24 - Résultats ACV ReCiPe endpoint, cas d'étude avec approvisionnement en eau d'origine non-renouvelable.	32
Figure 25- Résultats ACV ReCiPe endpoint, cas d'étude avec un mix énergétique non-renouvelable.	33
Figure 26 - Résultats ACV ReCiPe endpoint, cas d'étude sans traitement de régénération.....	34
Figure 28 – Capture d'écran de la cartographie WSI dans Google Earth.	36
Figure 29 – Capture d'écran de la cartographie AWARE dans Google Earth.	36

Tableaux

Tableau 1 – Technologies de traitement proposées dans la BDD REUT niv-1 pour la composition de solutions de régénération.	11
Tableau 2 - Caractéristiques de la filière STEP par lagunage. Source : WASABI, modèle théorique. ...	12
Tableau 3- Caractéristiques des filières STEP par filtres plantés de roseaux. Source : WASABI, modèle théorique.....	12
Tableau 4 – Caractéristiques des filières STEP par boues activées. Source : WASABI, modèle basé sur une station réelle concernant l'infrastructure, les consommations de réactifs et d'électricité et la production de boues.	13
Tableau 5 - Indicateurs Endpoint de la méthode ReCiPe 2016.	18
Tableau 6 - Bilan hydrique de l'exemple étudié	24

1. Présentation générale

1.1. Description du calculateur

PEAC (**P**inch **E**au **ACV**) est un calculateur simplifié d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) appliqué à la réutilisation des eaux usées (REUT) en industrie agroalimentaire. Il permet de calculer les impacts environnementaux d'un scénario de REUT (avec une ou plusieurs boucles de recyclage) et de les comparer à ceux d'un scénario de référence (sans REUT). Plusieurs méthodes d'impact sont proposées pour l'ACV (EF, ReCiPe) et l'empreinte eau (WSI, AWARE).

Il a été développé dans le cadre du projet MINIMEAU, qui vise la minimisation des consommations d'eau dans les industries agro-alimentaires par le développement d'une approche intégrée associant Empreinte Eau et Pinch massique. Ce projet, d'une durée de 4 ans (2018-2021) et financé par l'agence nationale de la recherche (ANR) et l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, associe des partenaires académiques (AgroParisTech/UMR GENIAL, IRSTEA/UMR ITAP), industriel (ProSim), plusieurs centres techniques (CTCPA, ITERG, ACTALIA, IFV) et un centre de transfert (CRITT Paca). Plus d'informations sont disponibles sur minimeau.fr.

L'objectif de PEAC est de permettre à des non spécialistes de l'ACV (industriels, centres techniques, bureaux d'études, etc.) de réaliser des ACV et empreinte eau de scénarios d'optimisation des consommations d'eau par la REUT (PINCH-Eau) et ainsi d'en évaluer la pertinence environnementale.

Contributeurs :

Cahier des charges et architecture : Camille Maesele (INRAE), Philippe Roux (INRAE), Hedi Romdhana (APT), Claire Fargues (APT), Olivier Baudouin (ProSim), Quentin Duval (ProSim), Laura Farrant (CTCPA), Marie-Pierre LABAU (CTCPA), Emilie Adoir (IFV).

Développement : Camille Maesele (INRAE).

Interface et tests : Camille Maesele (INRAE), Philippe Roux (INRAE), Hedi Romdhana (APT), Claire Fargues (APT), Olivier Baudouin (ProSim), Quentin Duval (ProSim), Laura Farrant (CTCPA), Marie-Pierre LABAU (CTCPA), Emilie Adoir (IFV), Yannick BIARD (CIRAD).

Financement : Agence Nationale de la Recherche (ANR), Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse.

1.2. Boîte à outil MINIMEAU

L'outil PEAC fait partie de la « boîte à outil » MINIMEAU qui regroupe un ensemble de documents de référence et d'outils opérationnels pour accompagner la mise en œuvre de projets de REUT au sein des industries agroalimentaires.

1.3. L'Analyse du Cycle de Vie

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode d'évaluation environnementale reconnue par l'ISO 14043 à 14046 (AFNOR, 2006) et utilisée dans de nombreux domaines pour évaluer les impacts potentiels sur l'environnement d'un produit, service ou procédé.

Le but de cette démarche est d'agir sur l'ensemble du cycle de vie du système : depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la mise au rebut en fin de vie, cycle communément appelé « du berceau au tombeau ». Cette approche permet par ailleurs d'éviter des transferts de pollution d'une étape du cycle de vie à une autre (exemple: un procédé qui réduit les impacts au moment de la fabrication mais augmente les impacts au moment du traitement des déchets).

La Figure 1 illustre un exemple de cycle de vie d'un produit alimentaire :



Figure 1 – Cycle de vie d'un produit alimentaire, source : P. Roux, projet Sustain'apple.

L'ACV est à la fois une procédure (enchaînement d'étapes standardisées), mais aussi un modèle de transformations « mathématiques » permettant de transformer des flux de substances en impacts environnementaux potentiels. Contrairement au Bilan carbone, qui ne s'intéresse qu'au changement climatique, l'ACV est une approche multicritère. Elle évalue un panel d'impacts potentiels, ce qui permet d'éviter les transferts de pollution d'une catégorie d'impact à une autre. Il s'agit d'une méthode qui fait l'objet de nombreux travaux scientifiques à travers le monde, afin de continuer à améliorer la méthode au fur et à mesure de l'avancement des recherches.

Enfin, il est important de noter que l'Analyse du Cycle de Vie étudie la fonction d'un système (produit, service ou procédé) et non le système en lui-même. Cette notion permet de comparer des systèmes remplissant une même fonction, mais de manière différente (comme par exemple : comparer l'avion et le transport en commun, qui rendent le service de transporter des personnes ; ou bien comparer l'avion et la visioconférence, qui rendent le service de réunir des personnes pour une réunion).

L'empreinte eau évalue les impacts environnementaux potentiels relatifs à l'eau sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit ou d'un processus. Elle peut être monocritère ou multicritère (au sens de l'ISO 14046) en intégrant les impacts liés à la privation d'eau (quantitatifs) et la dégradation de la qualité de l'eau (qualitatifs).

Dans le cas du calculateur PEAC, l'unité fonctionnelle est l'approvisionnement en eau et le traitement des effluents de l'usine sur une journée.

2. Structure du calculateur

2.1. Structure générale

Le calculateur PEAC est organisé en trois types d'onglets :

- **6 onglets de bases de données (BDD)** : ces onglets contiennent l'ensemble des éléments (briques élémentaires) permettant la modélisation des scénarios (Référence & REUT) sur plusieurs niveaux. Certains éléments sont personnalisables. Ainsi, les onglets BDD ont deux

fonctions : la consultation du détail des données de modélisation des « briques élémentaires » et leur éventuelle personnalisation.

- **1 onglet interface de modélisation des scénarios** : cet onglet principal permet de sélectionner les caractéristiques de chaque scénario ainsi que les paramètres communs aux deux systèmes.
- **3 onglets d'affichage résultats** : ils permettent de visualiser directement les résultats comparatifs d'ACV et d'empreinte eau avec différentes méthodes d'impact (ReCiPe 2016, EF v3, WSI et AWARE).

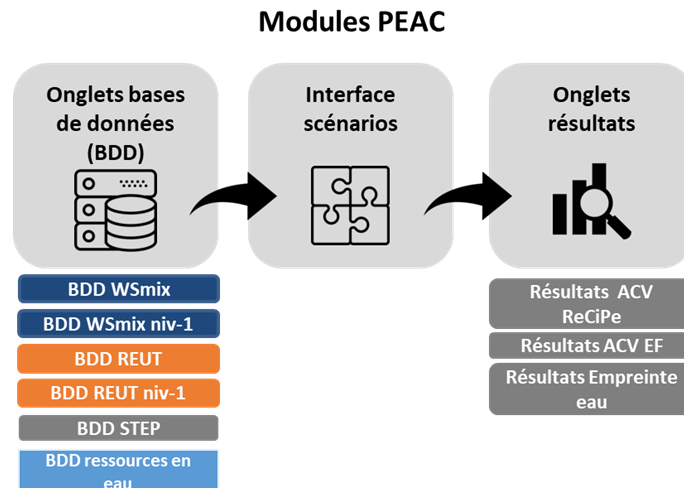


Figure 2- Architecture générale du calculateur PEAC

2.2. Périmètre des systèmes étudiés

Le périmètre des scénarios modélisés et étudiés est représenté sur la Figure 3 ci-dessous. Il comprend l’approvisionnement en eau de l’usine (WSmix), la collecte et le traitement des effluents (STEP) et l’acheminement (réseau), le stockage et le traitement des effluents concernés par les boucles de REUT.

Les procédés internes de l’usine ne sont pas modélisés car identiques dans les deux scénarios (principe de ceteris paribus). Seul le bilan hydrique de l’usine ($Q_{entrée} = Q_{sortie} + \text{eau consommée dans l'usine}$), déterminant la quantité d’effluents produite, doit être renseigné.

Les débits d’effluents des boucles de REUT sont fournis par les résultats du PINCH-Eau. Les éventuels traitements de régénération associés sont eux déterminés par une expertise afin de satisfaire les abattements nécessaires à l’usage destiné aux effluents de chaque boucle.

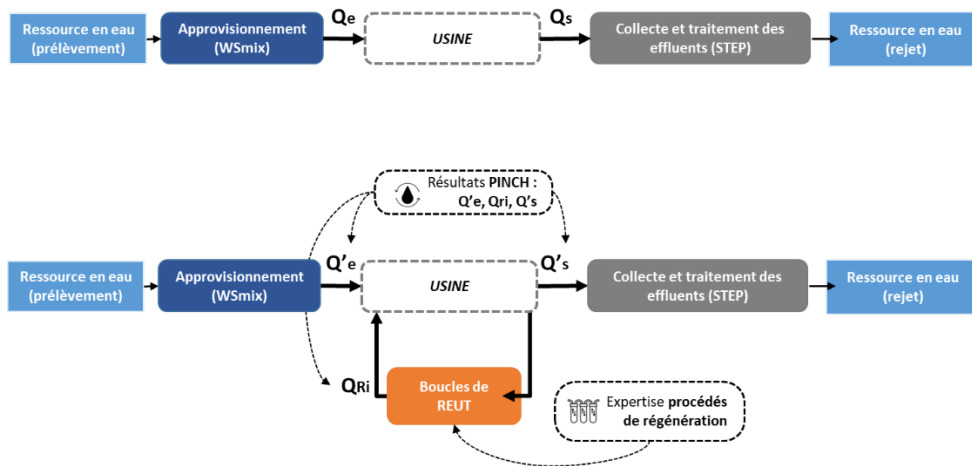


Figure 3 – Périmètre des systèmes étudiés : scénario de référence (haut) et scénario REUT (bas).

2.3. Architecture des bases de données

Les bases de données du calculateur PEAC alimentent l’onglet de saisie des scénarios avec les « briques élémentaires » permettant leur modélisation. En tout, 6 onglets de BDD sont à disposition de l’utilisateur :

- **BDD WSmix** : il s’agit du niveau principal de la BDD WSmix, qui contient des mix d’approvisionnement en eau (WSmix). Ces mix sont des assemblages de mix de ressource en eau (WOmix), de traitements de l’eau et de distribution.
- **BDD WSmix niv-1** : cette base de données contient les éléments constituant un WSmix : des mix d’approvisionnement en eau, des technologies de traitement de l’eau et des éléments de caractérisation du réseau de distribution.
- **BDD REUT** : base de données de solutions de régénération constituées d’une ou plusieurs technologies de traitement combinées.
- **BDD REUT niv-1** : ensemble des technologies proposées pour constituer les traitements de REUT, ainsi que les éléments relatifs à la distribution (réseau) des effluents de REUT et leur stockage.
- **BDD STEP** : base de données de filières de traitement des effluents d’usine (STEP), plusieurs dimensionnements sont disponibles. Cette base de donnée ne contient aucun élément personnalisable.
- **BDD ressource en eau** : contient les différentes ressources en eau disponibles et personnalisables (stress hydrique).

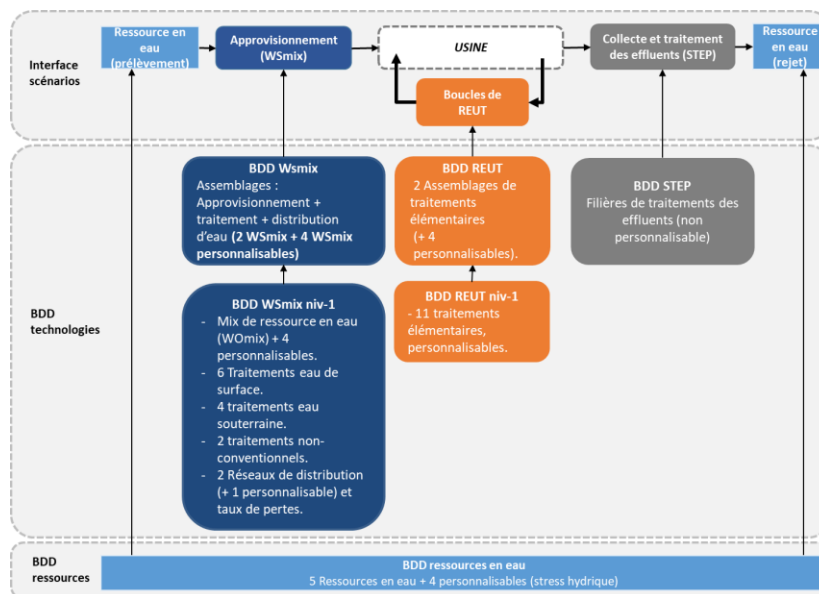


Figure 4 – Architecture des bases de données de PEAC.

