ANALYSE DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL PAR L'APPROCHE GATE TO GATE DE LA TRANSFORMATION DU RIZ DE LA PME DB FOODS AU SENEGAL : EFFET DE LA GAZEIFICATION DE BALLE DE RIZ

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE

DE MASTER

SPECIALITE : GENIE DE L'EAU, DE L'ASSAINISSEMENT ET DES AMENAGEMENTS HYDRO-AGRICOLES (GEAAH)

Présenté et soutenu publiquement le 21/07/2026 par

KIEMDE Hanata (20200205)

Directeur de mémoire : Dr. Marie SAWADOGO Maître de Conférences et Responsable du Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE)

Encadrant 2iE : Dr. Marie SAWADOGO Maître de Conférences et Responsable du Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE)

Structure d'accueil du stage : 2iE/ BioStar

Jury d'évaluation du stage :

Président : Pr. Harinaivo Anderson ANDRIANISA

Membres et correcteurs : Dr. Hela KAROUI

Dr. Mamadou SANOGO

Promotion 2026

DEDICACES

Je dédie ce travail à mes parents, surtout à ma très chère et brave mère.

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant pour le souffle de vie, ainsi que pour la force et la persévérance qu'il m'a accordée tout au long de l'accomplissement de ce travail de recherche.

Ce projet est également le fruit de précieux soutiens. C'est avec une profonde gratitude que je tiens à remercier les personnes dont les conseils avisés ont permis son aboutissement. Mes remerciements s'adressent particulièrement à :

À l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), pour l'excellence de son corps enseignant, le cadre d'étude privilégié et les valeurs de rigueur qu'il m'a transmises tout au long de mon cursus

A Docteur Marie SAWADOGO, Maître de Conférences et Responsable du Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE) :

- En sa qualité de directrice de mémoire, pour sa patience exemplaire, la finesse de son encadrement et sa disponibilité constante qui ont nourri ma réflexion.
- Pour m'avoir ouvert les portes du LabEREE et m'avoir permis d'évoluer au sein de cette structure de recherche.

A Docteur Anselme BAGORO, pour son appui et suivi, ses conseils et sa disponibilité tout au long de la rédaction du mémoire.

A Docteur Anthony BENOIST, pour son appui également dans la collecte de certaines données.

A tous les responsables du projet BioStar, pour avoir permis la mise en place du projet et leur soutien sur tous les plans.

Je tiens à remercier au-delà de l'aspect académique, mes frères et sœurs, mes tantes et oncles, ainsi que tous mes amis pour leur soutien moral.

Résumé

Le riz s'impose comme l'aliment de base au Sénégal. Mais la filière nationale fait face à des défis énergétiques accrus en zone rurale et à des problématiques de gestion des résidus, notamment la balle de riz. Pour y répondre, le projet BioStar a mis en œuvre une unité pilote d'autoproduction d'électricité par gazéification de balles de riz (centrale de 85 kW) au sein de la PME Doing Better Foods (DB Foods) à Thilène. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer et de comparer quantitativement les impacts environnementaux du procédé de transformation du riz au sein de l'usine, avant et après l'installation de cette technologie de rupture. La méthodologie repose sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) selon l'approche « porte à porte » (Gate-To-Gate), modélisée à l'aide du logiciel SimaPro avec la méthode d'évaluation environnemental ReCiPe 2016 H. L'unité fonctionnelle de l'étude est la transformation d'une tonne de riz paddy.

Les résultats d'inventaire montrent que le blanchiment constitue le point critique du système, représentant à lui seul près de la moitié de la demande énergétique globale du processus de transformation (24,82 kWh/t sur un total de 44,7 kWh/t). Avant l'installation de la solution BioStar, le profil environnemental de l'usine subissait de fortes variations et restait impacté par l'empreinte carbone et fossile du réseau électrique national sénégalais, tandis que la combustion mal maîtrisée de la chaudière de séchage maximisait les impacts de toxicité humaine et de formation de particules fines. Mais avec le passage au système de gazéification, l'impact environnemental a été réduit. La substitution de l'électricité national par cette source d'énergie renouvelable stabilise et homogénéise les contributions relatives de chaque opération unitaire (O.U) à des seuils proportionnels et constants sur l'ensemble des catégories d'impacts midpoints et endpoints.

Mots clés :

Analyse du cycle de vie

Impact environnemental

Gazéification

Riz

Sénégal

Abstract

Rice is the staple food in Senegal. However, the domestic sector faces significant energy challenges in rural areas and issues regarding residue management, particularly rice husks. To address this, the BioStar project implemented a pilot unit for self-generating electricity via rice husk gasification (an 85 kW plant) at the SME Doing Better Foods (DB Foods) in Thilene. The primary objective of this study is to quantitatively evaluate and compare the environmental impacts of the rice processing operations at the plant before and after the installation of this breakthrough technology. The methodology is based on Life Cycle Assessment (LCA) using a "gate-to-gate" approach, modeled with SimaPro software and the ReCiPe 2016 H environmental assessment method. The functional unit for the study is the processing of one tonne of paddy rice.

Inventory results indicate that whitening is the system's critical hotspot, accounting for nearly half of the total energy demand of the processing workflow (24.82 kWh/t out of a total of 44.7 kWh/t). Prior to the installation of the BioStar solution, the plant's environmental profile fluctuated significantly and was heavily influenced by the carbon and fossil fuel footprint of the Senegalese national grid, while inefficient combustion in the drying boiler maximized impacts related to human toxicity and fine particulate matter formation. However, the switch to the gasification system reduced the environmental impact. Replacing grid electricity with this renewable energy source stabilizes and standardizes the relative contributions of each unit operation (UO), resulting in proportional and constant levels across all midpoint and endpoint impact categories.

Keywords:

Life cycle assessment

Environmental impact

Gasification

Rice

Senegal

Liste des abréviations

DB Foods : Doing Better Foods

ACV : Analyse du Cycle de Vie

EICV : Evaluation d'Impact du Cycle de vie

ICV : Inventaire du Cycle de Vie

ISO : International Organization for Standardization

CO_2 : Dioxyde de Carbone

OU : Opération Unitaire

PME : Petite et Moyenne Entreprise

SNDR : Stratégie Nationale de Développement de la Riziculture sénégalaise

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

IPAR : Initiative Prospective Agricole et Rurale

Table des matières

DEDICACES i
Remerciements ii
Résumé iii
Abstract iv
Liste des abréviations v
Liste des Tableaux viii
Liste des figures ix
Introduction 1
I Présentation du projet 3
I.1 Contexte 3
I.2 Justification 3
I.3 Objectifs de l'étude 3
I.3.1 Objectif principal 3
I.3.2 Objectifs spécifiques 3
II Présentation de la zone d'étude 4
II.1 Situation géographique 4
II.2 Etat des lieux de la PME 5
II.2.1 Avant l'installation des technologie BioStar 5
II.2.2 Après l'installation des technologies BioStar 8
II.2.3 Consommation d'énergie de la PME 13
II.3 Définition des opérations unitaires 16
II.3.1 Le séchage 16
II.3.2 Le pré-nettoyage et épierrage 16
II.3.3 Le décorticage 17
II.3.4 Le tri densimétrique 17
II.3.5 Le blanchiment 18
II.3.6 Le polissage 18
II.3.7 Le tri rotatif et alvéolaire 19
II.3.8 Le tri colorimétrique 19
III Méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV) 19
III.1 Matériel 19
III.2 Outils 20
III.3 Méthode d'évaluation environnementale et justification 21

III.4 Cadre méthodologique 23
III.4.1 Définition des objectifs et du champs de l'étude 23
III .4.2 Inventaire du cycle de vie (ICV) 24
III.4.3 Evaluation des impacts du cycle de vie (EICV) 30
III.4.4 Interprétation des résultats 32
IV. Résultats 32
IV.1 Résultats de la caractérisation des dommages midpoint 32
IV.2 Résultats de la caractérisation des dommages endpoint 34
IV.3 Comparaison des résultats de la caractérisation midpoint avant et après BioStar 35
IV.4 Comparaison des résultats de la caractérisation endpoint avant et après BioStar 36
V. Perspectives et recommandations 39
Conclusion 40
Bibliographie 41
Annexes xli

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Consommation électrique des équipements 13
Tableau 2 : Bilan des flux énergétiques 14
Tableau 3 : Bilan énergétique avant et après BioStar des cinq (05) grandes étapes de la transformation du riz 14
Tableau 4 : Flux entrants et sortants dans SimaPro avant l'installation des technologie BioStar 25
Tableau 5 : Flux entrants et sortants dans SimaPro après l'installation des technologies BioStar 27
Tableau 6 : Synthèse comparative des émissions 38
Tableau 7 : Tableau des résultats midpoints avant l'installation de la technologie BioStar lv
Tableau 8 : Tableau des résultats endpoints avant l'installation de la technologie BioStar lvi
Tableau 9 : Tableau des résultats midpoints après l'installation de la technologie BioStar lvii
Tableau 10 : Tableau des résultats endpoints après l'installation de la technologie BioStar lviii

Liste des figures

Figure 1: Localisation des PME sur la carte du Sénégal 4
Figure 2 : DB Foods vue satellite 5
Figure 3 : Diagramme général de production de DB Foods 6
Figure 4 : Diagramme de production et de flux d'énergie de DB Food 7
Figure 5 : Procédé de gazéification 8
Figure 6: Grandes étapes du processus de transformation du riz 8
Figure 7 : Schéma de principe de la centrale de gazéification de balle de riz 9
Figure 8 : Processus de gazéification (BioStar, 2026) 11
Figure 9 : Diagramme de flux de matière et d'énergie de DB Foods 13
Figure 10 : Consommations spécifiques comparées des différentes opérations unitaires (OU) de la transformation du riz de DB Foods 15
Figure 11 : ACV avec SimaPro (El Faiz, 2020) 20
Figure 12 : Schéma du cycle de vie 21
Figure 13 : Schéma des étapes de l'ACV (El Faiz, 2020) 22
Figure 14 : Limite du système 24
Figure 15 : Résumé de l'EICV 32
Figure 16 : Contribution relative des différentes opérations unitaires de la transformation du riz avant et après BioStar via la méthode ReCiPe 2016 Midpoint (H) de l'entreprise DB Foods 33
Figure 17 : Contribution relative des différentes opérations unitaires de la transformation du riz avant et après BioStar via la méthode ReCiPe 2016 Endpoint (H) de l'entreprise DB Foods 34
Figure 18 : Comparaison des résultats avant et après l'installation de la gazéification des indicateurs changement climatique et formation d'ozone 35
Figure 19 : Comparaison des résultats avant et après l'installation de la gazéification des indicateurs fines particules et acidification terrestre 35
Figure 20 : Comparaison des résultats avant et après l'installation de la gazéification des indicateurs écotoxicité terrestre et toxicité humaine non cancérogène 36
Figure 21: Comparaison des résultats avant et après l'installation de la gazéification de l'indicateur santé humaine 36
Figure 22: Comparaison des résultats avant et après l'installation de la gazéification de l'indicateur ressource 37
Figure 23 : Comparaison des résultats avant et après l'installation de la gazéification de l'indicateur santé humaine 38
Figure 24 : Implémentation de données de l'étape du blanchiment sur SimaPro après BioStar xli
Figure 25 : Implémentation de données de l'étape du blanchiment sur SimaPro avant BioStar xlii
Figure 26 : Implémentation de données de l'étape du décorticage sur SimaPro après BioStar xliii
Figure 27 : Implémentation de données de l'étape du décorticage sur SimaPro avant BioStar xliv
Figure 28 : Implémentation de données de l'étape de nettoyage sur SimaPro après BioStar xlv
Figure 29 : Implémentation de données de l'étape de nettoyage sur SimaPro avant BioStar xlvi
Figure 30 : Implémentation de données de l'étape du séchage sur SimaPro après BioStar xlvii
Figure 31 : Implémentation de données de l'étape du séchage sur SimaPro avant BioStar xlviii
Figure 32 : Implémentation de données de l'étape du triage sur SimaPro après BioStar xlix
Figure 33 : Implémentation de données de l'étape du triage sur SimaPro avant BioStar l
Figure 34 : Calcul de configuration des dommages midpoints sur SimaPro avant BioStar li
Figure 35 : Calcul de configuration des dommages endpoints sur SimaPro avant BioStar lii
Figure 36 : Calcul de configuration des dommages midpoints sur SimaPro après BioStar liii
Figure 37 : Calcul de configuration des dommages endpoints sur SimaPro après BioStar liv

Introduction

En Afrique, le riz représente une source de revenus et une composante importante dans le régime alimentaire de nombreux ménages (SAWADOGO et al., 2020).Le riz est l'aliment de base le plus important en Afrique de l'Ouest, représentant environ 37 % de la consommation de céréales dans la région (BAD, 2025). Au Sénégal, cette dépendance est particulièrement marquée : depuis 1960, la consommation a augmenté de près de 1000% (Agriculture et Développement rural, 2006) atteignant aujourd'hui une moyenne de 78,1 kg/tête/an (MAERSA, 2022) selon les études de l'Initiative Prospective Agricole et Rurale (IPAR). Cette croissance phénoménale, alimentée par la démographie, l'urbanisation et la modification des préférences alimentaires, place la sécurité alimentaire au cœur des préoccupations nationales. Bien que le Sénégal possède un potentiel de production significatif (couvrant 45% des besoins (Diallo, 2023)), il reste fortement dépendant des importations pour combler un déficit qui constitue un enjeu majeur pour sa balance commerciale. En effet, le riz constitue 34 % du volume de la consommation céréalière nationale et compte pour 54 % des céréales consommées en milieu urbain et 24 % en milieu rural au Sénégal (Fall, 2016).

L'augmentation de production du riz et sa transformation soulèvent des questions environnementales et énergétiques cruciales. La transformation du riz paddy en riz blanc génère une quantité importante de balles de riz (environ 290 kg par tonne de riz blanc) (BioStar, 2026). Un résidu non valorisé dont la gestion est problématique. En effet, la balle de riz représente un risque d'incendie lorsqu'elle est stockée. Ce qui contribue aux émissions de gaz à effet de serre. L'accès difficile à l'énergie est aussi un défi majeur. Le problème d'électricité est chose courante surtout dans les zones rurales. Il est très difficile pour les petites et moyennes entreprises (PME) de fonctionner correctement. En plus du réseau limité d'approvisionnement, l'électricité du réseau national est une source de pollution de l'environnement. Le Sénégal peut-il assurer sa sécurité alimentaire tout en réduisant les impacts de sa filière rizicole par la valorisation des sous-produits ?

C'est ainsi que le projet BioStar a mis en place une nouvelle technologie qui est la gazéification. La littérature scientifique souligne d'ailleurs que si la production du riz est une activité vitale, elle est aussi une source importante d'impacts environnementaux, notamment via les émissions de méthane et la gestion des résidus. C'est alors que l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) se

distingue comme l'outil fiable pour étudier ces impacts et identifier des pratiques de gestion durables.

Plusieurs travaux récents démontrent le potentiel de valorisation énergétique des résidus agricoles par gazéification. Pour pallier ces problèmes, Ortiz et al (Ortiz, Ojeda Karina A., et al., 2025) ont ainsi prouvé, par une approche ACV, que la transformation de résidus de biomasse en gaz de synthèse est une alternative prometteuse pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles, malgré une charge environnementale concentrée dans la phase de gazéification. De même, Lamas (Lamas, 2024) souligne que la co-gazéification de déchets permet non seulement de détourner les résidus des décharges mais aussi de produire un vecteur énergétique propre comme l'hydrogène. Enfin, l'analyse de Ridwan et al (Ridwan et al., 2026) confirme la faisabilité technique de ces systèmes pour la production d'électricité, tout en rappelant que leur succès dépend de modèles de financement structurés.

Avec l’accès difficile à l’énergie au Sénégal qui freine le développement des rizeries rurales, l’innovation de BioStar permettra de sécuriser l’approvisionnement en énergie et rendre autonome la PME. Les perspectives de valorisation des balles de riz offrent deux solutions, à savoir : énergétique et environnementale.

C'est dans cette perspective que nous allons analyser l'intégralité du cycle de vie de la filière rizicole sénégalaise. Notre étude présentera d'abord la zone d'étude et le projet, avant de détailler la méthodologie de l'ACV et son application. Enfin, nous exposerons les résultats obtenus afin de proposer des recommandations stratégiques.

I Présentation du projet

I.1 Contexte

Au Sénégal, à l'instar de nombreux pays africains, la sécurité alimentaire est un enjeu majeur, accentué par la croissance démographique, le changement climatique et la dépendance aux importations. Le riz est une denrée essentielle pour le peuple sénégalais, l'augmentation de sa production est nécessaire afin de réduire cette dépendance aux importations.

Cette hausse de la production de la filière rizicole peut avoir d'énormes impacts environnementaux. La transformation du riz paddy en riz blanc génère des résidus tels que la balle de riz, dont la mauvaise gestion pose problème. En plus, les rizeries locales font face à des difficultés d'accès à l'énergie, car généralement situées en zone rurale. C'est alors que le projet BioStar vise à développer des solutions bioénergétiques pour les PME agroalimentaires, afin de leur permettre de produire leur propre énergie à partir de leurs résidus. C'est dans ce contexte que s'inscrit l'analyse du cycle de vie de la filière riz au Sénégal. Cette étude permettra d'évaluer les impacts environnementaux de la filière riz, depuis l'entrée de l'usine jusqu'à sa sortie.

I.2 Justification

Le processus de transformation du riz paddy en riz blanc a plusieurs étapes et nécessite une bonne alimentation électrique pour toute la chaîne d'équipements. Le décorticage du riz paddy pour obtenir du riz cargo donne un résidu appelé balle de riz. Cette balle de riz représente 200 kg pour une tonne de riz paddy introduit. La gestion de la balle de riz demande un grand espace de stockage et peut causer un incendie. Avec les problèmes d'approvisionnement, le développement des rizeries est dans un perpétuel freinage. Face à ces nombreux défis, le projet BioStar propose une solution bioénergie qui va valoriser les résidus pour répondre aux besoins énergétiques des rizeries.

I.3 Objectifs de l'étude

I.3.1 Objectif principal

L'objectif général de l'étude est de réaliser l'analyse du cycle de vie du riz, avant et après l'installation de la technologie BioStar à DB Foods, à Thilène, au Sénégal.

I.3.2 Objectifs spécifiques

En vue de l'atteinte de l'objectif général, trois (03) objectifs spécifiques ont été dégagés à savoir :

- Identifier la technologie installée dans le cadre du projet BioStar.
- Évaluer les impacts environnementaux relatifs aux procédés de transformation.
- Interpréter les résultats obtenus.

II Présentation de la zone d'étude

II.1 Situation géographique

Le projet BioStar a sélectionné huit (08) PME pilotes au Sénégal dans les filières de transformation de l'anacarde, de l'arachide, de la mangue et du riz. Cependant, une seule PME s'intéresse à la filière riz : Doing Better Foods (DB Foods).

DB Foods, fondé en 2019, est une startup qui intervient dans la filière riz local notamment dans la collecte, la transformation et la commercialisation. Elle se situe dans la ville de Saint-Louis comme indiqué dans la figure (1) (BioStar, 2026). En effet, l'entreprise est installée à proximité du village de Thilène, point d'entrée de la riziculture irriguée dans le Delta du fleuve où, environ 60 % du riz produit au Sénégal est cultivé. L'entreprise se trouve à 35 km du campus de l'Université Gaston Berger, tout au long de la route Nationale n°2.

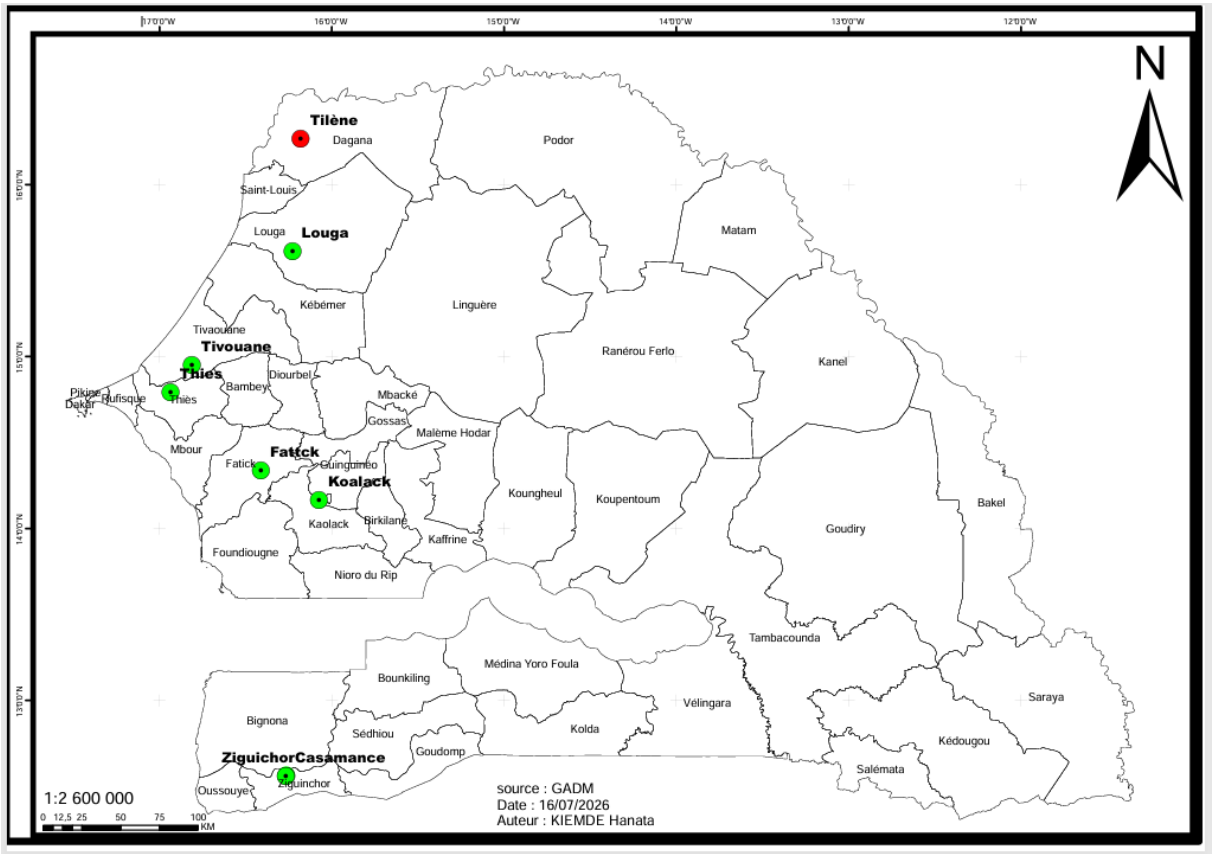


Figure 1: Localisation des PME sur la carte du Sénégal

II.2 Etat des lieux de la PME

II.2.1 Avant l'installation des technologie BioStar

DB Foods est une société anonyme qui a une capacité de transformation de 3 tonnes de riz paddy par heure. Le riz brut qui est la matière première provient de la production locale de Thilène. L'usine de transformation DB Foods est fonctionnelle et s'étale sur dix (10) mois dans l'année. Le site s'étend sur 1600 m^2 dont 1200 m^2 de surface couverte (Piriou et al., 2023). Dans cette surface couverte, 400 m^2 est destinée pour production et 800 m^2 pour le stockage. Une entrée principale du côté Nord-Ouest et une entrée secondaire du côté Sud-Est sont aménagées afin de faciliter les entrées et les sorties des camions (voir figures 2) (Piriou et al., 2023) suite aux résultats du diagnostic de la PME.

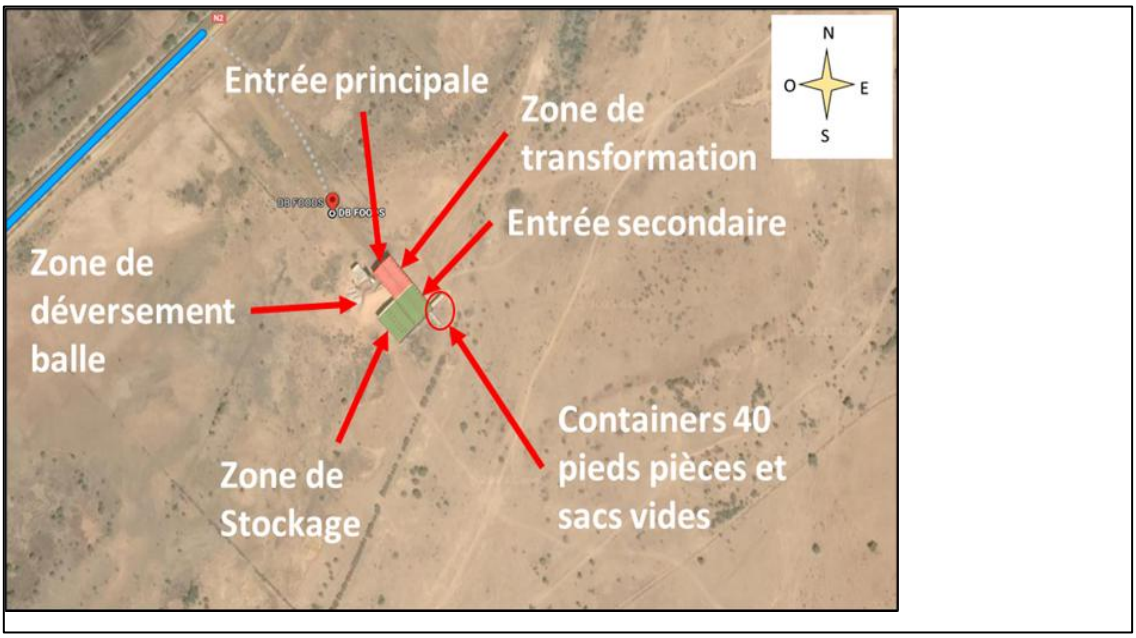


Figure 2 : DB Foods vue satellite

DB Foods utilise un procédé de transformation classique du riz qui comprend les grandes étapes : nettoyage, décorticage, blanchiment ou polissage, et triage pour obtenir du riz prêt à la consommation. La figure 3 (Piriou et al., 2023) ci-contre représente le diagramme de production du riz de DB Foods depuis la réception de la matière première jusqu'à l'emballage du riz blanc, en passant par les étapes intermédiaires.