2.4. Parcours de l'utilisateur

Le parcours d'un utilisateur de l'outil PEAC se compose de deux à trois étapes :

1. **Modéliser les scénarios** : dans l'onglet Interface scénario, saisir les paramètres globaux et sélectionner les éléments composants les deux systèmes.
2. **Facultatif – Parcourir et enrichir les BDD** : au besoin, parcourir les BDD pour consulter la modélisation des éléments de constitution des systèmes et/ou enrichir les BDD en créant des éléments personnalisés.

Il peut y avoir une itération entre ces deux étapes, ex. : consulter les BDD, modéliser les scénarios puis personnaliser un élément d'une BDD et enfin l'intégrer dans la modélisation d'un scénario.

3. **Afficher et interpréter les résultats** : les résultats d'ACV et d'empreinte eau sont directement affichés dans les onglets correspondants, en fonction de la saisie des données de modélisation de l'onglet interface scénarios.

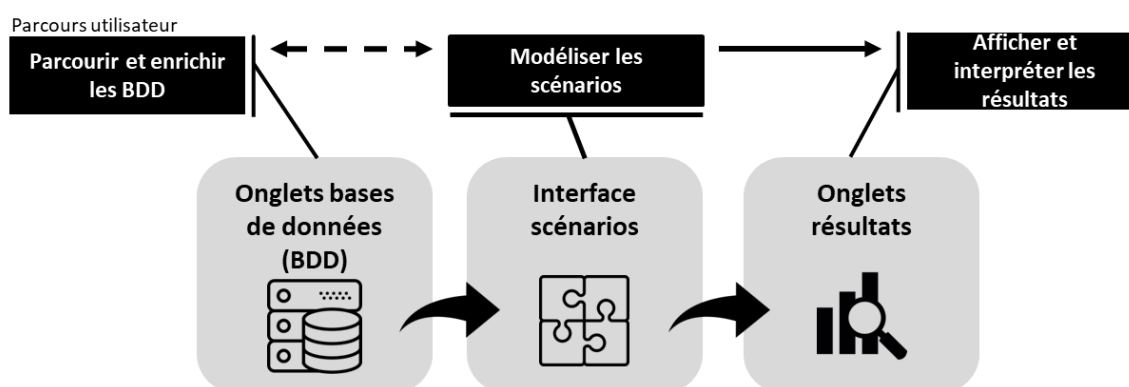


Figure 5 – Parcours de l'utilisateur dans l'outil PEAC

3. Parcourir et enrichir les BDD

Les onglets BDD ont deux fonctions pour l'utilisateur : **consulter les informations concernant les procédés** (briques élémentaires) composant les scénarios ou **modifier et personnaliser un procédé**.

3.1. BDD WSmix

L'approvisionnement en eau de l'usine est modélisé en sélectionnant un mix d'approvisionnement en eau (Water Supply Mix : WSmix, modèle issu de Leão et al. 2018). Le principe de ce modèle est semblable au mix électrique mais appliqué au domaine de l'approvisionnement en eau d'un usager, ici industriel.

Le WSmix est constitué de 3 composantes principales (voir Figure 6):

- **Un mix de ressources en eau (WOMix)** : mix local caractérisant l'origine de l'eau : souterraine, surfacique ou non-conventionnelle (eau de mer).
- **Un traitement de l'eau pour chaque type de ressource.**
- **Un réseau de distribution** de l'eau potable et son taux de pertes associé.

La nature du mix électrique caractérise aussi chaque WSmix.

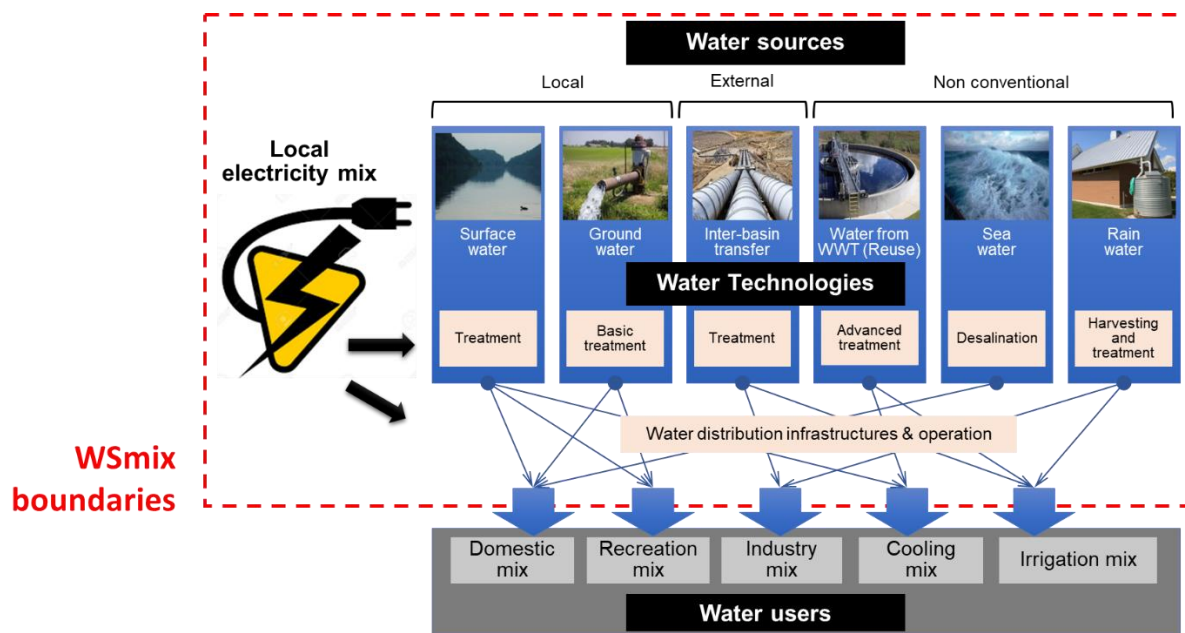


Figure 6 – Schéma de présentation du modèle WSmix. Source : Leao et al. 2018.

3.1.1. BDD WSmix niv-1

Il est possible de consulter le détail des éléments constituant le WSmix (par exemple pour connaître les taux de répartition des ressources en eau dans un WOMix) et d'en modifier/personnaliser certains.

Mix de ressource en eau (WOMix)

- 73 mix de ressources en eau sont disponibles, à l'échelle nationale, bassin-versant et sous-bassin versant pour un usage public (réseau potable public) ou industriel.
- 4 WOMix personnalisables sont disponibles, ils peuvent être renommés et la répartition de l'origine de l'eau (Surface/Souterraine/Non-conventionnelle) renseignée.

Traitements de l'eau

Les principales filières de traitement d'eau potable (et eau industrielle) sont proposées et ne sont pas personnalisables. Les données sont adaptées d'Ecoinvent v3.6.

Pour chaque traitement, il est possible de consulter la valeur de la consommation énergétique [kWh/m³] ainsi que le taux de récupération de la technologie (ou filière). Il est défini comme le taux

d'eau propre produite pour un m3 d'eau à traiter en entrée [m3/m3 ou %]. Il comprend les pertes en eau dans le procédé (concentrats, évaporation, etc.) ainsi que les besoins en eau de rinçage.

Tous les traitements prennent en compte le pompage jusqu'en sortie de traitement et la mise en pression nécessaire à l'entrée du réseau de distribution.

Réseau

Deux types de réseau de distribution de l'eau sont disponibles : le réseau d'eau potable public en France et un réseau d'approvisionnement local. Il est également possible de personnaliser un réseau local en renseignant une distance de réseau ou une consommation d'énergie de pompage par m3.

Taux de pertes du réseau

Il correspond à la quantité d'eau perdue lors de la distribution de l'eau dans le réseau. On considère que cette eau perdue est restituée au milieu local (percolation).

3.1. BDD REUT

Les boucles de REUT sont caractérisées par trois éléments :

- **La solution de régénération** (combinaison de technologies de traitement visant à épurer l'effluent pour son nouvel usage) ;
- **Le réseau de distribution** (de l'effluent régénéré – ou non – jusqu'à son nouvel usage)
- **L'infrastructure de stockage** éventuel ;

Ces trois caractéristiques sont à saisir dans l'interface de modélisation des scénarios pour chaque boucle de REUT.

La BDD REUT détaille la composition des solutions de régénération proposées et permet d'en personnaliser jusqu'à 4. Chaque solution de régénération peut être composée de 1 à 10 technologies de traitement combinées. Un mix électrique caractérise aussi chaque solution de régénération.

3.1.1. BDD REUT niv-1

Technologies de traitement

Les principales technologies de régénération utilisées pour la REUT d'effluents d'industrie agroalimentaire sont proposés (prétraitements, désinfections, filtrations membranaires). Leur données d'inventaire (consommation énergétique, intrants et taux de récupération) sont basées sur une revue bibliographique (voir sources dans le calculateur).

Il est possible de personnaliser chaque technologie en ajustant les données d'inventaire ou de créer un nouveau procédé de traitement (« Traitement personnalisé »).

Tableau 1 – Technologies de traitement proposées dans la BDD REUT niv-1 pour la composition de solutions de régénération.

Prétraitements	Coagulation - floculation
	Filtre à sable
	Filtre à tambour rotatif
Désinfections	Traitement UV
	Désinfection par chloration
Filtrations membranaires	Microfiltration
	Ultrafiltration
	Osmose inverse

Les infrastructures des traitements de régénération sont presque toujours négligeables, sauf dans le cas des traitements membranaires où les membranes sont prises en compte, et contribuent à moins de 1% des impacts totaux/m³ (Single score EF v3).

Réseau de distribution

Deux réseaux de distribution de l'effluent traité vers son nouvel usage sont proposés (infrastructure + énergie de pompage) :

- Un réseau moyen de REUT sur une même opération (recyclage d'un effluent pour une réutilisation sur un même usage) ;
- Un réseau moyen de REUT sur une autre opération (recyclage d'un effluent pour une réutilisation sur un usage différent au sein de l'usine).

Il est aussi possible de créer un réseau de distribution personnalisé en renseignant les paramètres principaux de son infrastructure (longueur du réseau, diamètre des canalisations et nombre de coudes). Par défaut le réseau est modélisé avec des tuyaux en inox. L'énergie de pompage est calculée automatiquement en fonction des pertes de charges estimées et du débit de l'effluent traité.

Stockage de l'effluent

Plusieurs infrastructures de stockage (cuves et citernes) sont proposées afin de modéliser le stockage éventuel de l'effluent de chaque boucle de REUT. Des cuves de 10 à 60 m³ sont disponibles, en acier, PE ou inox, et pour chacune d'entre elle un socle béton est prévu.

Une infrastructure de stockage personnalisée peut être créée en renseignant les poids des matériaux utilisés pour sa construction.

3.2. BDD STEP

Les tableaux suivants contiennent le détail de la modélisation des différentes filières de traitement des eaux usées (STEP).

Tableau 2 - Caractéristiques de la filière STEP par lagunage. Source : WASABI, modèle théorique.

	Filière eau	Infrastructure filière eau	Filière boues
Lagunage 1 600 EH	Traitement par lagunage aéré	Deux lagunes en série. 1ère lagune : 1920 m ² , hauteur d'eau 3 m ; 2ème lagune : 960 m ² , hauteur d'eau 2 m. La filière comporte un dégrilleur automatique, une cloison siphonée en entrée de la première lagune, 5 aérateurs de surface (+ dalles anti-affouillement) et des dispositifs de mesure de débits en entrée et en sortie. Les lagunes sont étanchéifiées par géomembrane et disposent de canalisations de by-pass	Traitement simultané à celui des eaux usées (dépôt au fond de la 2ème lagune). L'extraction des boues (pompage) est réalisée tous les 2 ans. La siccité finale des boues est de 5 %.

Tableau 3- Caractéristiques des filières STEP par filtres plantés de roseaux. Source : WASABI, modèle théorique.

	Filière eau	Infrastructure filière eau	Filière boues
Filtres plantés de roseaux 8 00 EH	Traitement par filtres plantés de roseaux à écoulement vertical et à deux étages.	1er étage de filtres : 3 lits en parallèle (1152 m ²), hauteur du massif filtrant 50 cm, garnissage graviers ; 2ème étage de filtres : 2 lits en parallèle (768 m ²), hauteur du massif filtrant 50 cm, garnissage graviers (20 cm) et sable (30 cm). La filière comporte un dégrilleur automatique, un déversoir d'orage, une bache de stockage en amont de chaque étage, des siphons auto-amorçants pour l'alimentation des filtres par bâchées, des rampes de distribution des effluents à la surface des filtres, des drains de récupération des percolats et des dispositifs de mesure de débit en entrée et en sortie. Les filtres sont étanchéifiées par géomembrane.	Traitement simultané à celui des eaux usées (dépôt sur les filtres du 1er étage). Le curage des boues est

Filtres plantés de roseaux 1 600 EH	1er étage de filtres : 3 lits en parallèle (2304 m ²), hauteur du massif filtrant 50 cm, garnissage graviers ; 2ème étage de filtres : 2 lits en parallèle (1536 m ²), hauteur du massif filtrant 50 cm, garnissage graviers (20 cm) et sable (30 cm). La filière comporte un dégrilleur automatique, un déversoir d'orage, une bache de stockage en amont de chaque étage, des siphons auto-amorçants pour l'alimentation des filtres par bâchées, des rampes de distribution des effluents à la surface des filtres, des drains de récupération des percolats et des dispositifs de mesure de débit en entrée et en sortie. Les filtres sont étanchéifiés par géomembrane.	réalisé tous les 10 ans. La siccité finale des boues est de 25 %.
Filtres plantés de roseaux 2 500 EH	1er étage de filtres : 3 lits en parallèle (3600 m ²), hauteur du massif filtrant 50 cm, garnissage graviers ; 2ème étage de filtres : 2 lits en parallèle (2400 m ²), hauteur du massif filtrant 50 cm, garnissage graviers (20 cm) et sable (30 cm). La filière comporte un dégrilleur automatique, un déversoir d'orage, une bache de stockage en amont de chaque étage, des pompes pour l'alimentation des filtres par bâchées, des rampes de distribution des effluents à la surface des filtres, des drains de récupération des percolats et des dispositifs de mesure de débit en entrée et en sortie. Les filtres sont étanchéifiés par géomembrane.	