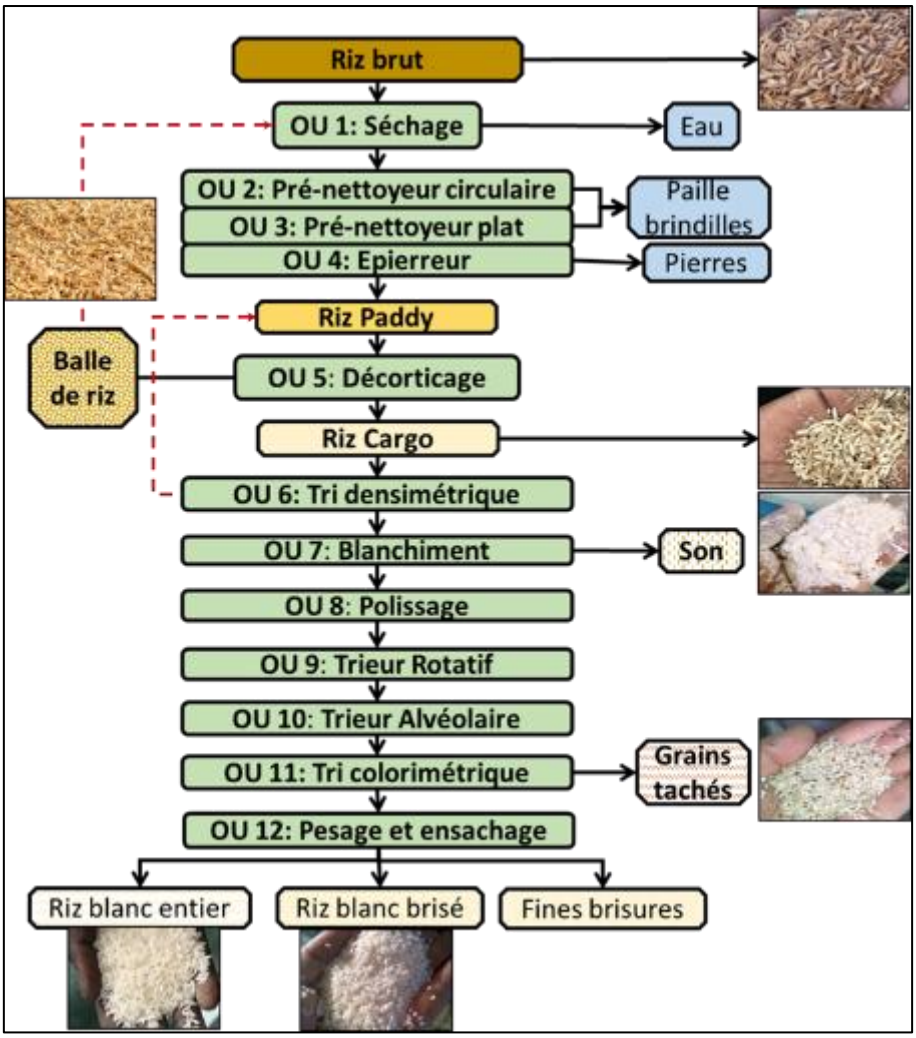


Figure 3 : Diagramme général de production de DB Foods

La figure 4 ci-contre illustre le procédé de transformation du riz, avec les quantités au niveau de chaque opération unitaire (OU) de la PME DB Foods avant l'installation de la technologie de BioStar c'est-à-dire avec l'électricité du réseau national sénégalais.

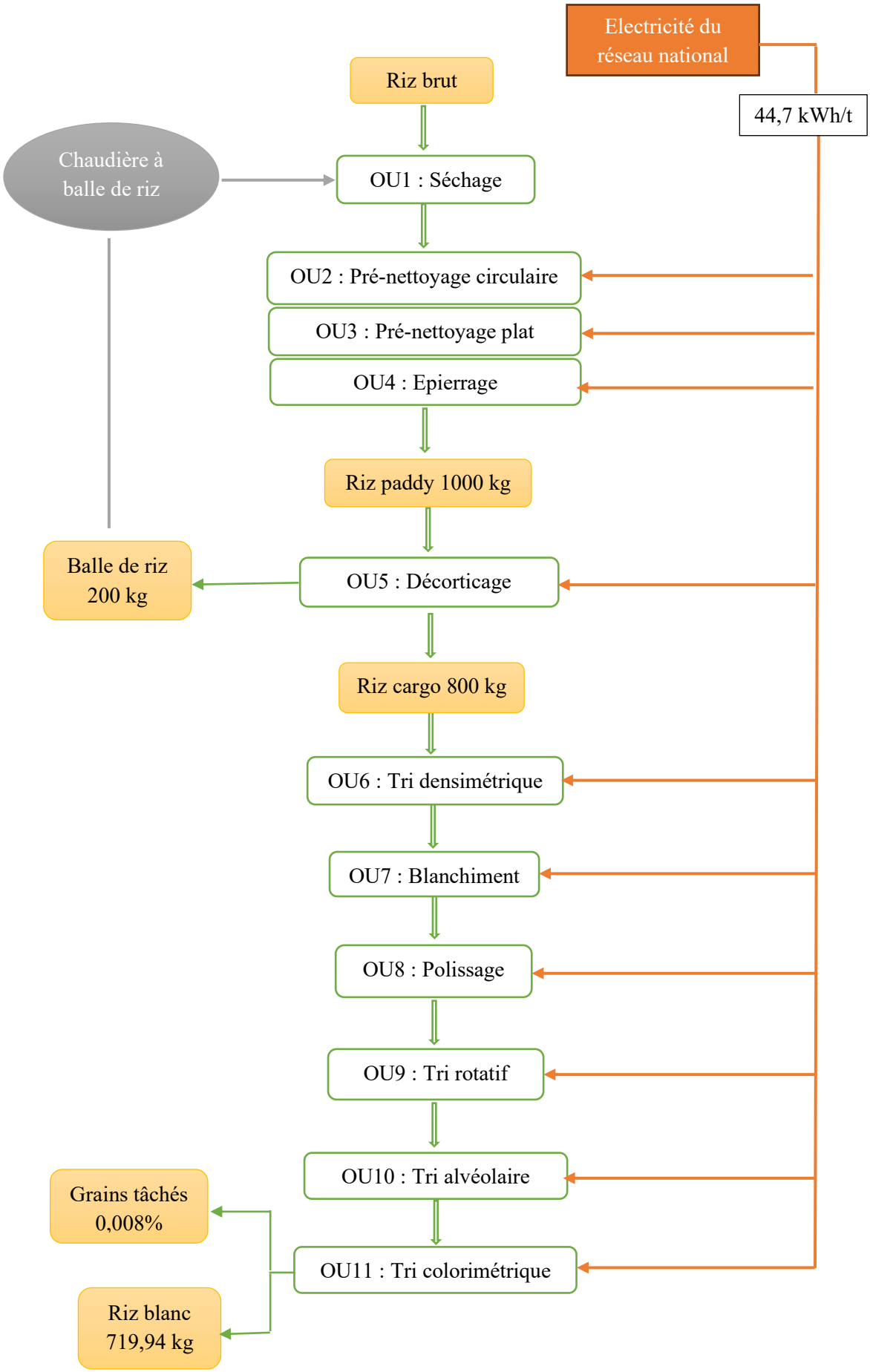


Figure 4 : Diagramme de production et de flux d'énergie de DB Food

II.2.2 Après l'installation des technologies BioStar

Avec le problème d'électricité dans la zone de Thilène (zone rurale) et pour satisfaire les besoins énergétiques de la rizerie DB Foods, l'équipe BioStar a choisi le procédé bioénergie de gazéification pour produire de l'électricité à partir de biomasse. La balle de riz qui est un combustible, solide va être convertie en gaz de synthèse. Ce gaz est très riche en hydrogène et en monoxyde de carbone. La figure 5 présente le procédé de gazéification.

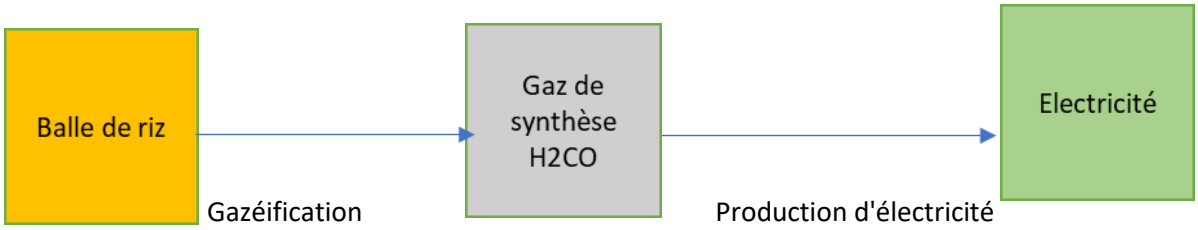


Figure 5 : Procédé de gazéification

Une centrale d'une puissance de 85 kilowatts d'électricité par gazéification de balles de riz est installée dans le but de permettre de couvrir la consommation électrique d'une ligne de transformation de riz paddy d'une capacité de 2 tonnes par heure.

Le système sera raccordé au réseau national et permettra l'autoconsommation pour l'usine de transformation et une injection de l'éventuel excédent d'électricité dans le réseau national.

Cependant le procédé de transformation du riz de l'entreprise n'a pas changé suite à l'installation de cette nouvelle technologie de gazéification. La figure 6 ci-contre montre les grandes étapes de la transformation du riz.

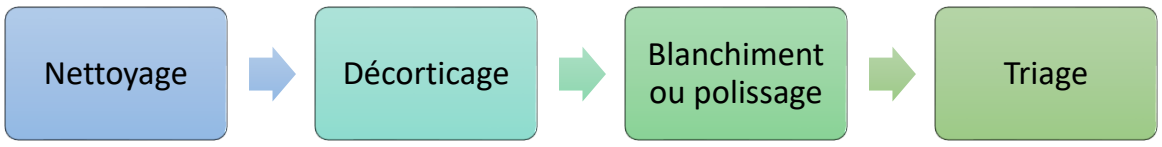


Figure 6: Grandes étapes du processus de transformation du riz

II.2.2.1 La gazéification

La gazéification de la balle de riz est un processus de transformation de la biomasse solide en un gaz combustible appelé gaz de synthèse ou « syngas ». Ce processus implique de chauffer la balle de riz en présence d'une quantité limitée d'oxygène pour provoquer des réactions chimiques (thermochimiques) qui décomposent la matière organique (YAO et al., 2023).

La gazéification a lieu dans un réacteur (gazogène) alimenté en biomasse qui est chauffée pour permettre :

i. La volatilisation d'une partie de matière organique qui est décomposée en gaz et en charbon (pyrolyse), puis
ii. La réaction à haute température du gaz de pyrolyse produit avec le coke pour former un gaz combustible et permanent (réduction).

Le gaz de synthèse, riche en monoxyde de carbone et en hydrogène, est ensuite refroidi et nettoyé, pour collecter les particules et les goudrons présents en sortie de gazogène, avant d'être utilisé dans un moteur à combustion interne adapté pour entraîner un alternateur et produire de l'électricité. La figure 7 montre les entrées et les sorties des éléments dans le gazogène.

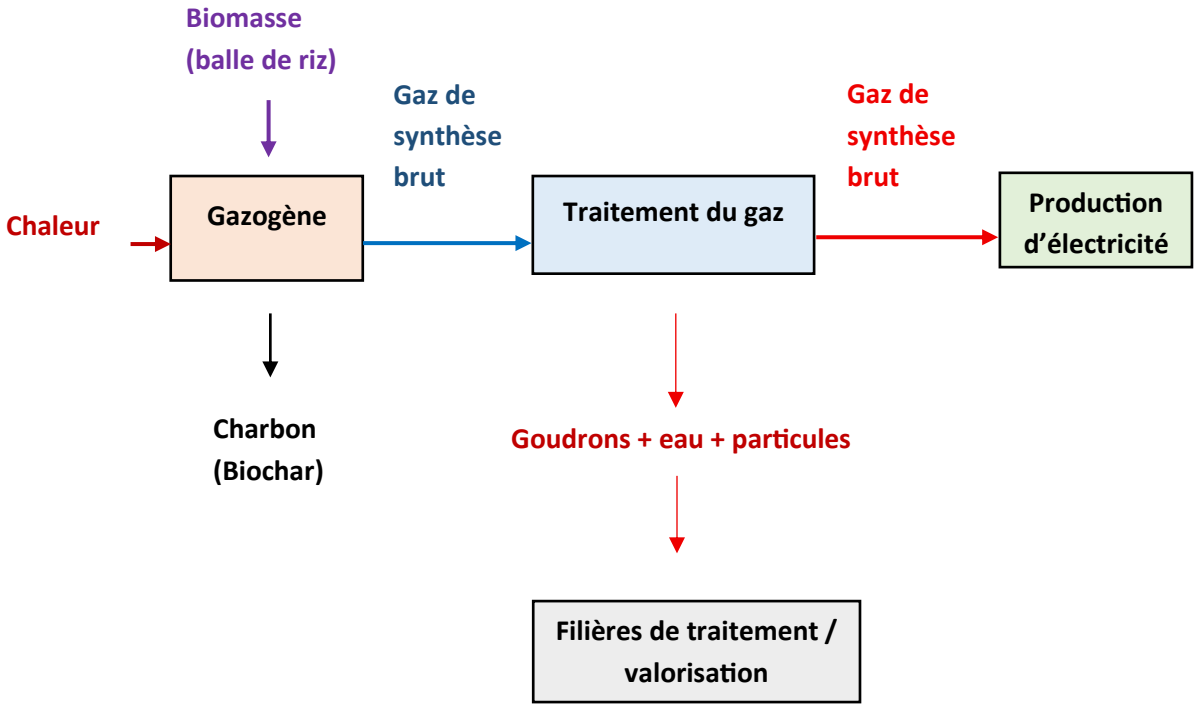


Figure 7 : Schéma de principe de la centrale de gazéification de balle de riz

II.2.2.2 Principe de fonctionnement de la gazéification

La gazéification fonctionne selon quatre étapes (voir figure 8) :

i. Le séchage de la matière pour produire de la vapeur d'eau

Cette permet de réduire l'humidité de la biomasse, par évaporation de l'eau. C'est une réaction endothermique, l'énergie nécessaire étant apportée par la réaction de combustion. Sous l'effet de la chaleur, l'eau contenue dans la matière organique s'évapore. Le combustible carboné résultant est sec et de différentes natures (charbon, biomasse, etc.) (YAO et al., 2023).