Tableau 4 – Caractéristiques des filières STEP par boues activées. Source : WASABI, modèle basé sur une station réelle concernant l'infrastructure, les consommations de réactifs et d'électricité et la production de boues.

	Filière eau	Infrastructure filière eau	Filière boues	Infrastructure filière boues
Boues activées 1 500 EH	Traitement par boues activées en aération prolongée, sans déphosphatation physico-chimique.	Poste de relevage, prétraitements (dégrilleur, dessableur, dégraisseur), bassin d'aération, clarificateur, poste de recirculation des boues et poste toutes eaux.	Traitement par lits de séchage de boues plantés de roseaux. Le curage des boues est réalisé tous les 5 ans environ. La siccité finale des boues est de 30 %.	Lits de séchage (602 m ² , hauteur du massif filtrant 0,5 m, garnissage graviers et sable), drains pour la récupération des percolats, étanchéification par géomembrane.
Boues activées 5 200 EH	Traitement par boues activées en aération prolongée, avec déphosphatation physico-chimique (chlorure ferrique).		Épaississement par ajout de polymères et passage sur une grille d'égouttage, puis conditionnement par ajout de polymères et de chlorure ferrique avant déshydratation par filtre-pressé. La siccité finale des boues est de 27 %.	Grille d'égouttage, bache de stockage des boues épaissies, bache de maturation, filtre-pressé et convoyeur à vis pour l'évacuation des boues déshydratées.
Boues activées 11 000 EH	traitement par boues activées en aération prolongée, avec déphosphatation physico-chimique (sulfate d'aluminium).		Déshydratation par centrifugation (conditionnement polymère). La siccité finale des boues est de 25 %.	Centrifugeuse, convoyeur à vis pour l'évacuation des boues déshydratées.

Le dimensionnement de ces différentes filières se base sur l'équivalent suivant : 1 EH = 60 gDBO5/j.

Les filières boues activées moyennes de dimension 71 000 EH et 233 000 EH sont adaptées de procédés écoinvent v3.6.

3.3. BDD Ressources en eau

Afin de prendre en compte l'état de la ressource en eau locale (stress hydrique) dans l'empreinte eau des systèmes étudiés, plusieurs ressources en eau sont proposées :

- **Une ressource en eau moyenne France** (stress hydrique moyen national) ;
- **Une ressource en eau souterraine moyenne France** (stress hydrique moyen national et épuisement de la ressource en eau en fonction du taux d'utilisation non renouvelable moyen français) ;
- **Une ressource en eau souterraine 100% non-renouvelable France** (stress hydrique moyen national et épuisement de la ressource eau – usage 100% non renouvelable).
- **Une ressource en eau d'une zone aride avec un indice de développement humain élevé** (pas d'impact sur la santé humaine) ;

- **Une ressource en eau d'une zone aride avec un indice de développement humain faible** (impact sur la santé humaine par privation d'eau).

Pour considérer les conditions hydriques locales du système étudié, il est préférable de personnaliser la ressource en eau (stress hydrique local). Il faut alors renseigner les valeurs des facteurs de caractérisation (CF en impact/m³ eau consommée).

3.3.1. Où chercher les valeurs de CF pour les méthodes WSI & AWARE

Les méthodes AWARE (Boulay et al. 2018) et WSI (Pfister et al. 2009) proposent des cartographies de leurs facteurs de caractérisation qui permettent de facilement trouver une valeur locale à l'échelle d'un sous bassin versant (voir section 5.2.2 pour la description des méthodes).

Liens pour les indicateurs AWARE et WSI

- **AWARE** : données téléchargeables sur le site WULCA (onglet « AWARE - download AWARE Factors ») : <https://wulca-waterlca.org/aware/download-aware-factors/>

Il est possible de télécharger un fond de carte pour le logiciel Google Earth ou un fichier Excel. Les données de facteurs sont alors renseignées à l'échelle annuelle et mensuelle au niveau des sous bassins versants.

- **WSI** : cartes WSI mensuels (Pfister 2012) et annuels (Pfister 2009) : <https://www.ethz.ch/content/specialinterest/baug/institute-ifu/esd/en/downloads/monthly-water-scarcity-assessment---water-footprinting.html>.

Il est possible de télécharger une carte générale combinant les valeurs annuelles et mensuelles à l'échelle des sous bassins versant. Cette carte peut être utilisée avec le logiciel Google Earth. Il est également possible de visualiser les valeurs des facteurs WSI sur une carte en ligne : <https://esdmaps.ethz.ch/>.

Des explications pratiques en Annexe 1 précisent quelles valeurs sélectionner dans les tables de cartographies pour les facteurs AWARE et WSI.

3.3.2. Comment renseigner les CF pour les méthodes ReCiPe et EF.

Les facteurs de caractérisation des méthodes ReCiPe et EF ne sont disponibles qu'à l'échelle annuelle et nationale. Lorsqu'une ressource en eau personnalisée est créée nous recommandons de recopier les valeurs de facteurs d'une des 5 ressources disponibles pour les méthodes ReCiPe et EF en fonction de l'état du stress hydrique (moyenne France ou Aride), de l'origine de la ressource (moyenne, souterraine, souterraine non renouvelable) et de l'indice de développement humain.

4. Modéliser les scénarios

4.1. Interface utilisateur

L'interface utilisateur permet de modéliser les deux scénarios (référence et REUT) en trois étapes :

1. Saisie des paramètres globaux :

- a. Nature de la ressource en eau : origine et type d'approvisionnement (WSmix).
- b. Localisation : continentale ou littorale (impact sur le bilan hydrique des systèmes).
Dans le cas continental on considère que les eaux usées traitées (sortie de STEP) sont rejetées dans le milieu et le recharge. A l'inverse, en zone littorale elles sont rejetées dans la mer et ne rechargent donc pas le milieu.
- c. La filière de traitement des effluents de l'usine (STEP).

- d. Le débit d'eau consommée au sein de l'usine (incorporée dans un produit et/ou évaporée), cette saisie est facultative.
- e. Le débit d'eau apportée au sein de l'usine (eau provenant d'un produit, par extraction ou concentration par exemple), cette saisie est facultative.

NB : L'origine de l'eau apportée au sein de l'usine par les produits n'est pas prise en compte dans l'empreinte eau des systèmes modélisés. En effet, l'impact du stress hydrique de la ressource en eau primaire (d'où provient l'eau dite « apportée ») n'est donc pas calculé. Ce flux d'eau est uniquement renseigné afin d'équilibrer le bilan hydrique des deux scénarios (référence et REUT).

2. Saisie du bilan hydrique du scénario de référence :

- a. Débit de besoin en eau en entrée de l'usine (donnée de référence, fonctionnement actuel).

3. Saisie des caractéristiques du scénario de REUT :

- a. Débit de besoin en eau en entrée de l'usine (donnée issue d'une étude PINCH) ;
Pour chaque boucle de REUT :
- b. Débit de l'effluent (données issue d'une étude PINCH) ;
- c. Nature du stockage éventuel;
- d. Type de réseau de distribution de l'effluent.

4.2. Données PINCH

Les données issues d'une étude PINCH nécessaires à la modélisation des scénarios étudiés dans PEAC sont :

- Le débit d'entrée de l'usine (besoins en eau) du scénario de référence ;
- Le débit d'entrée de l'usine (besoins en eau) du scénario de REUT ;
- Le débit d'effluent de chaque boucle de REUT.

5. Résultats d'ACV & Empreinte eau

5.1. Impacts et dommages environnementaux

La démarche de l'ACV est d'inventorier toutes les substances émises et les ressources consommées d'un système puis de transformer ces flux en impacts potentiels sur l'environnement. **Afin de mieux cadrer l'évaluation des impacts environnementaux, l'ACV propose deux approches : l'une orientée « impacts potentiels » et l'autre orientée « dommages potentiels ».** La première quantifie les modifications opérées sur l'environnement sans préjuger de leurs effets, la seconde quantifie les dommages potentiels qui en résultent (sur la santé humaine, les écosystèmes et les ressources naturelles). La figure ci-dessous illustre sur deux exemples les chaînes de causes à effets qui lient les indicateurs d'impacts aux indicateurs de dommages.

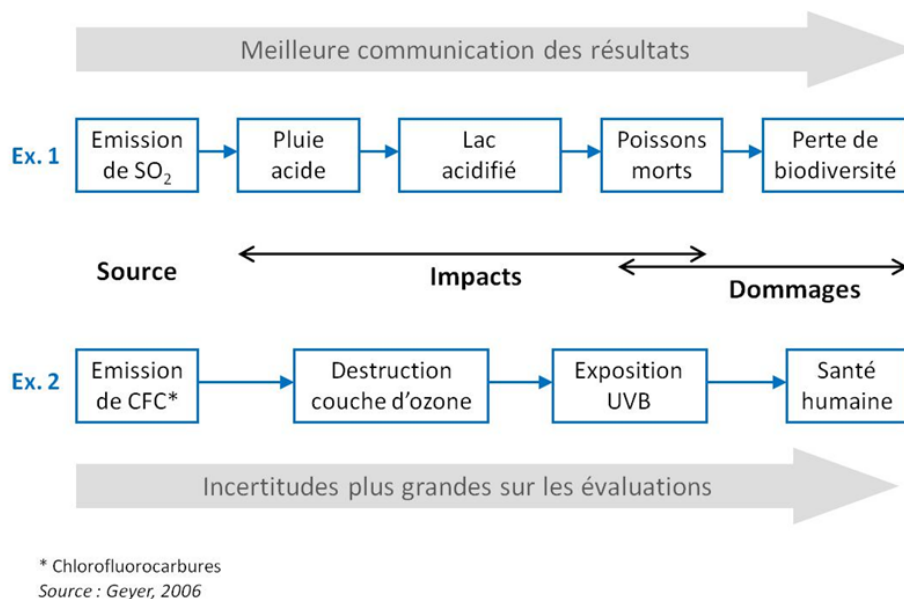


Figure 7 - Illustration des approches orientées "impacts" et "dommages" en ACV. Source : ACV4E, Guérin-Schneider et Roux 2018.

Les deux approches sont complémentaires comme le montre l'analyse de leurs avantages et inconvénients.

	Avantages	Inconvénients
Approche orientée « impacts »	Indicateurs robustes et consensuels Analyse fine des résultats	Interprétation difficile : indicateurs nombreux et significations parfois abstraites
Approche orientée « dommages »	Interprétation facilitée : trois indicateurs compréhensibles par tous	Indicateurs incertains et moins consensuels

5.2. Méthodes

Plusieurs méthodes ACV sont utilisées dans l'outil PEAC, afin de couvrir les deux approches orientées « impacts » et « dommages ».

	Impacts (midpoint)	Dommages (endpoint)
ACV	La méthode EF (Fazio et al. 2018) est choisie pour les résultats d'ACV au niveau « midpoint ou impacts » car il s'agit d'une méthode consensuelle recommandée par la commission européenne.	la méthode ReCiPe 2016 (Huijbregts et al. 2016) est proposée pour les résultats au niveau « endpoint ou dommages ». C'est une méthode très largement utilisée en ACV. De plus, elle permet de prendre en compte le nexus eau-énergie de la REUT dans les indicateurs de dommages.
Empreinte eau	Les deux méthodes les plus utilisées pour l'empreinte eau WSI (Pfister et al. 2009) et AWARE (Boulay et al. 2018) sont utilisées pour les résultats d'empreinte eau monocritère (impacts de la privation d'eau).	

5.2.1.Méthodes ACV

EF 3.0 (Fazio et al. 2018)

La méthode EF est la méthode d'évaluation d'impact de l'Empreinte Environnementale (EF), initiative introduite par la Commission Européenne. La méthode « EF 3.0 adapted » est une version adaptée compatible avec les bases de données du logiciel d'ACV SimaPro. Cette méthode propose 16 indicateurs au niveau midpoint :

Catégorie d'impact	Indicateur	Unité
Changement climatique	Modification durable du climat (potentiel de réchauffement climatique sur 100 ans) causée notamment par les gaz à effet de serre (ex : dioxyde de carbone) émis par les activités humaines.	kg CO ₂ eq (dioxyde de carbone)
Destruction de la couche d'ozone	Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP) dans la stratosphère (partie haute de l'atmosphère), provoquée par les émissions d'halocarbures. La couche d'ozone est essentielle à la vie sur terre car elle protège les êtres vivants des rayonnements ultraviolets nocifs émis par le soleil.	kg CFC ₁₁ eq (chlorofluoro-carbure) ¹
Emissions toxiques pour l'homme, cancer	Unité de toxicité comparée pour l'homme (UTCh) exprimant l'augmentation estimée de la morbidité dans la population humaine totale par unité de masse d'un produit chimique émis (cas par kilogramme).	CTUh
Emissions toxiques pour l'homme, non-cancer		
Emissions de matières inorganiques respiratoires	Incidence de la maladie due à l'émission de kg de PM _{2,5} .	disease inc.
Rayonnement ionisant, santé humaine	Potentiel des rayonnements ionisants : quantification de l'impact des rayonnements ionisants sur la population, par rapport à l'uranium 235.	kBq ²³⁵ U eq (uranium)
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	Potentiel de création d'ozone photochimique (POCP) : expression de la contribution potentielle à la formation d'ozone photochimique.	kg NMVOC eq (composés organiques volatil non méthanique)
Acidification	Dépassement accumulé (AE) caractérisant l'évolution du dépassement de la charge critique de la zone sensible dans les écosystèmes terrestres et les principaux écosystèmes d'eau douce, dans lesquels se déposent des substances acidifiantes.	mol H ⁺ eq (ion hydrogène)
Eutrophisation terrestre	Dépassement accumulé (AE) caractérisant la variation du dépassement de la charge critique de la zone sensible, à laquelle se déposent des substances eutrophisantes.	mol N eq (azote)
Eutrophisation eau douce	Équivalents phosphore : Augmentation de la concentration en éléments nutritifs (ex : phosphates) dans l'eau entraînant la prolifération des algues et pouvant entraîner la disparition des autres organismes aquatiques par épuisement d'oxygène.	kg P eq (Phosphore)
Eutrophisation marine	Équivalents d'azote : augmentation de la concentration en éléments nutritifs (ex : nitrates) dans l'eau entraînant la prolifération des algues et pouvant entraîner la disparition des autres organismes aquatiques par épuisement d'oxygène.	kg N eq (azote)
Occupation des sols	Indice de qualité des sols	Pt
Ecotoxicité eau douce	Unité toxique comparative pour les écosystèmes (UTCe) exprimant une estimation de la fraction d'espèces potentiellement affectées (FAP) intégrée dans le temps et le volume par unité de masse d'un produit chimique émis (FAP m ³ an/kg).	CTUe
Privation d'eau	m ³ d'éq. eau privés	m ³ depriv.

¹ Chlorofluorocarbure : gaz organique dont tous les atomes d'hydrogène ont été substitués par des atomes de chlore et de fluor.

Utilisation des ressources, vecteurs énergétiques	Combustibles fossiles pour l'épuisement des ressources abiotiques (ADP-fossile) ; basé sur le pouvoir calorifique inférieur.	MJ
Utilisation des ressources, minéraux et métaux	Épuisement des ressources abiotiques (réserve ultime ADP).	kg Sb eq (Antimoine)

ReCiPe 2016 (Huijbregts et al. 2016)

ReCiPe 2016 est une méthode d'ACV globale, il s'agit de la version mise à jour et étendue de ReCiPe 2008. Comme la version précédente, ReCiPe 2016 inclut des catégories d'impact midpoint (impacts) et endpoint (dommages).

Au niveau midpoint, 18 catégories d'impact sont déployées :

1. *Changement climatique*
2. *Appauvrissement de l'ozone stratosphérique*
3. *Rayonnement ionisant*
4. *Formation de l'ozone, santé humaine*
5. *Formation de particules fines*
6. *Formation de l'ozone, écosystèmes terrestres*
7. *Acidification terrestre*
8. *Eutrophisation de l'eau douce*
9. *Eutrophisation marine*
10. *L'écotoxicité terrestre*
11. *Ecotoxicité en eau douce*
12. *Ecotoxicité marine*
13. *Toxicité cancérigène pour l'homme*
14. *Toxicité non cancérigène pour l'homme*
15. *Utilisation des sols*
16. *Pénurie de ressources minérales*
17. *Pénurie de ressources fossiles*
18. *Utilisation de l'eau (bilan hydrique : eau consommée = eau prélevée – eau rejetée).*

Au niveau endpoint, la plupart de ces catégories d'impact midpoint sont multipliées par des facteurs de dommage (voir Figure 8) et regroupées en trois catégories de dommages endpoint présentées dans le Tableau 5.

Tableau 5 - Indicateurs Endpoint de la méthode ReCiPe 2016.

Indicateur	Unité	Description
Santé humaine (vies perdues)	DALY (Disability Adjusted Life Years) ²	Dommages sur la santé humaine.
Ecosystèmes (extinction d'espèces)	Species.yr ³	Dommages sur l'environnement et la biodiversité.
Epuisement des ressources naturelles (coût généré)	\$	Epuisement des ressources naturelles non renouvelables (pétrole, charbon, minéraux, etc.).

² Nombre d'années de vie perdues ou altérées par une maladie.

³ Nombre d'espèces disparues pendant une année.

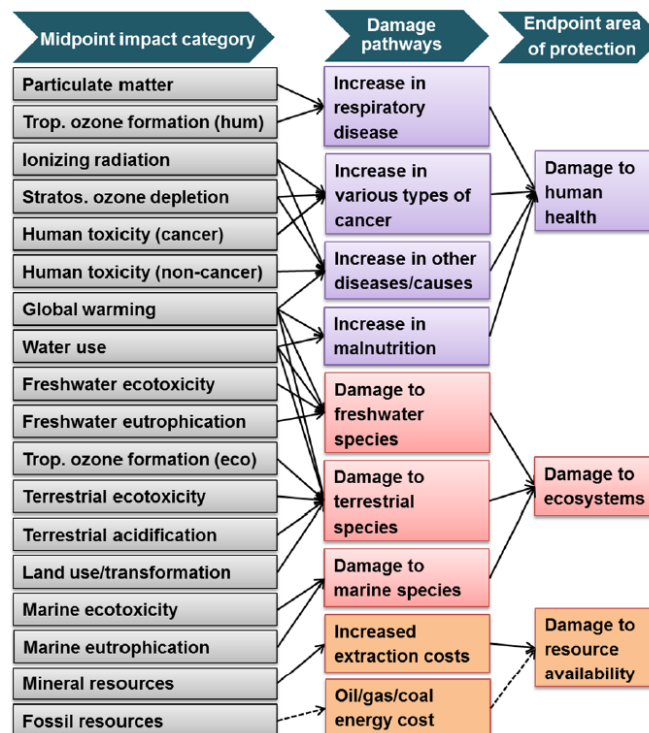


Figure 8 - Représentation des relations entre les catégories d'impact, midpoint, et les zones de protections (endpoint) de la méthode ReCiPe (source : Huijbregts et al. 2017).

Comme ReCiPe 2016 ne fournit pas l'évaluation des impacts de la privation d'eau douce sur l'épuisement des ressources en eau, l'indicateur « Ressources » de la méthode "Pfister et al 2010 (ReCiPe)" (Pfister et al. 2011) a été ajouté.

[Pfister et al. 2010 \(ReCiPe\)](#) (Pfister et al. 2011)

Cette méthode d'empreinte eau multicritère est basée sur la publication Pfister et al. 2011 et est basée sur les mêmes catégories orientées dommages (endpoint) que la méthode ReCiPe 2016. Elle évalue les impacts de la privation d'eau douce sur les trois aires de protection : Santé humaine, Écosystèmes et Ressources.

L'indicateur ressources est basé sur le coût excédentaire pour extraire un mètre cube d'eau supplémentaire (par désalinisation) lorsque que de l'eau souterraine est consommée de manière non renouvelable (prélèvement > renouvellement de la nappe ou nappe fossile).

5.2.2. Empreinte eau

Pour l'empreinte eau monocritère (quantitative) des systèmes étudiés, les deux méthodes les plus utilisées sont proposées : WSI (Pfister 2009) et AWARE. Ils évaluent les impacts de privation d'eau liés à la consommation d'eau par le système modélisé. Le bilan hydrique (eau consommée = eau prélevée - eau rejetée) est multiplié par un facteur de caractérisation spécifique au stress hydrique du lieu où l'eau est consommée. Les facteurs WSI et AWARE sont donc déclinés à différents niveaux de spatialité (pays/sous bassin versant) et de temporalité (annuels/mensuels), voir section 3.3.1.

[Pfister 2009 WSI](#) (Pfister et al. 2009)

Il s'agit d'une méthode d'empreinte eau très largement utilisée ces dernières années et encore d'actualité.

Le WSI (Water Stress Index) est un indicateur d'impact développé par Pfister et al. en 2009 se basant sur l'indicateur WTA (Water To Availability). Cet indicateur représente la quantité d'eau prélevée par les usagers d'une ressource par rapport à la quantité d'eau disponible dans cette ressource (valeur entre 0 et 1) :

$$WSI = \frac{WU}{WA}$$

Avec:

WTA : Water To Availability (m^3/m^3)

WU : volumes d'eau prélevés par les usages: agriculture, industrie, domestique (Water Use),

WA : volume d'eau douce disponible dans la ressource (Water Availability)

Il est modélisé à l'aide d'une fonction logistique (courbe en S) afin d'ajuster l'indicateur résultant à des valeurs comprises entre 0,01 et 1 m^3 privé/ m^3 consommé. La courbe est ajustée à l'aide des seuils de stress hydrique de l'OCDE, qui définissent les stress hydriques modéré et sévère à 20 % et 40 % des prélèvements, respectivement. Les données relatives aux prélèvements et à la disponibilité de l'eau ont été obtenues à partir du modèle WaterGap. L'indicateur est appliqué au volume d'eau consommé et évalue uniquement les impacts qualitatifs liés à la consommation d'eau (empreinte eau monocritère).

Cet indicateur qui peut être régionalisé (WTA relatif à un bassin versant) et mensualisé (WTA variant avec les saisons en fonction de la disponibilité en eau). Par ailleurs, cet indicateur permet de traduire des impacts potentiels (niveau midpoint), mais également des dommages potentiels (niveau endpoint) sur les 3 aires de protection de la Santé Humaine (dans les pays pauvres où la privation d'eau entraîne de la malnutrition), des Ecosystèmes et des Ressources (au niveau endpoint, les facteurs de caractérisations sont annuels, et pas mensuels).

Le WSI est utilisé dans PEAC pour le calcul d'empreinte eau mais également pour l'indicateur Ressources de la méthode Pfister et al. 2011 ajouté à la méthode ReCiPe (ACV).

AWARE (Boulay et al. 2018)

La méthode AWARE (Available WATER REmaining) a été développée en 2015 par le groupe de travail WULCA. Il s'agit de la méthode d'empreinte eau la plus consensuelle, recommandée par la commission européenne (PEF-EF) et l'UNEP-Setac. L'une des avancées importantes de cette méthode est la prise en compte régionalisée des besoins en eau minimum des écosystèmes (Pastor et al. 2013).

AWARE est un indicateur régionalisé de privation d'eau qui représente l'eau disponible restante par zone dans un bassin versant après que la demande des usages (humains et écosystèmes aquatiques) ait été satisfaite. Il évalue le potentiel de privation d'eau, pour les humains ou les écosystèmes, en partant de l'hypothèse que moins il reste d'eau disponible par zone, plus il est probable qu'un autre utilisateur en soit privé. Il est d'abord calculé comme la disponibilité en eau moins la demande (AMD : Availability minus Demand) des humains et des écosystèmes aquatiques et est relative à la zone ($m^3/m^2.mois$). Dans un deuxième temps, la valeur est pondérée par rapport à la moyenne mondiale (AMD mondiale = $0,0136m^3/m^2.mois$) et inversée. Le résultat (eau inutilisée) représente la valeur relative par rapport au m^3 moyen consommé dans le monde (la moyenne mondiale est calculée comme une moyenne pondérée par la consommation).

$$AWARE = Consommation\ d'eau \times \frac{1}{Eau\ inutilisée}$$

Avec :

AWARE : indicateur de la privation d'eau (m^3 world eq.)

Consommation d'eau : volume d'eau consommée dans la région i (m³)

Eau inutilisée : eau restante après prélèvement par l'écosystème de ses besoins vitaux en eau. Valeur pondérée par la valeur moyenne mondiale = $AMD_i / AMD_{mondiale}$ (m³region / m³world eq.)

L'indicateur est limité à une gamme de 0,1 à 100, avec une valeur de 1 correspondant à la moyenne mondiale, et une valeur de 10, par exemple, représentant une région où il reste 10 fois moins d'eau disponible par zone que la moyenne mondiale. De la même manière que pour le WSI, l'indicateur AWARE est également régionalisé et mensualisé. Contrairement au WSI, il est disponible uniquement au niveau midpoint.

AWARE est utilisé dans PEAC comme une méthode de calcul seule pour l'empreinte eau, mais également dans la méthode EF proposée au niveau midpoint.

5.3. Afficher et interpréter les résultats

Les trois onglets Résultats permettent de visualiser les impacts environnementaux (ACV et Empreinte eau) des deux systèmes modélisés sous forme de barres graphs ou de récupérer les valeurs numériques des impacts dans des tableaux récapitulatifs.

5.3.1. Comment lire ce type de graphique ?

Pour chaque impact (ou dommage) en ordonnées, deux barres représentent les impacts du scénario de référence (en haut) et du scénario de REUT (en bas). Le scénario le plus impactant est placé à 100 % et l'autre scénario pondéré proportionnellement.