Dans certains cas où le produit contient beaucoup d'impuretés, une phase de tri ou de broyage est recommandée avant d'introduire l'intrant dans le gazéifieur.

ii. La pyrolyse des intrants pour obtenir du coke (résidus de carbone) et des gaz de pyrolyse

Cette étape sans oxygène (anaérobie) se déroule à des températures situées entre 300 °C et 700 °C. Elle est dite « autothermique » car elle ne produit ni ne consomme d'énergie. En augmentant progressivement la température en l'absence d'oxygène, la matière séchée se décompose et les atomes de carbone s'associent entre eux. Il se forme alors :

- Du carbone réducteur presque pur (coke ou résidus de carbone) ;
- Un mélange de gaz oxydants non-condensables composés majoritairement d'oxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures (CH_4) appelés « gaz de pyrolyse » ;
- Des goudrons et des matières volatiles condensables issues de vapeurs de composés organiques (acides acétiques, aldéhydes).

iii. L'oxydation des gaz de pyrolyse pour générer une chaleur suffisante à la gazéification

Cette étape se déroule en présence d'oxygène à des températures comprises entre 1 200°C et 1 500°C. Les matières volatiles issues de la pyrolyse s'oxydent. Cette combustion dégage la chaleur nécessaire aux deux étapes précédentes et à l'étape suivante de la gazéification. Elle nécessite un fort apport en oxygène.

iv. La réduction ou gazéification du carbone pour produire le syngas

Cette étape se déroule à des températures comprises entre 800 °C et 1200° C. En l'absence d'oxygène, le coke obtenu lors de la phase de pyrolyse réduit la vapeur d'eau et le gaz carbonique obtenus dans l'étape précédente respectivement en hydrogène et en oxyde de carbone pour former du syngas, combustible mélangeant en proportions variables CO et H_2.

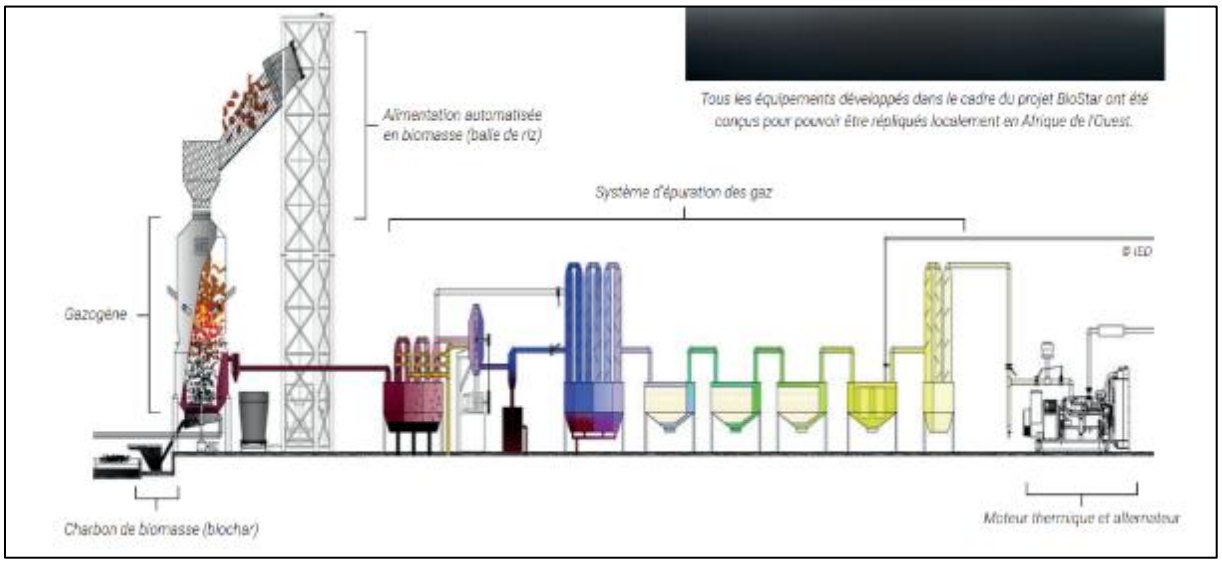


Figure 8 : Processus de gazéification *(BioStar, 2026)*

Avec la production d'électricité de gazéification, toutes les machines entrant dans le processus de transformation du riz sont maintenant branchées au réseau d'électricité de gazéification. C'est ce qu'illustre la figure 9.

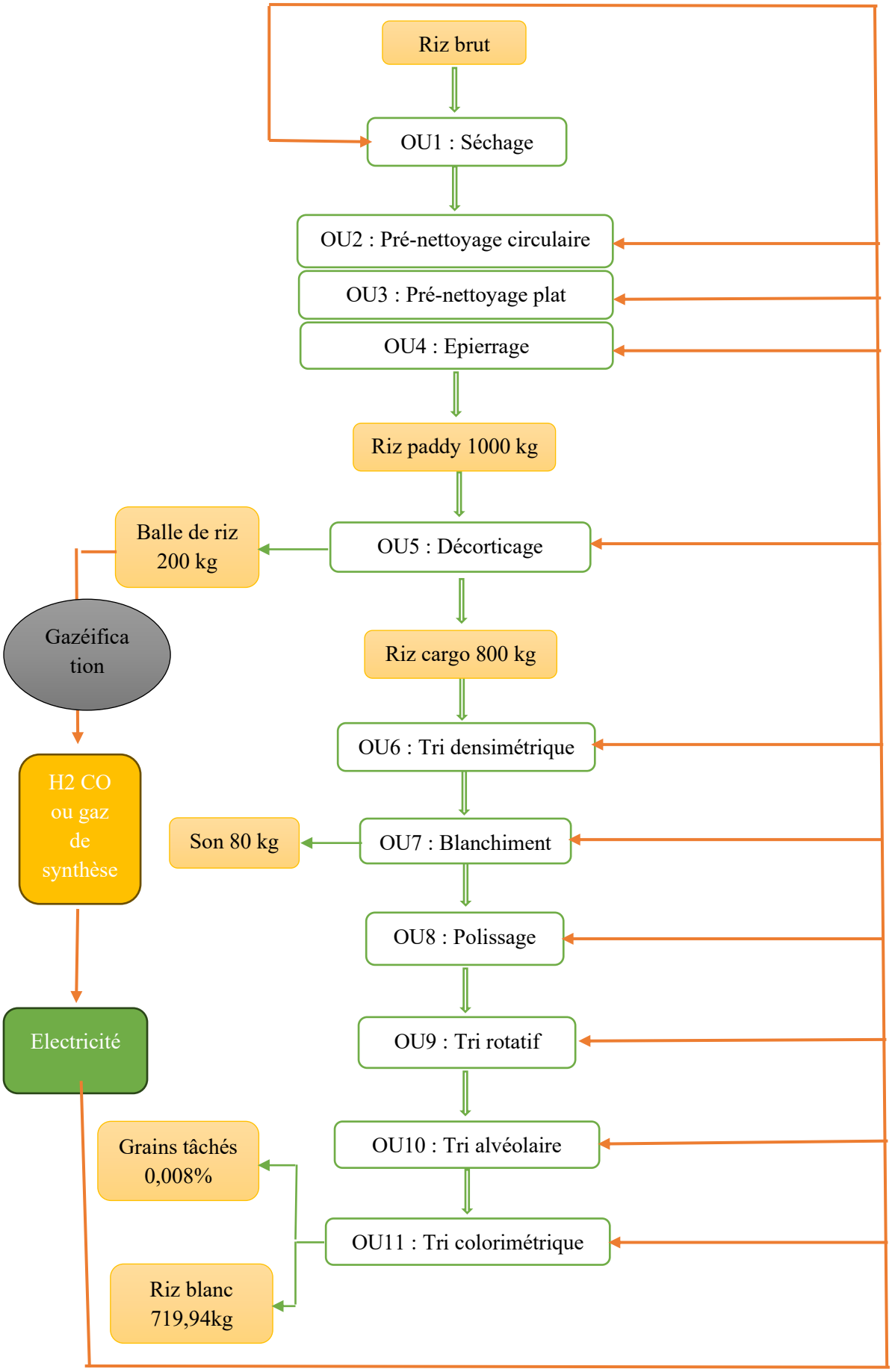

Riz brut
OU1 : Séchage
OU2 : Pré-nettoyage circulaire
OU3 : Pré-nettoyage plat
OU4 : Epierrage
Riz paddy 1000 kg
Balle de riz 200 kg
OU5 : Décorticage
Gazéification
Riz cargo 800 kg
OU6 : Tri densimétrique
H2 CO ou gaz de synthèse
Son 80 kg
OU7 : Blanchiment
OU8 : Polissage
Electricité
OU9 : Tri rotatif
Grains tâchés 0,008%
OU10 : Tri alvéolaire
OU11 : Tri colorimétrique
Riz blanc 719,94kg

Figure 9 : Diagramme de flux de matière et d'énergie de DB Foods

II.2.3 Consommation d'énergie de la PME

Le tableau 1 suivant renseigne les différents équipements sur le site avant l'installation du projet BioStar. La puissance installée de ces machines est de 170 kW selon les données d'audits (BioStar, 2026).

Tableau 1 : Consommation électrique des équipements

Consommation électrique des équipements		
Équipements	**Nombre de moteurs**	**Puissance nominale**
Élévateurs	6	1,5
	9	1,1
	1	2
Pré-nettoyeur circulaire	1	1,5
Pré-nettoyeur plat	2	0,37
Aspirateur poussière (après nettoyage)	1	15
Aspirateur (balle de riz)	2	5,5
Aspirateur (son)	1	11
Épierreur	1	1,5
Décortiqueur	1	7,5
Table densimétrique	1	1,5
Blanchisseur 1	1	30
Blanchisseur 2	1	22
Polisseur	1	22
Sortex Laser (tri grains blancs)	1	2,4
Sécheur d'air comprimé	1	0,75
Compresseur	1	22
Trieur rotatif	1	1,5
Trieur alvéolaire	3	0,75
Balance Ensacheuse	1	2
Puissance installée		170

Selon les données d'audits, la consommation d'une tonne de riz de paddy est de 44,7 kwh/t et le rendement du moteur de gazogène 32% (ecoQuery, 2025).

Le tableau 2 suivant représente le bilan des flux de consommation d'énergie et le volume du syngaz.

Tableau 2 : Bilan des flux énergétiques

Opérations unitaires	Puissance nominale (kW)	Energie consommée (kWh)	Energie de gaz kWh	Volume Nm3	Volume réel m3 pour 1,013 bar
Séchage	0,75	0,36	1,12	0,13	0,14
Pré-nettoyage plat	0,74	0,35	1,10	0,12	0,14
Pré-nettoyage circulaire	1,5	0,72	2,24	0,25	0,29
Épierrage	1,5	0,72	2,24	0,25	0,29
Décorticage	7,5	3,58	11,19	1,26	1,44
Tri densimétrique	1,5	0,72	2,24	0,25	0,29
Blanchiment	52	24,82	77,57	8,73	10,00
Polissage	22	10,50	32,82	3,69	4,23
Tri rotatif et alvéolaire	3,75	1,79	5,59	0,63	0,72
Tri colorimétrique	2,4	1,15	3,58	0,40	0,46
Puissance totale nominale (kW)	93,64				
Consommation d'énergie totale (kWh)	44,7				

Le tableau 3 ci-contre renseigne le bilan du cumul des flux d'énergie des opérations unitaires. En effet, les étapes de la transformation du riz ont été réduites en cinq (05) grandes étapes qui sont : le séchage, le triage, le nettoyage, le décorticage et le blanchiment.