Chaque barre représente un impact (ou dommage) et est divisée en quatre parties représentant les parts des impacts des étapes du système (voir légende en dessous du graphique). La contribution de chaque étape par rapport au total de l'impact considéré est évaluée en pourcentage sur l'axe des abscisses. La somme des contributions des étapes est donc égale à 100 % pour chaque impact.

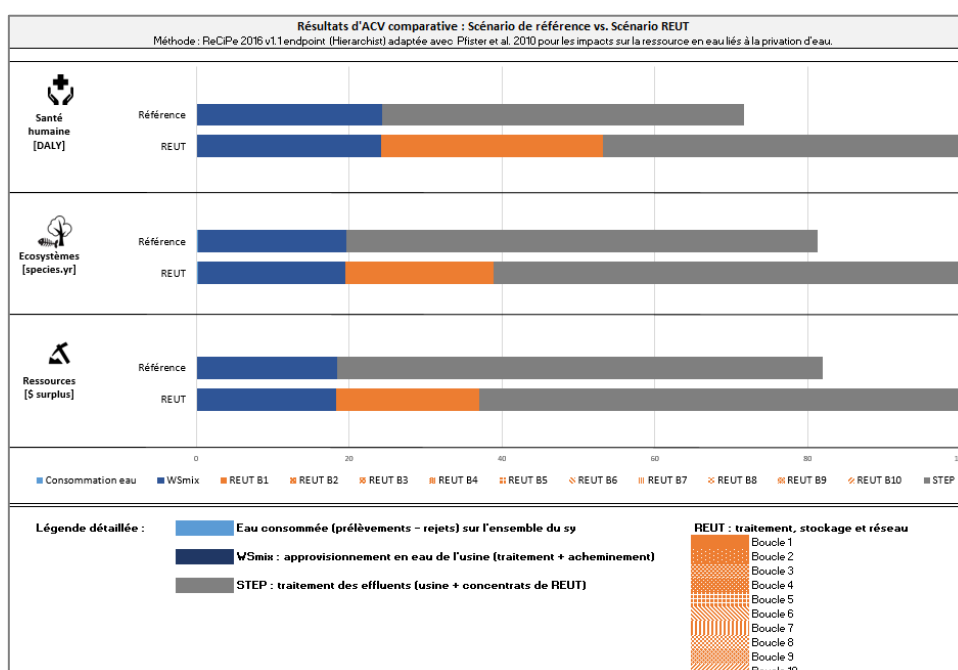


Figure 9 – Exemple de graphique de résultats avec la méthode ReCiPe 2016 adaptée.

Exemple ci-dessus : l'impact potentiel du scénario de référence sur la santé humaine est dû à 24 % à l'approvisionnement en eau (WSmix), et à 47 % au traitements des effluents (STEP).

Chaque impact/dommage ayant sa propre unité (voir les tableaux de la section 5.2), la seule façon de pouvoir tous les représenter sur un même graphique est d'utiliser une échelle en pourcentages. **Il n'est pas possible de comparer les impacts/dommages entre eux** (les unités étant différentes), autrement dit l'ACV ne peut pas identifier des impacts plus graves que d'autres.

5.3.2. Comment interpréter ce type de graphique ?

Un scénario est strictement meilleur qu'un autre si tous ses impacts (ou dommages) sont significativement inférieurs à ceux de l'autre. Les contributions de chaque étape peuvent permettre d'identifier des améliorations possibles dans chaque scénario.

Les valeurs absolues des résultats et leurs ordres de grandeur sont disponibles dans les tableaux récapitulatifs.

Remarque sur les bénéfices de la REUT et la contribution du traitement des effluents (étape STEP) :

Les impacts liés au traitement des effluents de l'usine sont modélisés proportionnellement au volume d'eaux usées traités (impacts/m³). La REUT, permettant de réduire le débit d'effluents d'usine (mais pas la charge totale de contaminants, qui se retrouve au contraire plus concentrés dans les eaux usées + concentrats de traitement) génère donc un bénéfice (moins d'impact environnemental) sur cette étape. Or, de manière conventionnelle, les impacts environnementaux liés au traitement d'un effluent sont modélisés de manière proportionnelle à la charge traitée (par EH ou kgDBO₅ par exemple). En effet, le fonctionnement (intrants, consommation énergétique, etc.) d'une STEP conventionnelle va varier avec la charge de polluants à épurer.

Ainsi, dans notre modélisation, les impacts évités (bénéfice) liés au traitement des effluents d'usine dans les scénarios de REUT sont en partie erronés. D'une part car les impacts totaux de la STEP sont modélisés par m³ d'eau traitée et ne prennent donc pas en compte la charge de l'effluent. D'autre part car ces impacts englobent à la fois le fonctionnement de la STEP et son infrastructure (qui ne devrait pas varier avec une économie de volume traité). Cependant, bien que le bénéfice lié à une « économie d'infrastructure de STEP » grâce à la REUT soit faux, il est largement négligeable par rapport aux impacts de fonctionnement de la STEP.

5.4. ACV comparative et aide à la décision multicritère

Identifier le meilleur scénario d'un point de vue environnemental est souvent complexe en raison du grand nombre d'indicateurs environnementaux à prendre en compte (dans la méthode EF midpoint pour l'outil PEAC). Afin de simplifier les comparaisons de scénarios et d'essayer d'aboutir à un choix, nous proposons de guider l'utilisateur à travers une procédure d'analyse des résultats (Guérin-Schneider et al. 2018).

Cette procédure consiste en une succession de critères d'analyse permettant de supprimer progressivement des catégories d'impacts et d'aboutir à une décision.

Fonctionnement : Si l'utilisateur ne peut pas conclure à une étape, il passe à l'étape suivante et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il puisse conclure ou jusqu'à la fin de la procédure si aucune conclusion n'est possible. Il est tout à fait possible que les scénarios étudiés ne soient pas départageables même à la fin de la procédure. Dans un contexte réel de choix d'investissement, il faut alors baser la décision sur d'autres critères (financiers, techniques, etc.).

Conseil : S'il est possible de conclure qu'un scénario est mieux qu'un autre aux étapes 1, 2 et 3, il est recommandé d'aller jusqu'à l'étape 4 pour vérifier ce résultat au niveau endpoint.

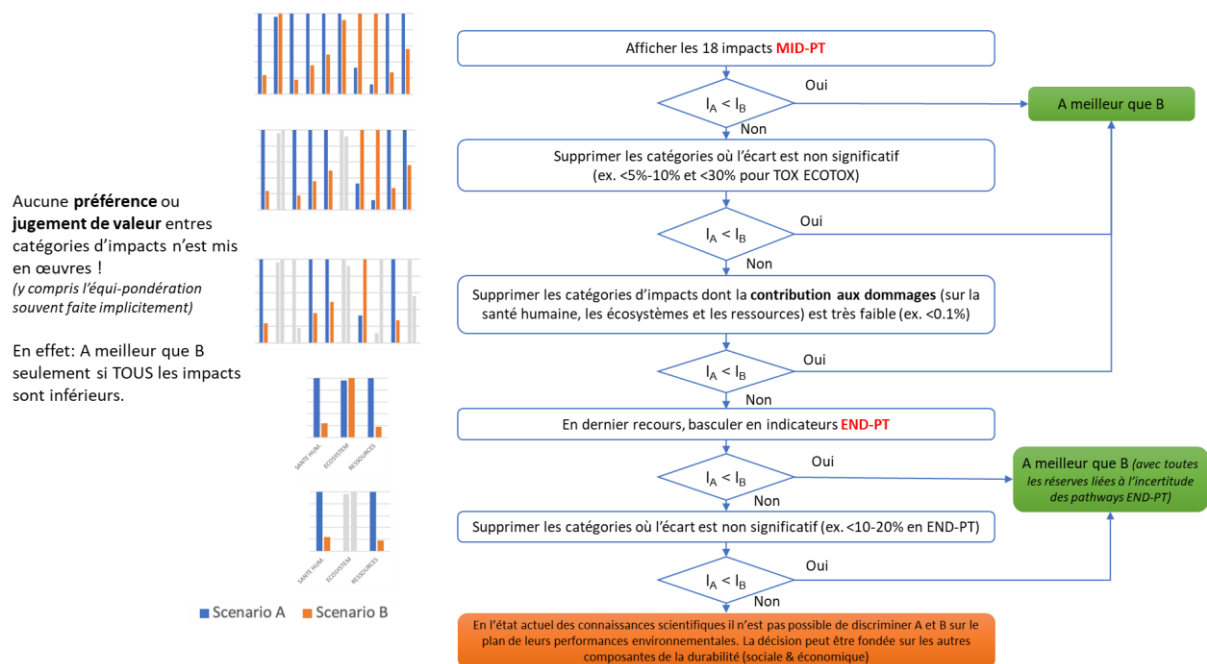


Figure 10 – Procédure d'aide à la décision pour une ACV comparative multicritère (Guérin-Schneider et al. 2018)

6. Exemple illustratif

Un exemple illustratif est proposé afin de détailler la démarche de modélisation, de saisie dans l'outil PEAC et d'analyse des résultats d'ACV et d'empreinte eau.

Il s'agit d'un exemple théorique de REUT au sein d'une industrie agroalimentaire située en France, en zone continentale.

6.1. Données d'entrée

6.1.1. Description de l'usine

Approvisionnement

Dans l'exemple étudié, l'usine est approvisionnée en eau potable du réseau public français. Le détail de l'origine de l'eau n'est pas connu (proportion eau souterraine et/ou de surface), ni la nature du traitement de potabilisation (un traitement conventionnel est considéré).

Traitement des effluents

Les effluents de l'usine sont traités dans une filière de boues activées de petite taille (5 200 EH).

Bilan hydrique

L'usine considérée est approvisionnée par un débit d'eau de 28 m³/h dont 1 m³/h sont consommés i.e. incorporés dans un produit et/ou évaporés. Il n'y a pas d'apport d'eau dans l'usine (issue d'un produit par exemple).

6.1.2. Scénario de REUT

Analyse PINCH-Eau

Une analyse PINCH Eau permet d'identifier un scénario de REUT réduisant le débit d'entrée de l'usine à 20 m³/h grâce à une optimisation des flux d'eau (plusieurs boucles de recyclage) comprenant une boucle de réutilisation de 5,5 m³/h avec traitement de régénération.

Tableau 6 - Bilan hydrique de l'exemple étudié

Donnée de consommation de l'usine / unité étudiée.	Scénario de référence	Débit d'entrée	28 m ³ /h
Données issues de PINCH-Eau	Scénario REUT	Débit d'entrée	20 m ³ /h
		Débit boucle avec traitement	5,5 m ³ /h

Régénération des effluents

L'analyse PINCH-Eau de l'exemple considéré propose une boucle de REUT avec régénération d'effluent permettant de réduire la charge de particules en suspension de 448 ppm à 35 ppm.

Le traitement de régénération identifié pour permettre d'atteindre cet objectif se compose des étapes suivantes : filtration par tamis rotatif, ultrafiltration, osmose inverse et désinfection UV.

6.2. Saisie dans l'interface

6.2.1. Paramètres globaux

Les paramètres globaux, communs aux deux scénarios sont saisis dans la section « Paramètres globaux » de l'onglet « Interface Scénarios ».

Les informations suivantes sont renseignées :

- Origine de la ressource en eau (mix d'origine de l'eau) : le mix moyen français est choisi car nous ne connaissons pas le détail de l'origine de l'eau dans notre exemple ;
- Approvisionnement en eau : le mix d'approvisionnement en eau potable publique Français est choisi car le détail du traitement de l'eau potable et de sa distribution ne sont pas connus ;
- Localisation : continentale ;
- Filière de traitement des effluents de l'usine (STEP) : la filière la plus représentative du traitement des effluents de l'usine est sélectionnée, il s'agit d'un traitement conventionnel par boues activées (5 200 EH).

Paramètres globaux			
	Origine	Approvisionnement en eau (WSmix)	
Ressource en eau	Eau moyenne France	WSmix Public France	
Localisation	Zone continentale		
			Traitement (STEP)
			Effluents de l'usine
			Boues activées 5 200 EH - climat tempéré

Figure 11 - Saisie des paramètres globaux.

6.2.2.Débits

Les débits des deux scénarios (référence et REUT) sont indiqués dans les sections correspondantes.

Scénario de référence		
	Débit entrée	
Entrée usine (Q _e)	28,000 m ³ /h	Débits de référence, fonctionnement habituel.
Sortie usine (Q _s)	27,000 m ³ /h	



Figure 12 – Saisie du débit entrant du scénario de référence.

Scénario REUT		
	Débit entrée	
Entrée usine (Q' _e)	20,000 m ³ /h	Débits obtenus par une simulation PINCH-Eau ou toute autre conception d'optimisation des flux d'eau dans l'usine.
Sortie usine (Q' _s)	19,000 m ³ /h	

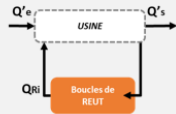


Figure 13 - Saisie du débit entrant du scénario de REUT.

De plus, la quantité d'eau consommée dans l'usine (constante dans les deux scénarios) est indiquée dans la section « Paramètres globaux ». Cette donnée permet de calculer le débit sortant de l'usine pour chaque scénario (débit sortant = débit entrant – eau consommée + apport d'eau).

Débit conso	
Consommation d'eau dans l'usine*	1,000 m ³ /h
Apport d'eau dans l'usine**	0,000 m ³ /h

*Par les procédés : évaporation ou incorporation dans un produit = Q_s-Q_e.
 **Par les procédés : eau issue des produits

Figure 14 - Saisie du débit d'eau consommée dans l'usine (si connu).