Tableau 3 : Bilan énergétique avant et après BioStar des cinq (05) grandes étapes de la transformation du riz

Opérations unitaires	Consommation d'énergie avant BioStar (kWh)		Consommation d'énergie après BioStar (kWh)
OU1 Séchage	0,36	0,36	0,36
OU2+OU3+OU4 Nettoyage	0,35+0,72+0,72	1,79	1,79
OU5 Décorticage	3,58	3,58	3,58
OU7+OU8 Blanchiment	24,82+10,50	35,32	35,32
OU6+OU9+OU10+OU11Triage	0,72+1,79+1,15	3,66	3,66

A l'issue du tableau 2, on obtient le profil énergivore (voir figure 10) des différentes opérations unitaires de la PME DB Foods avant et après l'installation de la technologie BioStar.

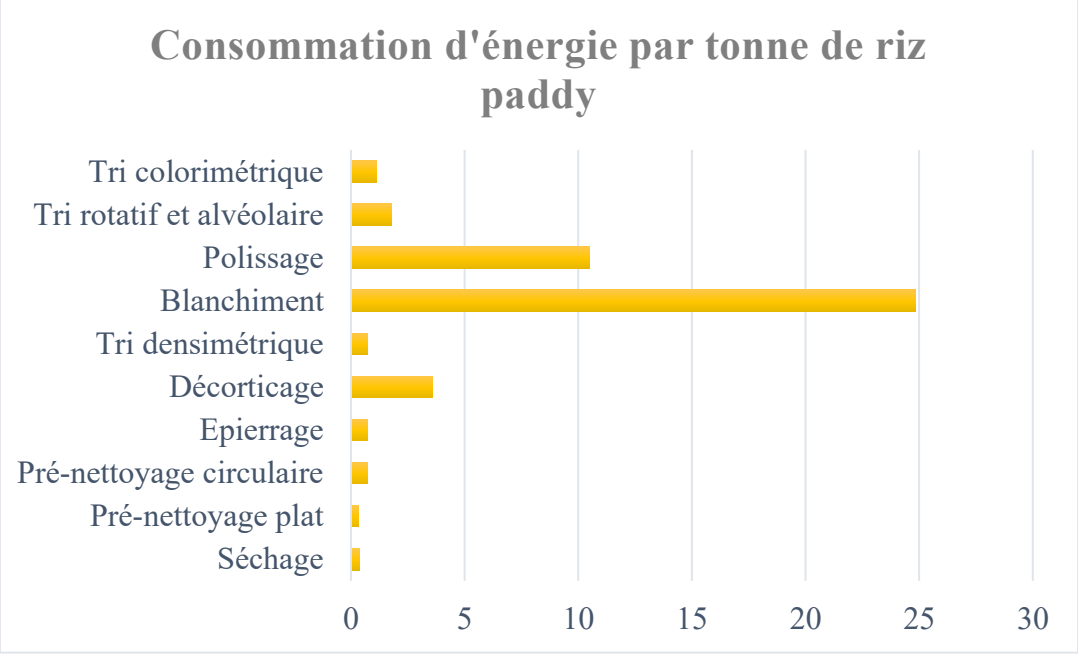


Figure 10 : Consommations spécifiques comparées des différentes opérations unitaires (OU) de la transformation du riz de DB Foods

Le graphique montre une disparité énorme entre les étapes :

- Le blanchiment est le point critique absolu : Avec une valeur de d'environ 24,82 kWh/t, c'est l'étape la plus énergivore.

- Le séchage et le pré-nettoyage affichent les valeurs les plus faibles, presque proches de zéro sur cette échelle tandis qu'on observe une augmentation nette au niveau polissage, du tri rotatif et alvéolaire et du décorticage.

L'opération du blanchiment consomme énormément d'énergie. Cette opération à elle seule consomme près de la moitié de l'énergie du processus entier. Nos résultats vont être corrélés avec la consommation de l'énergie du processus.

II.3 Définition des opérations unitaires

II.3.1 Le séchage

Ce processus vise essentiellement à réduire la teneur en eau du riz paddy au-dessus de 13 % avant le stockage. De Décembre à Mars, les conditions atmosphériques ne permettent pas un séchage satisfaisant au soleil.

Alors, les rizeries se sont équipées de chaudières à balle de riz afin de pouvoir travailler dans les conditions les plus défavorables. Ces chaudières permettent une stabilisation du taux d'humidité à moins de 13 %. Pour pallier ce problème, les rizeries sont équipées de chaudières à balle de riz. Ces équipements permettent de stabiliser l'humidité du grain à moins de 13 %, un taux optimal pour le stockage. Des humidimètres à grain sont utilisés pour le contrôle.

II.3.2 Le pré-nettoyage et épierrage

Le nettoyage du riz paddy est une opération indispensable qui protège les machines de l'usure et évite la contamination du riz par des corps étrangers. C'est un processus qui élimine les impuretés que ça soit de natures végétales (pailles, grains vides), minérales (pierres, sables) ou animales (débris d'insectes).

Les équipements de nettoyage sont les nettoyeurs rotatifs et les nettoyeurs-séparateurs. Un séparateur magnétique permet trier les particules métalliques (clous, boulons, vis) du riz. Ces équipements ont un débit entre 5 à 10 t/h.

DB Foods possède un pré-nettoyeur plat et un pré-nettoyeur circulaire à tambour pour l'opération de nettoyage. Une fois le nettoyage terminé, le riz paddy est envoyé au niveau de l'élévateur n°2 pour l'épierrage. C'est alors que les fragments de paille et de végétaux sont

extraits par un ensemble de cyclones. C'est ce système qui récupère également la balle de riz issue du décortiqueur.

II.3.3 Le décorticage

Le décorticage consiste à enlever la balle des grains de riz paddy pour obtenir le riz cargo. Dans les rizeries de la Vallée du Fleuve Sénégal, les anciens modèles de décortiqueurs à meules ont été substitués par les décortiqueurs à rouleaux en caoutchouc. Bien que les anciens modèles soient encore utilisés par les transformateurs artisanaux. Le principe de fonctionnent du décorticage à rouleaux en caoutchouc est très simple : la balle est retirée par cisaillement du grain de riz lors de son passage entre deux rouleaux en caoutchouc tournant inversement à des vitesses différentes. Cela évite d'énormes brisures des grains de riz.

Dans les industries de rizeries, pour avoir un débit de 2 t/h avec une puissance de 7,5 kW, il faut avoir des décortiqueurs à rouleaux de 10 pouces. La PME DB Foods en possède un.

Un décorticage complet augmente le taux de brisure. Il faut donc éviter le décorticage complet pour minimiser les brisures. En condition d'utilisation normale, le rendement de la machine est d'environ 80%.

A la sortie le décortiqueur, la balle et les particules légères (grains immatures, fines brisures, poussières) sont récupérer par aspiration.

II.3.4 Le tri densimétrique

Pour séparer le riz paddy des grains de riz cargo après le décorticage, on utilise des tables densimétriques. Ces machines séparent les grains par leur différence de densité grâce à un mouvement alternatif.

Les tables densimétriques à chicanes sont dotées de deux à cinq étages avec des compartiments en zigzag plus ou moins inclinés. Elles sont stimulées de mouvements de va-et-vient horizontaux séparant de façon densimétrique les produits. Les grains de riz cargo sont alors collectés dans une goulotte alors que les grains de riz paddy, moins denses, remontent puis sont récupérés à l'autre extrémité. Les débits obtenus varient entre 2 à 5 tonnes par heure, pour une énergie requise de 2 à 3 kW. Certaines tables densimétriques sont constituées de modèles plus simples, avec de simples plateaux inclinés.

La table densimétrique de chez DB Foods est un modèle chinois avec un moteur de fonctionnement d'une capacité de 3 à 6 tonnes par heure.

II.3.5 Le blanchiment

Le blanchiment est un processus qui transforme le riz cargo en riz blanc en retirant le péricarpe et le germe, sans endommager l'amande du grain. Pour ce faire, deux méthodes sont utilisées : l'abrasion (frottement sur une surface abrasive) et la friction (frottement des grains entre eux sous pression). Ces deux méthodes sont régies par un principe de complémentarité.

En effet, l'abrasion fonctionne à une basse tension et à vitesse élevée. Elle est constituée d'une meule tournante qui frotte les grains pour leur donner un aspect blanchi. Elle donne peu de brisures. Un courant d'air traverse l'axe creux pour permettre le refroidissement des grains et faciliter l'évacuation du son. Le débit du blanchisseur à abrasion est entre 500 kg/h et 3 t/h.

Inversement le blanchisseur à friction est qualifié de blanchisseur pneumatique car il est considéré comme un équipement avec une pression haute et une vitesse faible. Sa vitesse du cylindre central est inférieure à 10m/s. Avec les pressions élevées auxquelles le grain est soumis, il y'a davantage de brisures mais le riz obtenu est très lisse et bien blanchi.

Les deux appareils sont montés en série tout en réalisant d'abord le blanchiment par abrasion, puis le blanchiment à friction en sortie. Cette combinaison donne une surface bien lisse au riz. Pour éviter d'énormes cassures des grains, les grains ronds, moins fragiles passent dans le blanchisseur à friction tandis que les grains longs entrent dans le blanchisseur à abrasion. Tant que le blanchiment par abrasion n'atteint pas 20%, il serait difficile d'atteindre l'équilibre optimal.

Sur notre site, il y'a deux machines chinoises à friction de 30 et 22 kW de puissance de telle sorte que la première machine s'occupe du traitement intensif et la dernière, du traitement de finition.

II.3.6 Le polissage

Après le blanchiment, des résidus de son et de farine adhèrent souvent aux grains de riz, surtout après un traitement par abrasion. Pour obtenir une finition parfaite, une technique japonaise des années 1970 utilise un polisseur à eau. Cette machine, similaire à un blanchisseur pneumatique mais avec une pression moindre, injecte un brouillard d'eau pour améliorer la friction et nettoyer les grains. Un système d'aspiration dans la partie arrière de la chambre sèche ensuite les grains qui ont été légèrement réhumidifiés.

DB Foods dispose d'une seule machine de 22 kW avec 2 à 3 t/h de capacité.

II.3.7 Le tri rotatif et alvéolaire

Il est très nécessaire de faire un triage minutieux du riz afin de séparer les brisures des grains entiers. Le tri est opération qui consiste à placer en série deux trieurs alvéolaires à cylindre rotatif et un tamiseur à plan animé d'un mouvement rotatif qui vont effectuer la séparation des grains. Dans le site de DB Foods, les deux technologies sont montées de sorte qu'un silo tampon soit alimenté par un trieur plan en riz entiers, brisés et fines brisures. Les grains entiers et brisés mal séparés sont acheminés vers un trieur alvéolaire qui mène un dernier tri.

II.3.8 Le tri colorimétrique

Le trieur colorimétrique est une machine qui élimine les grains de riz dont la couleur n'est pas conforme aux standards commerciaux (grains jaunes, tachés ou crayeux). En effet, tous les grains de riz subissent un contrôle dans plusieurs cellules photoélectriques réglées pour une blancheur donnée. Si ces grains ne sont pas conformes, ils sont rejetés par un jet d'air comprimé.

DB Foods possède un trieur colorimétrique de marque SORTEX à quatre canaux, alimenté au choix par du riz entier, brisé, ou de fines brisures. La sélection du produit à l'entrée se fait à traves de vannes qui se trouvent en bas des silos. Le trieur est très sensible aux variations de tensions et ne fonctionne que la nuit ou sur batterie. Sa puissance électrique est de 2,4 kW pour une capacité avoisinant les 3tonnes par heure.

III Méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV)

III.1 Matériel

La collecte de données pour cette étude a reposé principalement sur une méthode d'Analyse Documentaire. Cette approche a permis d'exploiter les données secondaires c'est-à-dire des informations déjà collectées et consignées par d'autres, disponibles dans des sources fiables.

Les sources de données consultées étaient des rapports de diagnostic officiels produits par le projet BioStar et le Cirad et des articles scientifiques et mémoires. Ces rapports ont constitué la base de notre travail.

Aucun matériel d'enquête ou dispositif de mesure n'a été utilisé pour la phase de collecte.

III.2 Outils

Les outils utilisés sont le logiciel SimaPro, le Pack Office (Word, Excel, Powerpoint) et QGIS.

SimaPro

SimaPro, c'est un logiciel d'analyse du cycle de vie et d'empreinte carbone. C'un outil utilisé par beaucoup de professionnel et étudiants pour modéliser les impacts environnementaux des produits, services et même entreprises comme le montre la figure 11. SimaPro a pour objectif d'analyser les impacts environnementaux, tels que les émissions de gaz à effet de serre, tout au long du cycle de vie du produit c'est-à-dire de l'extraction de la matière première jusqu'à son élimination en passant par sa transformation, sa distribution et son utilisation : D'où l'approche dite du « berceau à la tombe ou Cradle-to-Gate ». Notre étude est menée selon l'approche « Gate-to-Gate » c'est-à-dire de la porte de l'usine à la sortie de l'usine.

Pour implémenter sur SimaPro, il faut tout d'abord effectuer au préalable un avant-travail détaillé qui est le bilan des flux entrants et sortants. Ensuite on doit créer le processus de fonctionnement du produit sur le logiciel et faire entrer les données préalablement faites. SimaPro va modeler ces données en intégrant des bases de données d'inventaire de cycle de vie reconnues mondialement. La base de données Ecoinvent est généralement utilisée. On peut aussi associer d'autres bases de données comme Agri-footprint. Enfin, SimaPro va évaluer les résultats en fonction des indicateurs d'impacts midpoint et endpoint.

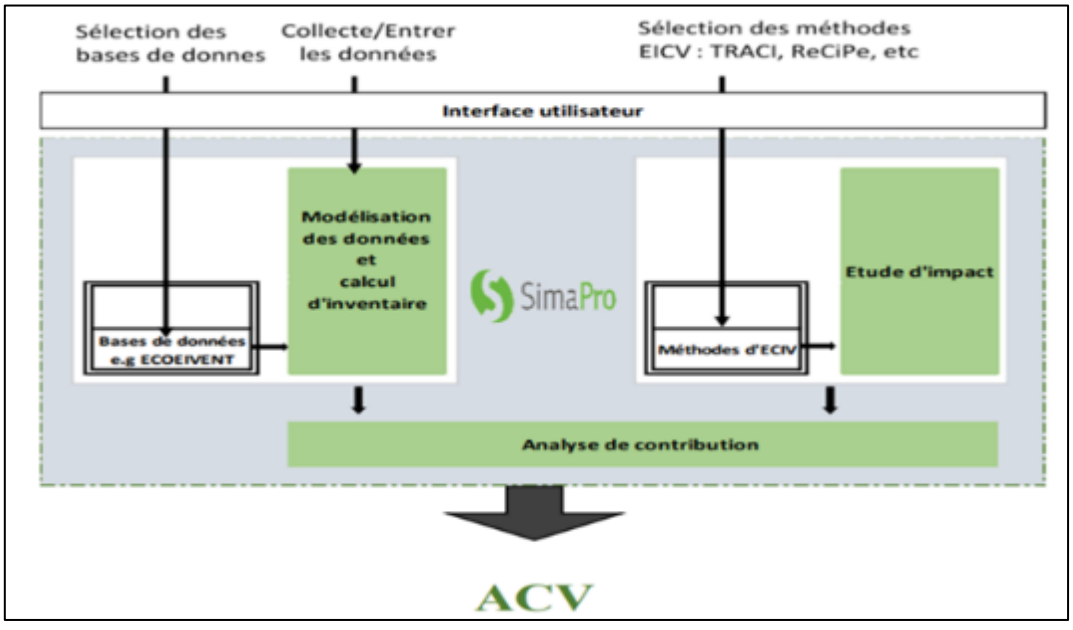


Figure 11 : ACV avec SimaPro *(El Faiz, 2020)*

III.3 Méthode d'évaluation environnementale et justification

La méthode d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une approche pour évaluer les impacts environnementaux potentiels tout au long du cycle de vie d'un produit/service et normalisée par l'ISO 14040 (ISO 14040, 2006).

Le cycle de vie d'un produit est l'ensemble des étapes que le produit traverse depuis l'obtention de la matière première jusqu'à sa fin de vie ou élimination. La figure 12 explique le déroulement du cycle de vie d'un produit.

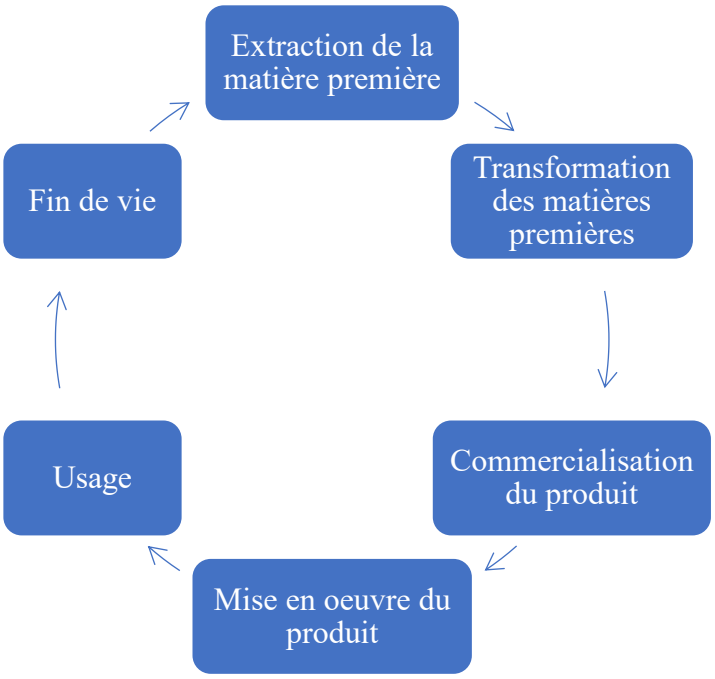


Figure 12 : Schéma du cycle de vie

Contrairement à d'autres méthodes, l'ACV ne se contente pas d'examiner une seule étape, mais analyse l'ensemble des flux de matières et d'énergie, du début à la fin. Cela garantit une compréhension complète des impacts et évite les transferts de pollution d'une étape à l'autre. L'ACV comprend quatre étapes essentielles prononcées dans la figure 13 conformément aux lignes directives de la norme ISO 14040-2006 : la définition de l'objectif et du champ d'application, l'inventaire du cycle de vie, l'évaluation de l'impact du cycle de vie et l'interprétation des résultats(Habibi et al., 2019) (Ortiz, Karina, et al., 2025).

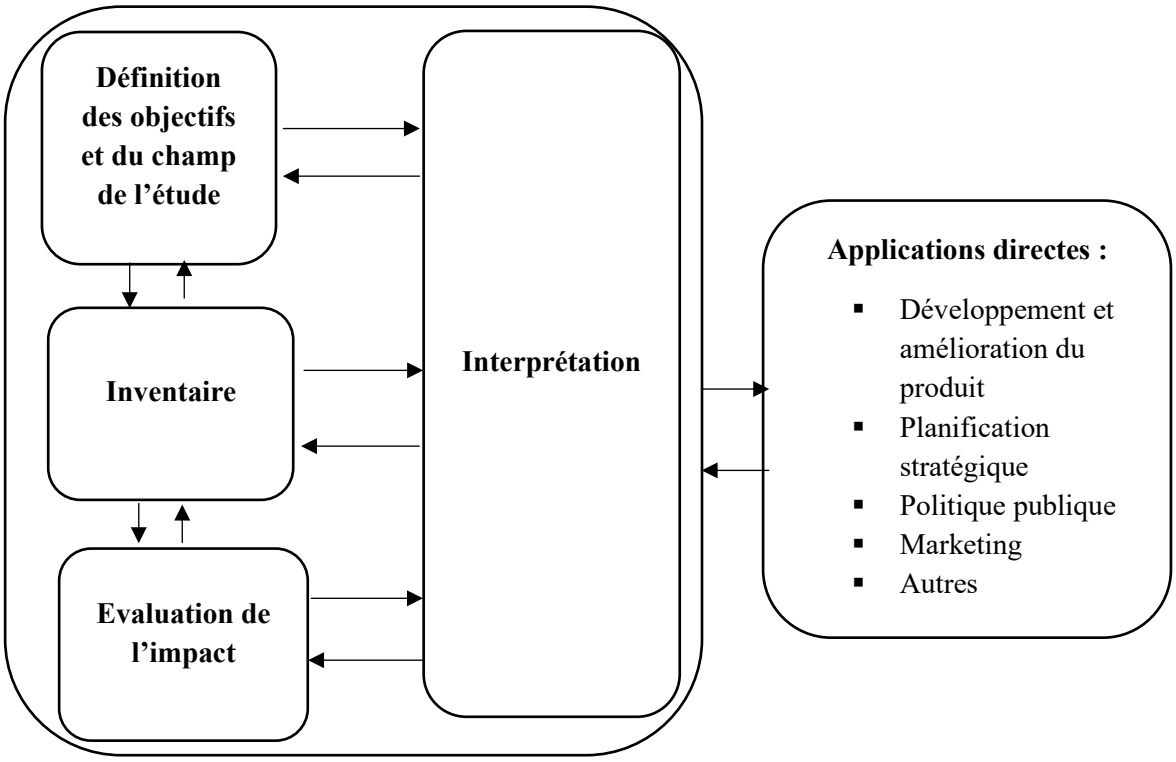


Figure 13 : Schéma des étapes de l'ACV *(El Faiz, 2020)*

L'utilisation de l'ACV se justifie pour l'étude de la transformation du riz. En effet elle permet une évaluation quantitative qui fournit des données concrètes sur les émissions de gaz à effet de serre ou sur la consommation d'énergie (17,8 MJ par kg). Ce qui rend les impacts mesurables et comparables. En plus elle donne une vision systémique qui prend en compte les interdépendances entre les différentes étapes, comme l'impact de l'étuvage sur la consommation d'énergie ou du polissage sur la production de déchets. Elle permet d'identifier les « points chauds » encore appelés hotspots environnementaux du processus de transformation. Enfin une approche scientifique et crédible qui s'appuie sur des bases de données et des méthodes d'évaluation reconnues (comme l'IPCC GWP ou l'Eco Indicator 99), l'ACV garantit la robustesse des résultats, qui peuvent être utilisés pour une communication transparente avec les clients et les partenaires.

III.4 Cadre méthodologique

III.4.1 Définition des objectifs et du champs de l'étude

Notre étude est portée sur l'analyse du cycle de vie du riz de la PME DB Foods à Thilène, au Sénégal. Cette étude a pour but d'évaluer les impacts environnementaux de la transformation du riz, avant et après l'installation du projet BioStar à DB Foods, à Thilène.

Cette étude est basée sur la chaîne de transformation du riz, de l'entrée du riz brut ou paddy dans l'usine à la sortie du produit fini. Notre unité de référence pour la mesure des impacts appelée unité fonctionnelle est de **1tonne de riz paddy**. Toutefois, notre système est limité car l'étude se concentre principalement sur les opérations à l'intérieur de l'usine, selon l'approche « Gate to Gate »(Giuliana et al., 2024) comme l'explique la figure 14. Cela inclut toutes les étapes, du séchage du riz brut à l'emballage du produit final, tout en excluant la phase agricole et la distribution.

- Les principaux cycles de vie des flux de matières premières et des cycles de vie de l'énergie (par exemple, la production d'électricité) associés au procédé sont hautement pris en compte.
- Chaque cycle de vie de processus généré lors de l'étape de fabrication est pris en compte.
- Les cycles de vie initiaux des équipements utilisés pour le processus de fabrication sont exclus.
- Les cycles de vie des matériaux auxiliaires consommés en faibles quantités sont négligés (Exemple : les matériaux d'emballage et de conditionnement).
- Les cycles de vie des infrastructures sont négligés (Thengane et al., 2020) (Exemple : télécommunications, fournitures de bureau ou papeterie).

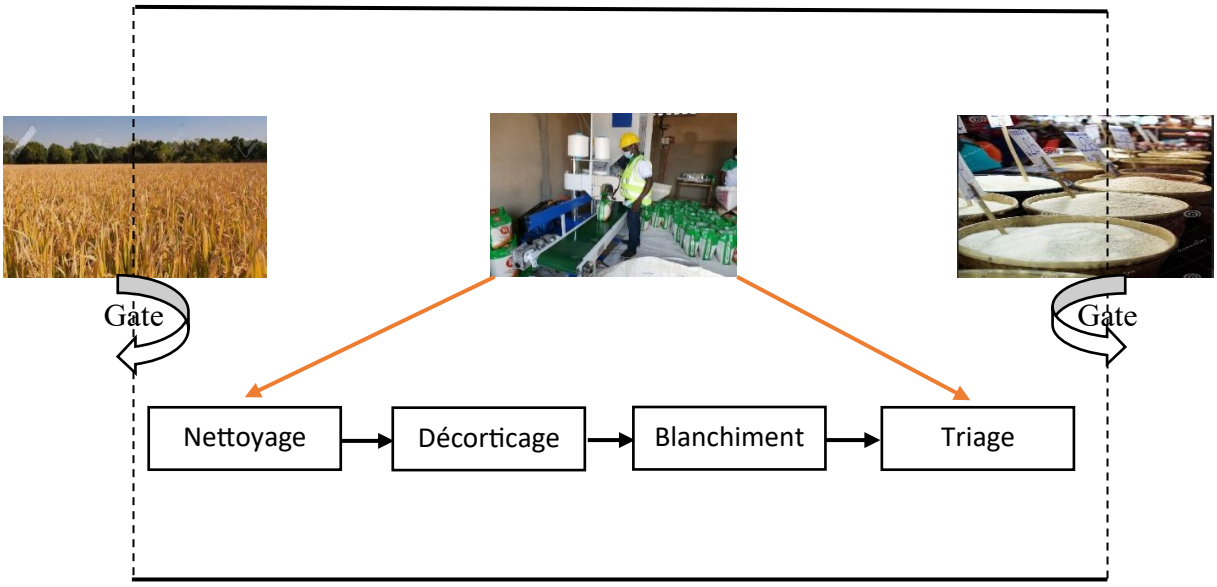


Figure 14 : Limite du système

III .4.2 Inventaire du cycle de vie (ICV)

III.4.1.1 Source de données

Les données de notre travail sont issues des rapports de diagnostic, du document de normalisation AFNOR, des fiches techniques de la PME DB Foods, de gazéification, et des articles et documents scientifiques.