Enfin, le débit de la boucle de réutilisation est renseigné. Il s'agit bien du débit de sortie de la boucle de réutilisation (après traitement) qui doit être indiqué.

Débit effluent	
Boucle 1 (Q _{r1})	5,500 m ³ /h

Figure 15 - Saisie du débit sortant de la boucle de REUT.

6.2.3.Boucle de régénération

La boucle de REUT identifiée par le PINCH Eau comporte un traitement de régénération. Celui-ci va être créé en tant que traitement personnalisé « Régénération personnalisée ». Dans cet exemple la boucle de REUT concerne la régénération et la réutilisation d'un effluent au sein d'une même

opération de l'usine, le réseau additionnel choisi est donc « Réseau moyen reut sur même opération ». Il n'y a pas de stockage des effluents dans ce scénario, aucune infrastructure n'est sélectionnée.

	Débit effluent	Traitement (si recyclage)	Réseau	Stockage
Boucle 1 (Qr1)	5,500 m3/h	Régénération personnalisée 1	Réseau moyen reut sur même opération	

Figure 16 – Saisie des caractéristiques (traitement, réseau, stockage) d'une boucle de REUT.

Le traitement de régénération personnalisé doit être renseigné dans l'onglet « BDD REUT ». La ligne « régénération personnalisée » est remplie afin d'assembler toutes les étapes de traitement nécessaires à la régénération de l'effluent, et en choisissant un mix électrique.

	Traitement 1	Traitement 2	Traitement 3	Traitement 4	Traitement 5	Mix électrique
Régénération modérée	Coagulation-floculation (moyen)	Filtre à sable (moyen)	Traitement UV (moyen)			Mix électrique Français
Régénération intensive	Coagulation-floculation (moyen)	Filtre à sable (moyen)	Microfiltration (moyen)	Osiose inverse (moyen)	Traitement UV (moyen)	Mix électrique Français
Régénération personnalisée 1	Filtre à tambour rotatif (moyen)	Ultrafiltration (moyen)	Osiose inverse (moyen)	Traitement UV (moyen)		Mix électrique Français

Figure 17 – Création d'un traitement de régénération personnalisé.

Dans cet exemple, les données de fonctionnement des traitements choisis (intrants, consommation énergétique, etc.) sont issues de la littérature (moyennes). Il est également possible de personnaliser un traitement dans l'onglet « BDD REUT niv-1 ».

6.3. Affichage des résultats

Après saisie de l'ensemble des paramètres des scénarios, les résultats sont directement visibles dans les onglets correspondant.

6.3.1.AC.V

Deux méthodes sont proposées pour les résultats d'analyse de cycle de vie : la méthode EF pour les midpoint et la méthode ReCiPe pour les endpoints (3 aires de protections).

ReCiPe

La méthode ReCiPe endpoint permet de comparer la performance environnementale du scénario de REUT par rapport au scénario de référence sur trois indicateurs : la santé humaine, les écosystèmes, et les ressources. La contribution des étapes principales de chaque scénario est indiquée avec des couleurs (voir légende).

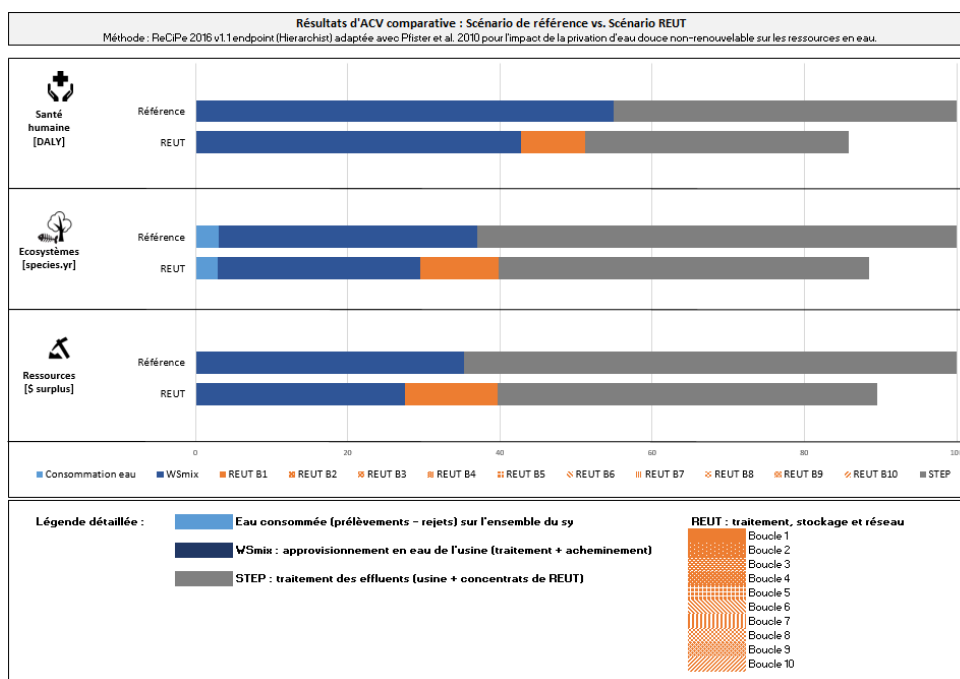


Figure 18 – Résultats ReCiPe endpoint de l'exemple illustratif.

Dans cet exemple, le scénario de REUT est moins impactant que le scénario de référence pour les trois indicateurs endpoint. Dans les conditions particulières de ce cas, on peut donc conclure que la REUT est bénéfique pour l'environnement.

EF

La méthode EF se compose de 28 indicateurs midpoint et permet notamment de dissocier les impacts liés au nexus eau-énergie. En effet, les bénéfices environnementaux liés aux économies d'eau par la REUT sont isolés et visible dans l'impact « Water Use ».

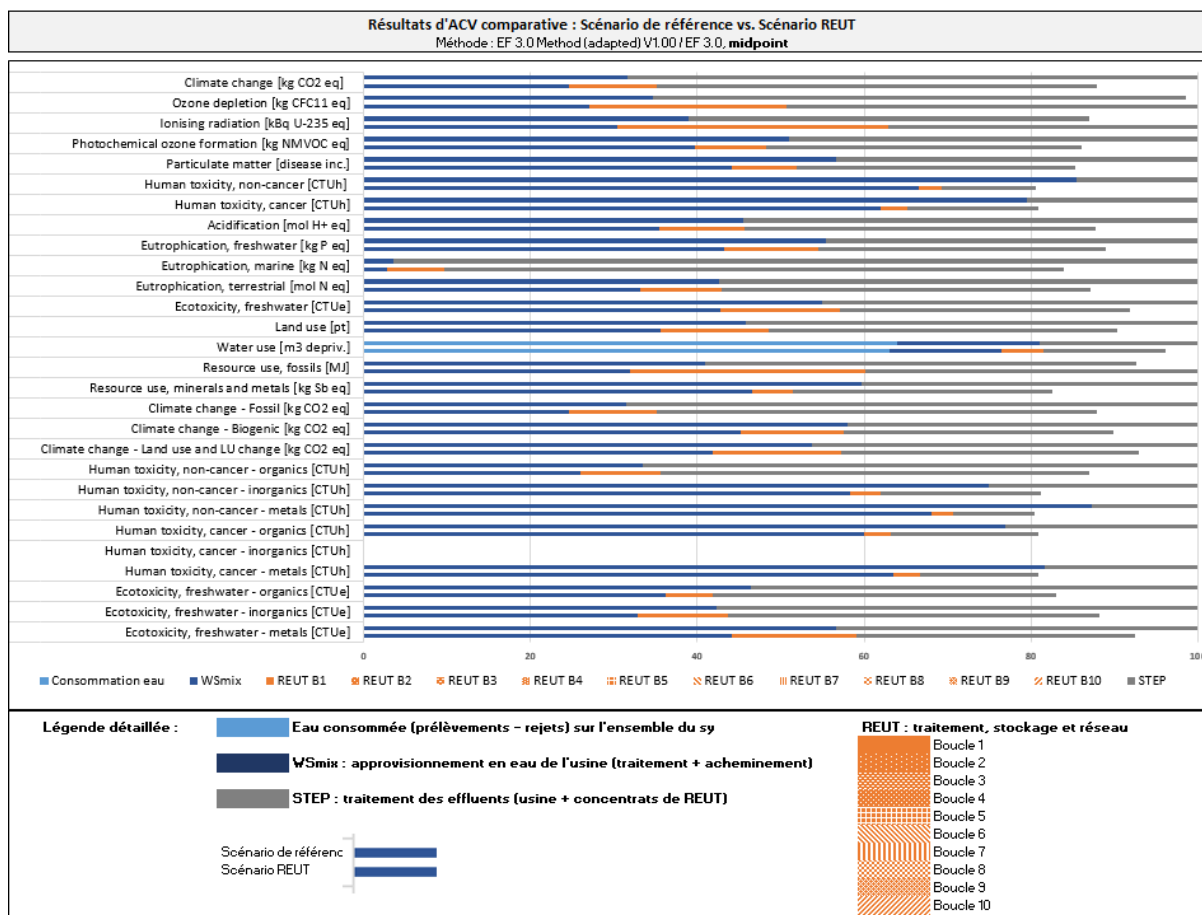


Figure 19 - Résultats EF (midpoint) de l'exemple illustratif.

Ce cas illustratif étant situé en localisation continentale, le bilan hydrique entre les deux scénarios est très proche et ne permet pas une économie d'eau significative.

6.3.2. Empreinte eau

Les résultats d'empreinte eau sont proposés à travers les deux méthodes les plus utilisées à ce jour : WSI (Pfister 2009) et AWARE.

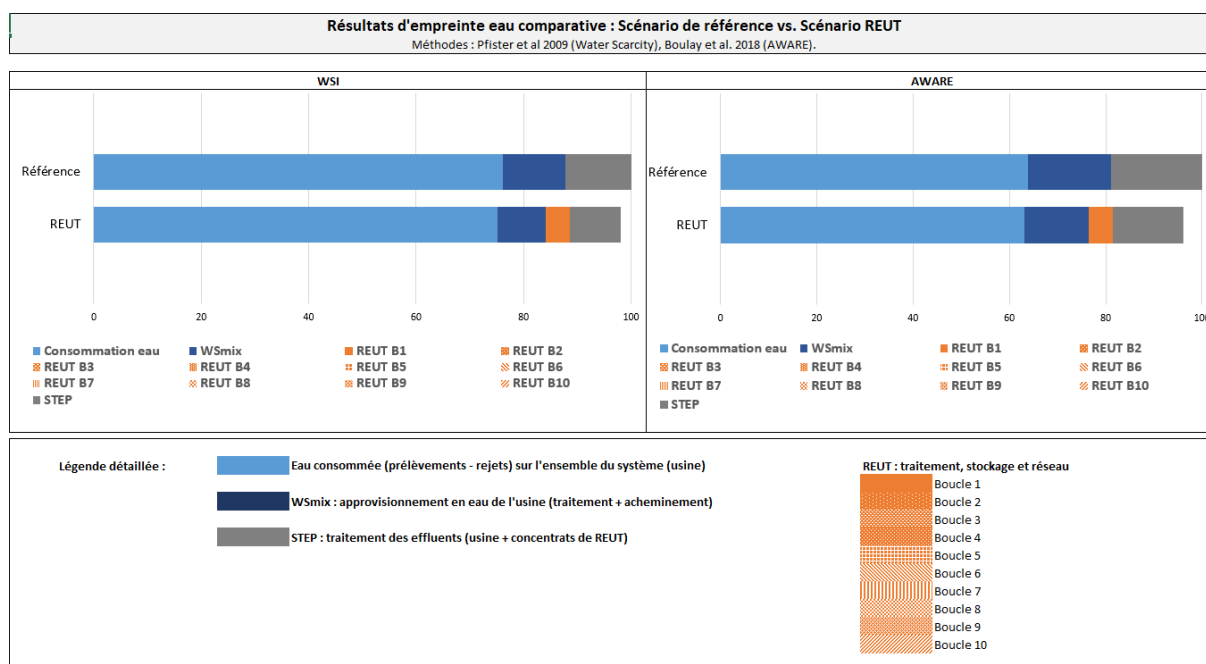


Figure 20 - Résultats AWARE et WSI de l'exemple illustratif.

Les impacts environnementaux liés à la consommation d'eau apparaissent en bleu clair tandis que tous les impacts indirects (consommation d'eau de l'arrière-plan : pour la production d'énergie, des intrants chimiques, etc.) sont visibles dans les autres catégories.

Dans ce cas d'étude l'empreinte eau (monocritère) ne permet pas de déterminer si la REUT est bénéfique pour l'environnement.

6.4. Scénarios alternatifs

A titre illustratif, des variations des paramètres principaux du cas d'études sont proposées afin de présenter des résultats contrastés.