III.4.1.2 Inventaire du cycle de vie (ICV)

L'ICV est le cœur de l'étude. L'inventaire du cycle de vie est la collecte de données comprenant toutes les matières premières, les énergies et toutes les données connexes d'entrée du système. Avant la collecte des données, les inventaires ont été préparés sur la base du diagramme de flux du processus. Les données de l'inventaire du cycle de vie ont été recueillies auprès de l'usine de rizerie DB Foods.

Les cycles de vie en amont des ressources telles que l'électricité et les combustibles doivent être pris en compte. Cependant DB Foods n'utilise pas de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel).

Ainsi les tableaux 4 et 5 suivants présentent l'inventaire détaillé du cycle de vie avant et après l'installation de la technologie BioStar.

Tableau 4 : Flux entrants et sortants dans SimaPro avant l'installation des technologie BioStar

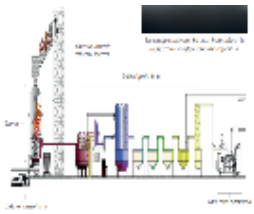
OU1 : Séchage 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Matière première	Riz paddy	t	1
	Energie thermique	Energie thermique pour alimenter la chaudière	kWh	0,36
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit sortant	Riz paddy	t	1
OU2 : Pré-nettoyage circulaire 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Matière première	Riz paddy	t	1
	Energie électrique	Electricité	kWh	0,72
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit sortant	Riz paddy	t	1
OU3 : Pré-nettoyage plat 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Matière première	Riz paddy	t	1
	Energie électrique	Electricité	kWh	0,35
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit sortant	Riz paddy	t	1
OU4 : Epierrage 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Matière première	Riz paddy	t	1
	Energie électrique	Electricité	kWh	0,72
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit sortant	Riz paddy	t	1
OU5 : Décorticage	Inputs			

	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Matière première	Riz paddy	t	1
	Energie électrique	Electricité	kWh	3,58
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Déchet	Balle de riz	t	0,2
	Produit sortant	Riz cargo	t	0,8
OU6 : Tri densimétrique 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit entrant	Riz cargo	t	0,8
	Energie électrique	Electricité	kWh	0,72
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit sortant	Riz cargo trié	t	0,8
OU7 : Blanchiment 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit entrant	Riz cargo trié	t	0,8
	Energie électrique	Electricité	kWh	24,82
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Résidus	Son	t	0,08
	Produit sortant	Riz blanc	t	0,72
OU8 : Polissage 	Input			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit entrant	Riz blanc	t	0,72
	Energie électrique	Electricité	kWh	10,50
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit sortant	Riz blanc	t	0,72
OU9 et OU10 : Tri rotatif et alvéolaire	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit entrant	Riz blanc	t	0,72
	Energie électrique	Electricité	kWh	1,79

	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit sortant	Riz blanc	t	0,72
OU11 : Tri colorimétrique 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit entant	Riz blanc	t	0,72
	Energie électrique	Electricité	kWh	1,15
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit fini	Riz blanc	t	0,72

Tableau 5 : Flux entrants et sortants dans SimaPro après l'installation des technologies BioStar

OU1 : Séchage 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Matière première	Riz paddy	t	1
	Energie	Chaleur de gazéification pour alimenter la chaudière	kWh	0,36
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit sortant	Riz paddy	t	1
OU2 : Pré-nettoyage circulaire 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Matière première	Riz paddy	t	1
	Energie	Electricité issue de la gazéification	kWh	0,72
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité

	Produit sortant	Riz paddy	t	1
OU3 : Pré-nettoyage plat 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Matière première	Riz paddy	t	1
	Energie	Electricité issue de la gazéification	kWh	0,35
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit sortant	Riz paddy	t	1
OU4 : Epierrage 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Matière première	Riz paddy	t	1
	Energie	Electricité issue de la gazéification	kWh	0,72
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit sortant	Riz paddy	t	1
OU5 : Décorticage 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Matière première	Riz paddy	t	1
	Energie	Electricité issue de la gazéification	kWh	3,58
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Déchet	Balle de riz	t	0,2
	Produit sortant	Riz cargo	t	0,8
Gazéification 	Input			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit entrant	Balle de riz	t	0,2
	Produit entrant	Eau	l	21
	Output			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit sortant	Syngaz	m^3	18,016

	Déchet	Biochar	t	0,06
OU6 : Tri densimétrique 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit entrant	Riz cargo	t	0,8
	Energie	Electricité issue de la gazéification	kWh	0,72
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit sortant	Riz cargo trié	t	0,8
OU7 : Blanchiment 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit entrant	Riz cargo trié	t	0,8
	Energie	Electricité issue de la gazéification	kWh	24,82
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Résidus	Son	t	0,08
	Produit sortant	Riz blanc	t	0,72
OU8 : Polissage 	Input			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit entrant	Riz blanc	t	0,72
	Energie	Electricité issue de la gazéification	kWh	10,50
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit sortant	Riz blanc	t	0,72
OU9 et OU10 : Tri rotatif et alvéolaire 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit entrant	Riz blanc	t	0,72
	Energie	Electricité issue de la gazéification	kWh	1,79
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité

	Produit sortant	Riz blanc	t	0,72
OU11 : Tri colorimétrique 	Inputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit entant	Riz blanc	t	0,72
	Energie	Electricité issue de la gazéification	kWh	1,15
	Outputs			
	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
	Produit fini	Riz blanc	t	0,72

III.4.3 Evaluation des impacts du cycle de vie (EICV)

Dans cette étape, les données de l'ICV sont converties en impacts environnementaux concrets. Il faut alors :

- Utiliser un logiciel spécialisé, tel que **SimaPro** pour modéliser le système et calculer les impacts en utilisant des méthodes reconnues. Il existe plusieurs méthodes dont la méthode Environmental Footprint, la méthode AWARE, la méthode ReCiPe 2016, la méthode IPCC, etc.
- Catégoriser les impacts, c'est-à-dire présenter les résultats sous forme d'indicateurs d'impact, notamment en midpoints qui quantifient les impacts à un niveau intermédiaire comme le changement climatique, l'acidification et l'eutrophisation, et en endpoints qui poursuivent le calcul pour évaluer les dommages potentiels sur des objectifs de protection tels que la santé humaine, la biodiversité et rareté des ressources.

Dans notre cas, nous allons utiliser la méthode **ReCiPe 2016 H** (Hiérarchique) qui est la méthode de référence au niveau mondial pour les systèmes agro-industriels. Elle permet de traduire des données techniques complexes (comme les émissions de gaz de votre gazéifieur) en impacts compréhensibles et couvre à la fois les impacts toxiques, les ressources et le climat. Aussi, inclut-elle des facteurs de caractérisation qui fonctionnent mieux pour des contextes hors Europe, comme l'Afrique de l'Ouest.

Les indicateurs d'impact sont :

i. Les indicateurs d'impact midpoints

- Réchauffement climatique ;
- Fines particules ;
- Acidification terrestre ;
- Ecotoxicité terrestre ;
- Toxicité humaine non cancérogène ;
- Consommation d'eau ;
- Formation d'ozone

ii. Les indicateurs d'impact endpoints

- Ecosystème
- Santé humaine
- Ressource

La figure 15 ci-contre donne un résumé global des étapes de l'EICV.

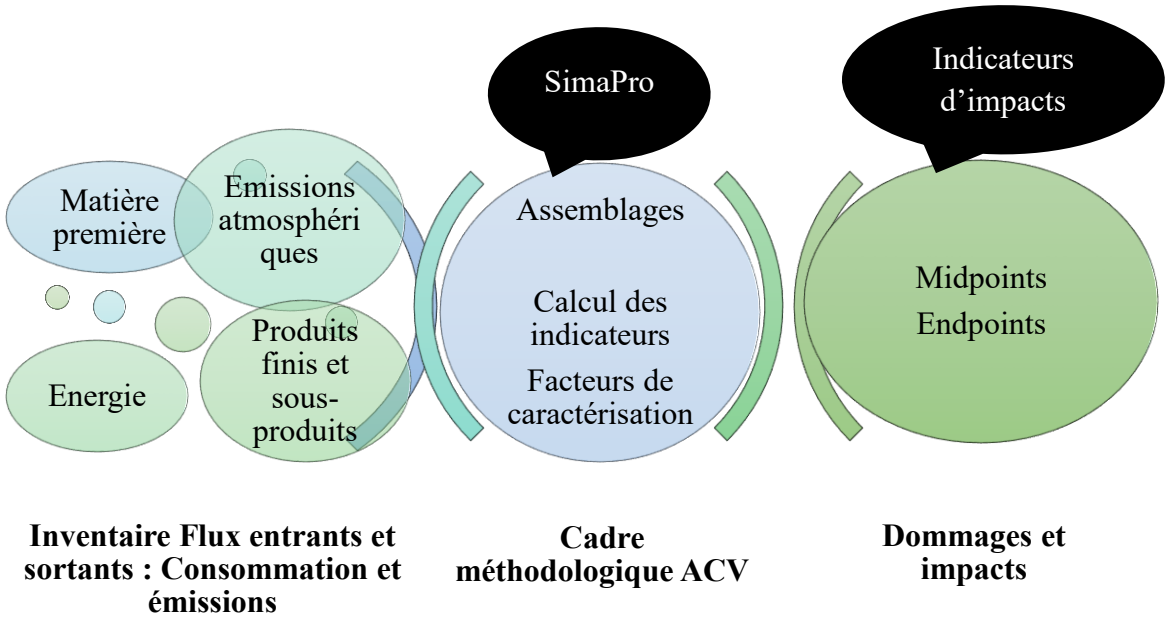


Figure 15 : Résumé de l'EICV

III.4.4 **Interprétation des résultats**

L'interprétation est la phase de l'ACV au cours de laquelle les résultats de l'inventaire et de l'évaluation de l'impact sont combinés.

La phase d'interprétation doit délivrer des résultats cohérents, des objectifs et le champ de l'étude bien définis.

IV. Résultats

IV.1 Résultats de la caractérisation des dommages midpoint

La figure 16 ci-contre détaille la contribution de chaque étape du procédé aux impacts environnementaux avant et après l'installation de la technologie BioStar.

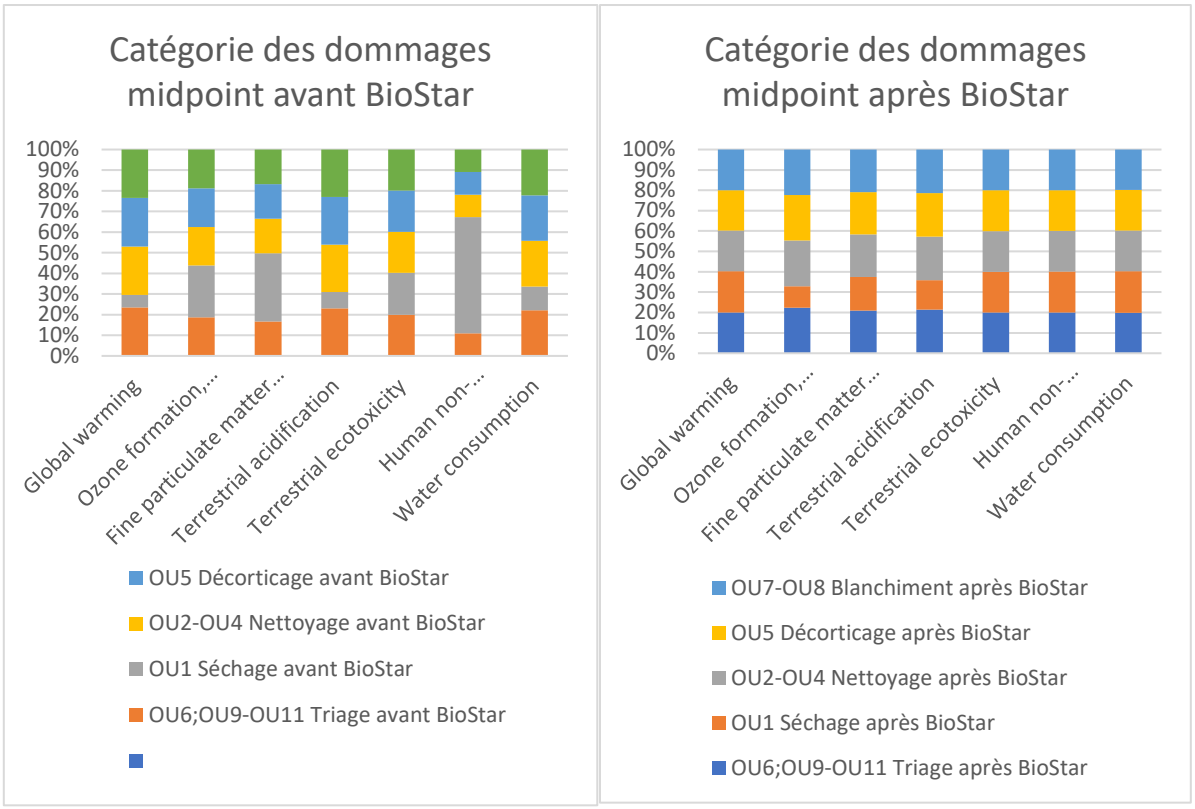


Figure 16 : Contribution relative des différentes opérations unitaires de la transformation du riz avant et après BioStar via la méthode ReCiPe 2016 Midpoint (H) de l'entreprise DB Foods

On constate avant l'installation de BioStar que les contributions des différentes opérations unitaires varient d'une catégorie d'impact à l'autre. L'étape du séchage a une grande contribution au niveau de la toxicité humaine et des fines particules. Cela s'explique par une combustion incomplète de la balle de riz dans la chaudière. En effet, une combustion incomplète de la balle de riz libère des microparticules dans l'air qui, inhalées provoquent des problèmes respiratoires. Le blanchiment a un impact sur toutes les catégories, montrant une forte consommation d'énergie (24,82 kWh/t). Le réseau national est alimenté par plusieurs centrales thermiques qui brulent avec des combustibles fossiles tels que le fioul lourd, le diesel, le gaz naturel ou le charbon. Les machines de transformant étant connectées au réseau national, cela pollue indirectement l'environnement. Le décorticage, le nettoyage et le triage ont aussi un impact significatif sur les catégories d'impact dû à la consommation élevée d'énergie (3,58 kWh, 1,79 kWh, 0,36 kWh).