6.4.1. Cas littoral

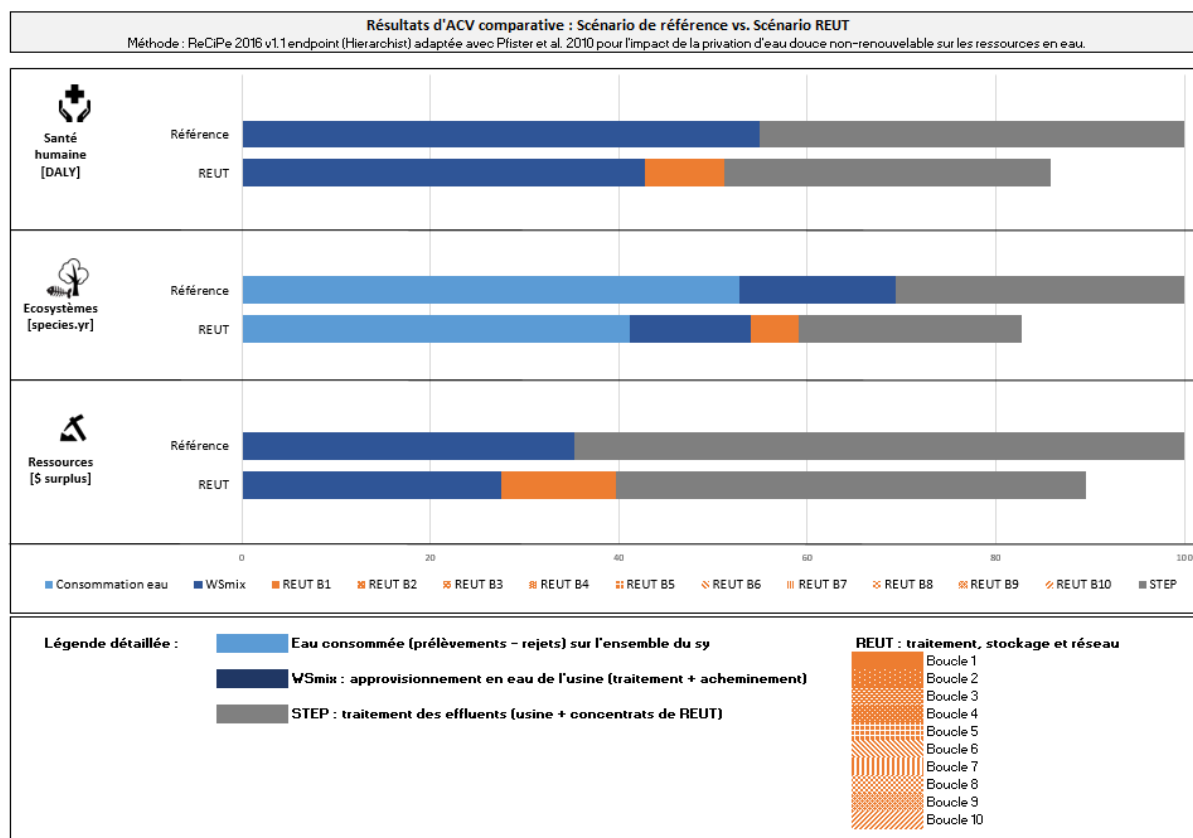


Figure 21 – Résultats ACV ReCiPe endpoint, cas d'étude en zone littorale.

En plaçant l'usine agroalimentaire en zone littorale, les flux d'eau en sortie de STEP ne rechargent plus le milieu et toute eau prélevée est donc considérée comme consommée. Ainsi, dans ces conditions, la REUT permet d'économiser de l'eau de manière significative.

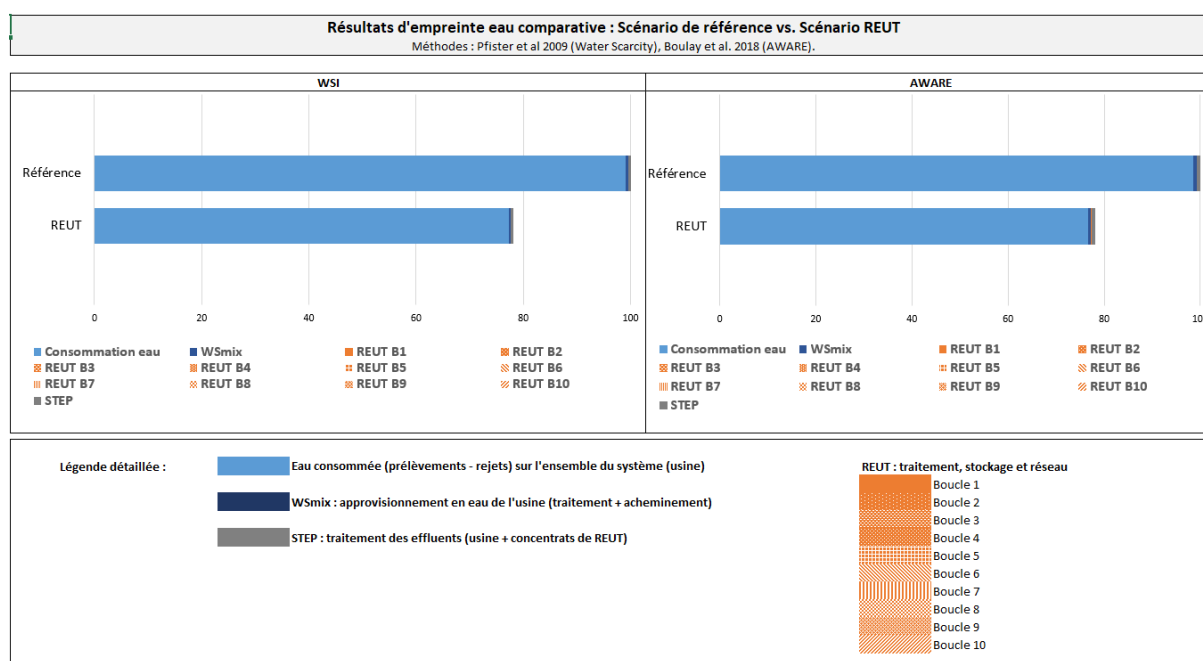


Figure 22 – Résultats empreinte eau WSI et AWARE, cas d'étude en zone littorale.

En zone littorale les impacts des consommations d'eau d'arrière-plan sont négligeables par rapports aux consommations directes (bilan hydrique de l'usine).

6.4.2. Cas zone aride continentale

L'origine de l'eau et le stress hydrique associé au climat est un paramètre important concernant les impacts sur les écosystèmes associés à la consommation d'eau. Ainsi, en zone aride, la contribution des impacts sur les écosystèmes liés à la consommation d'eau est plus importante qu'en zone tempérée.

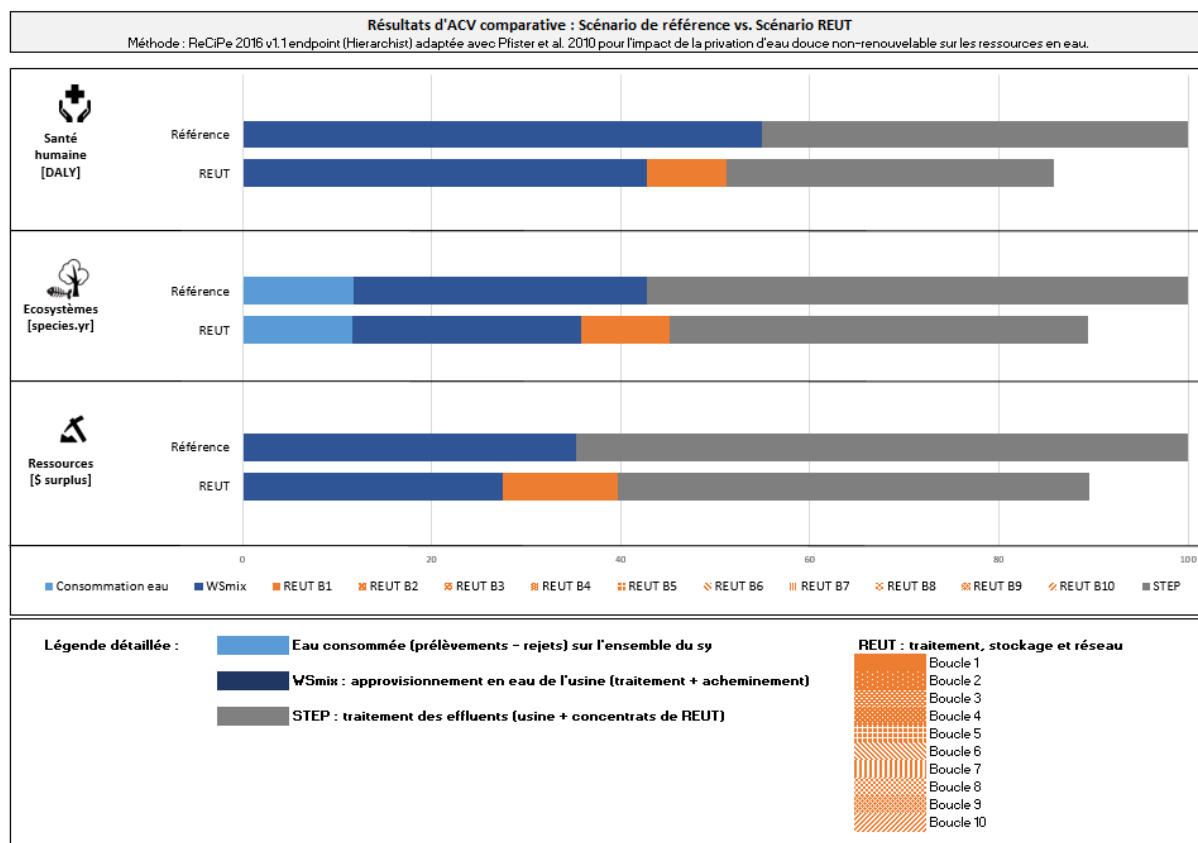


Figure 23 - Résultats ACV ReCiPe endpoint, cas d'étude en zone aride.

6.4.3. Cas eau d'origine souterraine non renouvelable

Dans le cas de prélèvements d'eau d'origine souterraine non-renouvelable, cela génère des impacts sur les ressources (Pfister et al. 2010).

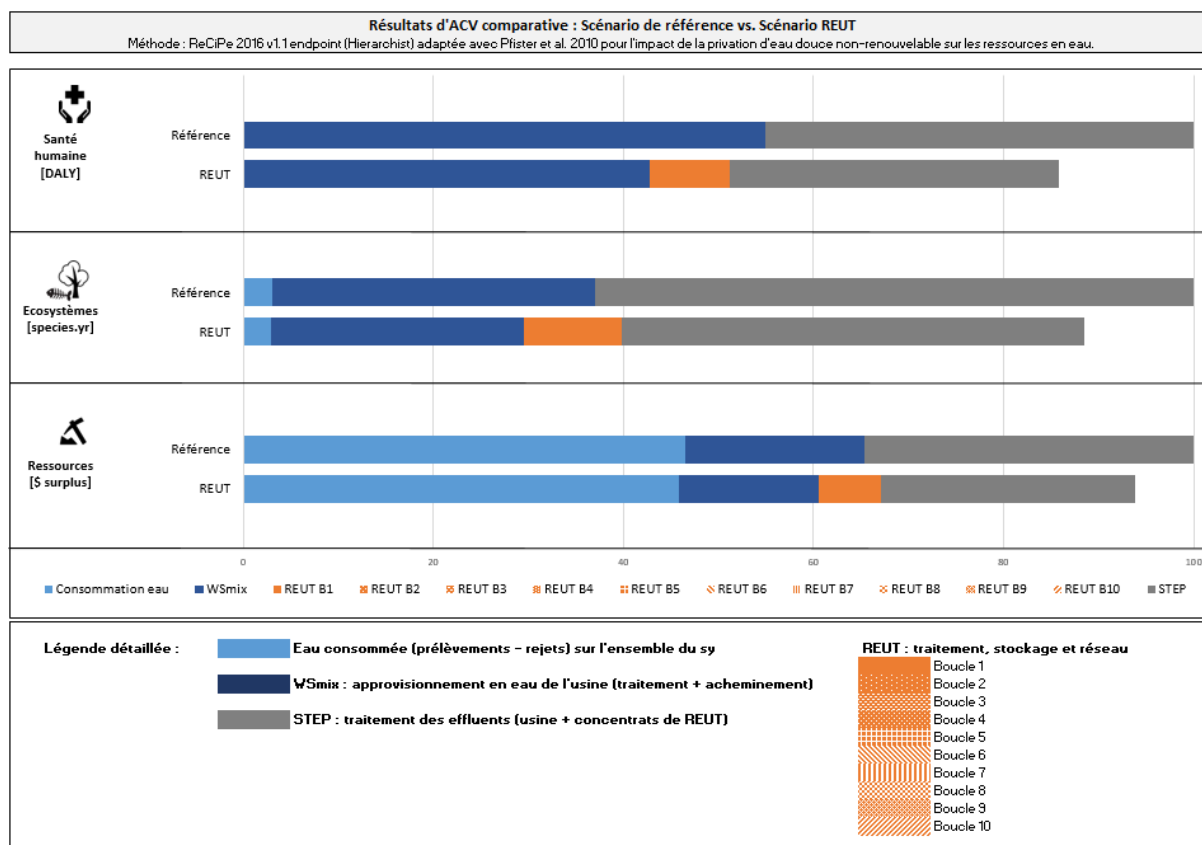


Figure 24 - Résultats ACV ReCiPe endpoint, cas d'étude avec approvisionnement en eau d'origine non-renouvelable.

6.4.4. Mix électrique non-renouvelable

La nature du mix énergétique va influencer sur les impacts liés aux traitements de l'eau : potabilisation mais aussi et surtout régénération des effluents pour la REUT. Ainsi, un mix énergétique non-renouvelable sera associé à des impacts liés à la régénération de l'eau beaucoup plus importants (sur les trois aires de protection).

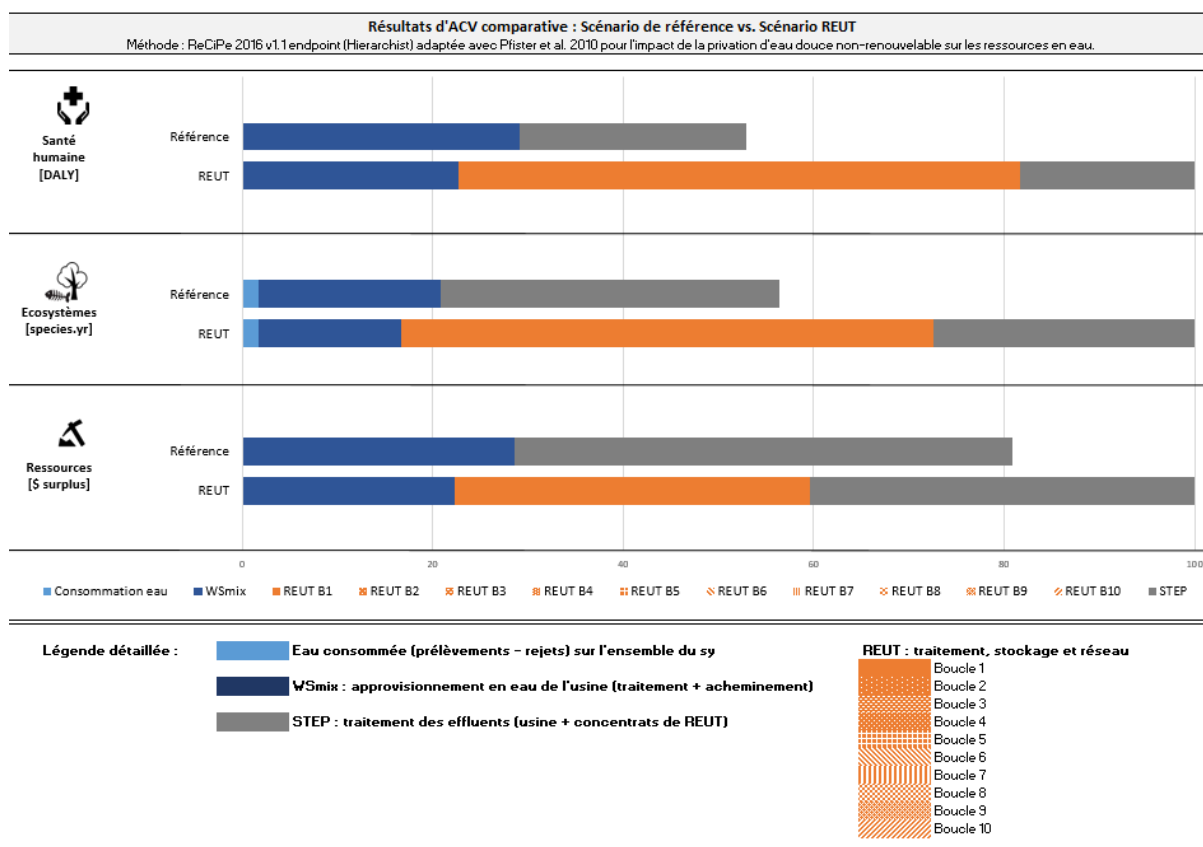


Figure 25- Résultats ACV ReCiPe endpoint, cas d'étude avec un mix énergétique non-renouvelable.

6.4.5. REUT sans traitement de régénération

Enfin, en faisant l'hypothèse qu'un traitement de régénération ne soit pas nécessaire (qualité d'effluent satisfaisante pour un usage particulier dans l'usine), le scénario de REUT est alors beaucoup moins impactant que la référence (même en zone continentale et tempérée).

En effet, les bénéfices liés à l'approvisionnement en eau (moins de besoin d'eau donc moins de traitement de potabilisation et d'acheminement) et la réduction des traitements en STEP (moins d'effluents générés) ne sont plus compensés par l'ajout d'impacts liés à la régénération de l'effluent de REUT.

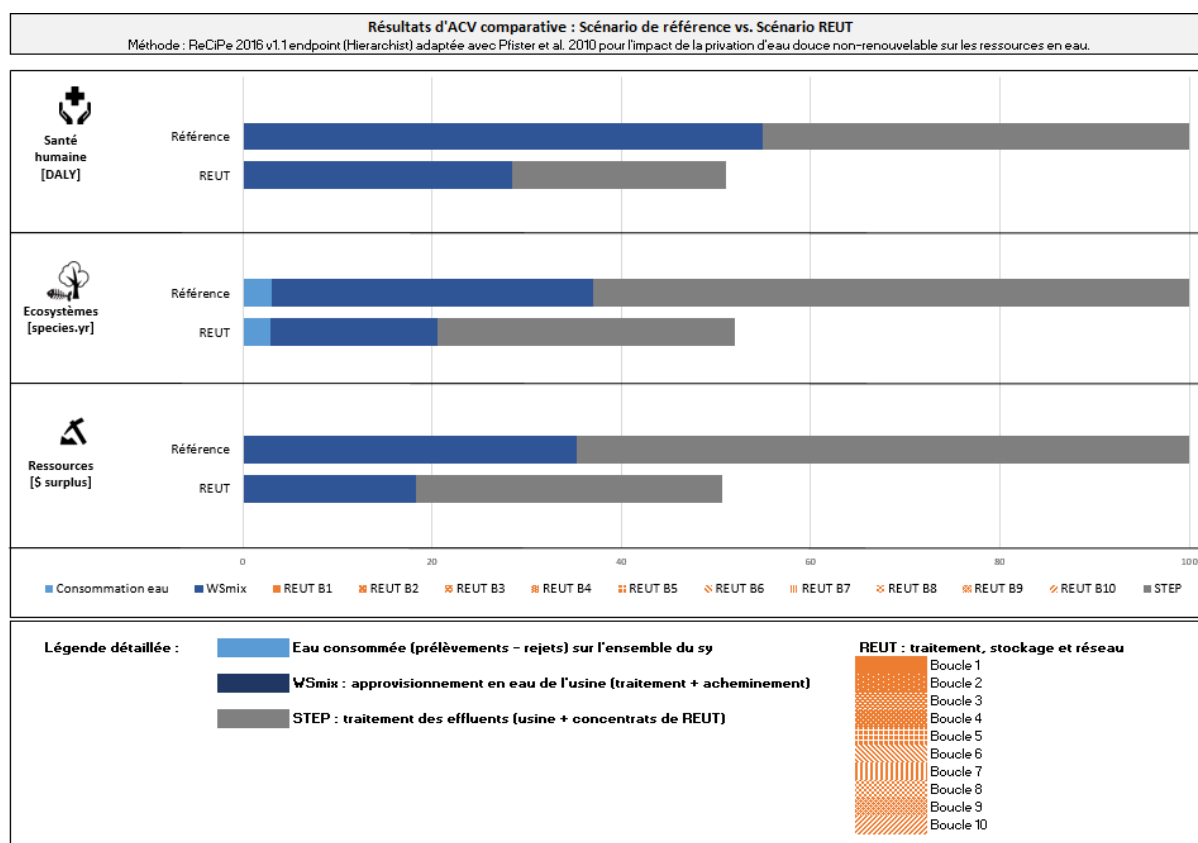


Figure 26 - Résultats ACV ReCiPe endpoint, cas d'étude sans traitement de régénération.

Références

- Boulay AM, Bare J, Benini L, et al (2018) The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *Int J Life Cycle Assess* 23:368–378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>
- Fazio S, Biganzioli F, De Laurentiis V, et al (2018) Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods, version 2, from ILCD to EF 3.0, EUR 29600 EN, European Commission, Ispra, 2018, ISBN 978-92-79-98584-3, doi:10.2760/002447, PUBSY No. JRC114822.
- Guérin-Schneider L, Tsanga-Tabi M, Roux P, et al (2018) How to better include environmental assessment in public decision-making: Lessons from the use of an LCA-calculator for wastewater systems. *J Clean Prod* 187:1057–1068. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.168>
- Huijbregts M, Steinmann ZJN, Elshout PMFM, et al (2016) ReCiPe 2016. *Natl Inst Public Heal Environ* 194. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Leão S, Roux P, Núñez M, et al (2018) A worldwide-regionalised water supply mix (WSmix) for life cycle inventory of water use. *J Clean Prod* 172:302–313. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.135>
- Pastor A V, Ludwig F, Biemans H, Ho H (2013) Accounting for environmental flow requirements in global water assessments. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 10:14987–15032. <https://doi.org/10.5194/hessd-10-14987-2013>
- Pfister S, Koehler A, Hellweg S (2009) Assessing the Environmental Impact of Freshwater Consumption in Life Cycle Assessment. *Environ Sci Technol* 43:4098–4104
- Pfister S, Saner D, Koehler A (2011) The environmental relevance of freshwater consumption in global power production. *Int J Life Cycle Assess* 16:580–591. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0284-8>

Annexe 1

Explications pratiques pour la sélection des facteurs de caractérisation des méthodes AWARE et WSI.

Après avoir importé les cartographies AWARE et WSI dans le logiciel Google Earth il suffit de cliquer sur un sous bassin versant pour faire apparaître un tableau de facteurs de caractérisation.

Les captures d'écran ci-dessous montrent les valeurs à sélectionner pour caractériser une ressource en eau personnalisée dans PEAC (onglet BDD Ressources en eau).

WSI :

Pour un facteur annuel, choisir la valeur Wweigh_mWSI. Pour un facteur mensuel choisir les valeurs WSI_01 (janvier) à WSI_12 (décembre).

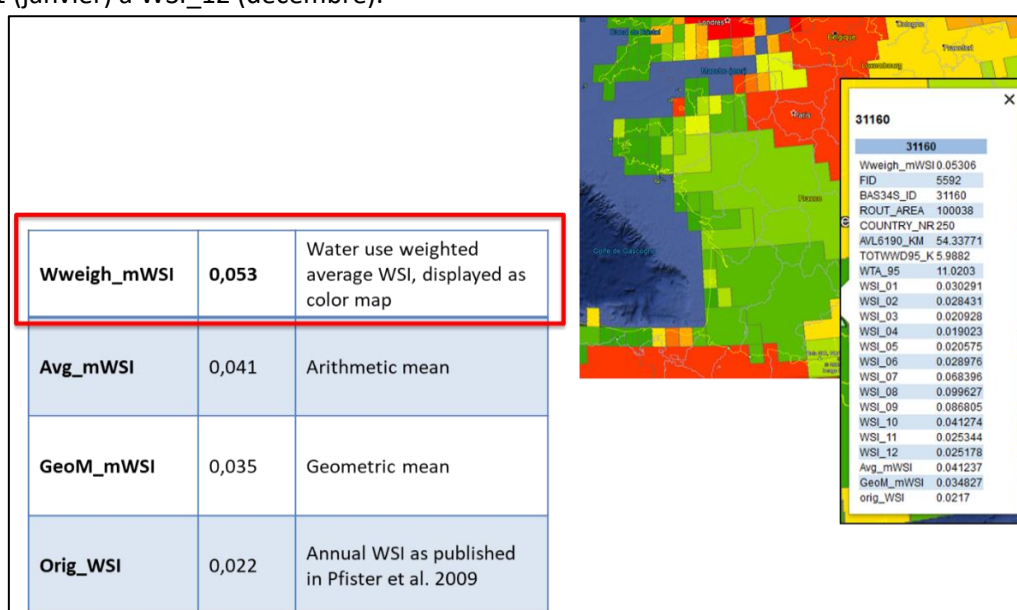


Figure 27 – Capture d'écran de la cartographie WSI dans Google Earth.

AWARE :

Pour un facteur annuel, choisir la valeur Annual unknown. Pour un facteur mensuel choisir les valeurs Jan (janvier) à Dec (décembre).

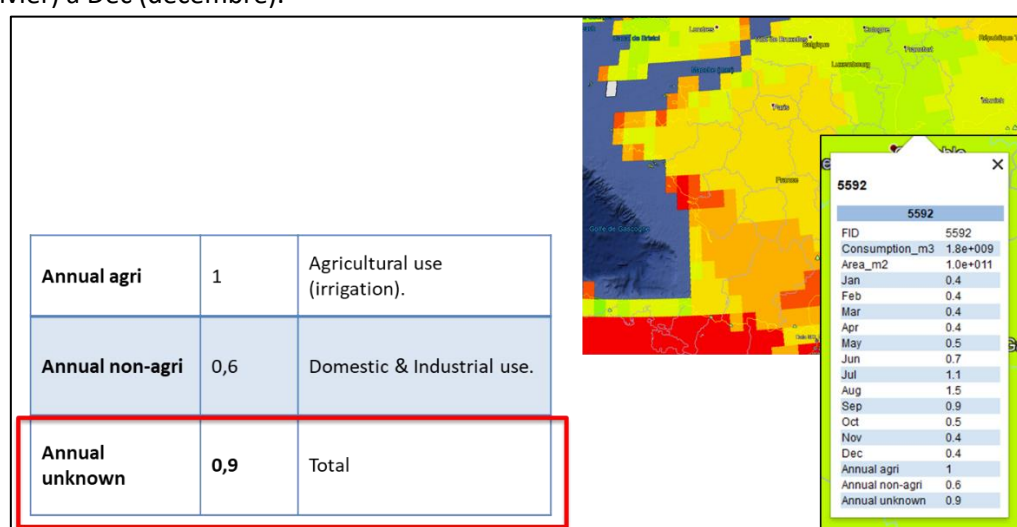


Figure 28 – Capture d'écran de la cartographie AWARE dans Google Earth.