Après l'installation de la gazéification, on remarque que les contributions des opérations unitaires sont presque constantes sur toutes les catégories d'impact et tendent à se stabiliser à

20%. Cela montre que les machines sont toutes alimentées par une source d'énergie de biomasse qui impacte moins l'environnement.

IV.2 Résultats de la caractérisation des dommages endpoint

La figure 17 suivante montre le graphique de l'évaluation des impacts environnementaux endpoint c'est-à-dire les impacts sur la santé, la ressource et l'écosystème avant et après l'installation de la technologie BioStar.

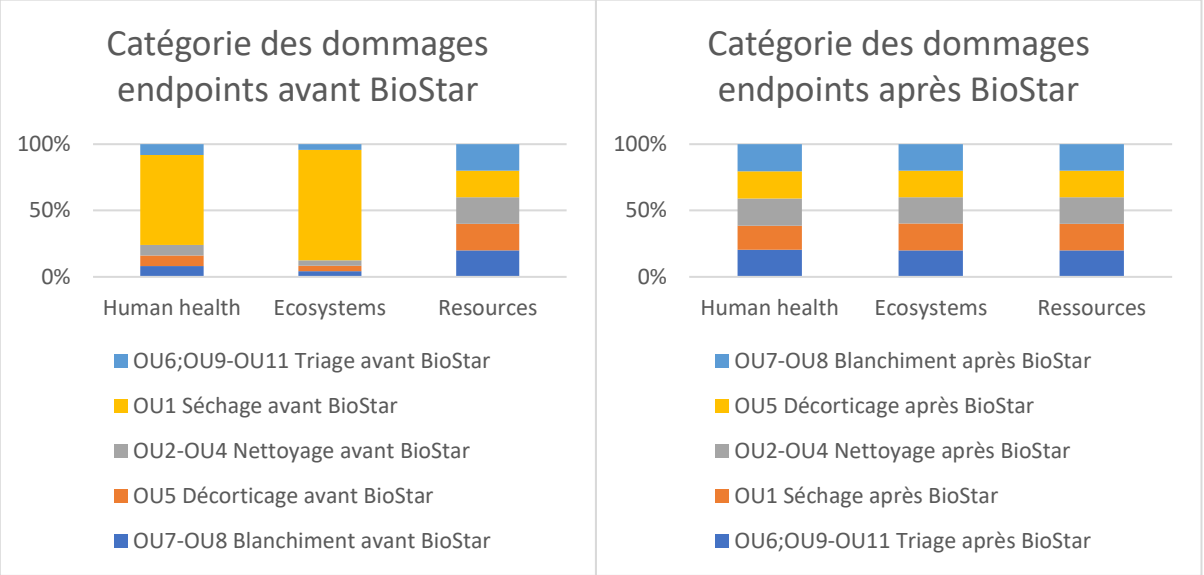


Figure 17 : Contribution relative des différentes opérations unitaires de la transformation du riz avant et après BioStar via la méthode ReCiPe 2016 Endpoint (H) de l'entreprise DB Foods

L'analyse de ces deux graphiques montre qu'avant BioStar, le séchage a beaucoup d'impact sur la santé humaine et l'écosystème. Cela s'explique par le fait que la chaudière soit alimentée par la balle de riz. La balle de riz, riche en silice, entre en combustion dans la chaudière. Si cette combustion est mal maitrisée ou incomplète, libère des microparticules de silice et des particules inorganiques telles que le sulfates, le chlorure et les sels de potassium, nuisibles à l'homme et à l'écosystème. Les autres étapes ont très peu d'impacts sur la santé humaine et l'écosystème.

L'analyse montre qu'avec l'installation de BioStar, les contributions des étapes sont constantes et proportionnelles sur chaque catégorie d'impacts. Cela montre que l'installation de la gazéification a eu un impact positif sur le site de DB Foods car elle a réduit et maintenu les impacts constants.

IV.3 Comparaison des résultats de la caractérisation midpoint avant et après BioStar

Les figures 18, 19 et 20 représentent la comparaison des résultats à court terme d'avant et après l'installation de la gazéification à DB Foods.

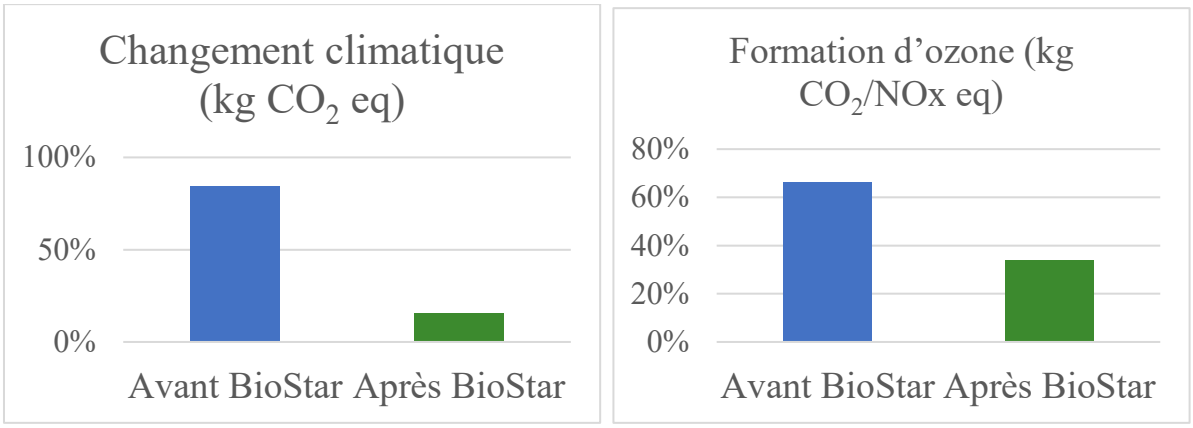


Figure 18 : Comparaison des résultats avant et après l'installation de la gazéification des indicateurs changement climatique et formation d'ozone

Interprétation : Nous constatons une baisse des émissions au niveau du changement climatique et de la formation d'ozone due à la substitution de l'énergie fossile par une énergie renouvelable issue de la valorisation énergétique de la biomasse passant ainsi de 42,47 kg CO2 eq à 7,78 kg CO2 eq soit une réduction 81,68%.

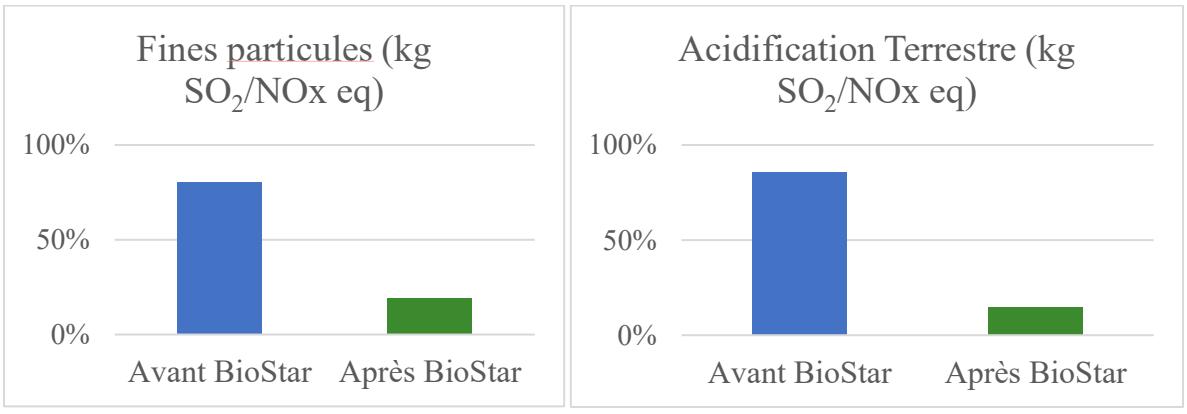


Figure 19 : Comparaison des résultats avant et après l'installation de la gazéification des indicateurs fines particules et acidification terrestre

Interprétation : Nous remarquons une réduction des particules et de l'acidification due au traitement de gazéification qui permet de réduire les émissions de particules contrairement à la combustion (balle de riz, carburant fossile).

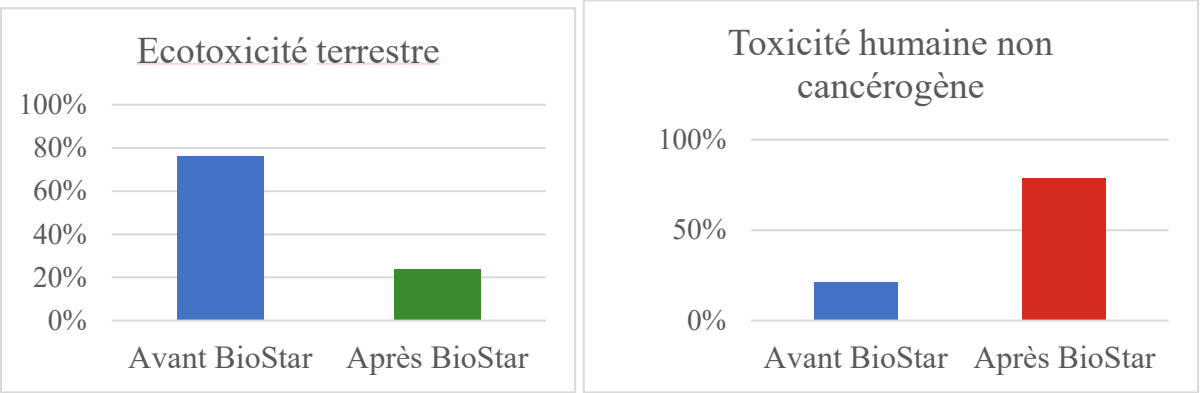


Figure 20 : Comparaison des résultats avant et après l'installation de la gazéification des indicateurs écotoxicité terrestre et toxicité humaine non cancérogène

Interprétation : Nous constatons également une baisse au niveau de l'écotoxicité terrestre. Cependant, une évolution de l'impact est observée après BioStar au niveau de la toxicité humaine non cancérogène. Cela est dû à une génération de métaux lourds et des composés volatils.

IV.4 Comparaison des résultats de la caractérisation endpoint avant et après BioStar

Les figures 21, 22 et 23 représentent la comparaison des résultats sur le long terme avant et après l'installation de la gazéification à DB Foods.

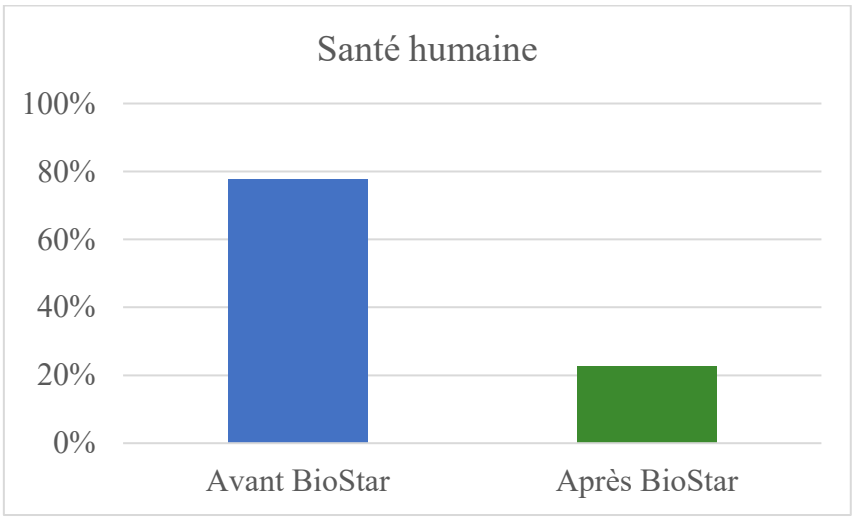


Figure 21: Comparaison des résultats avant et après l'installation de la gazéification de l'indicateur santé humaine

Interprétation : On constate une réduction des impacts due à la diminution des émissions de substances chimiques telles que le CO_2, SO_2, NO_x.

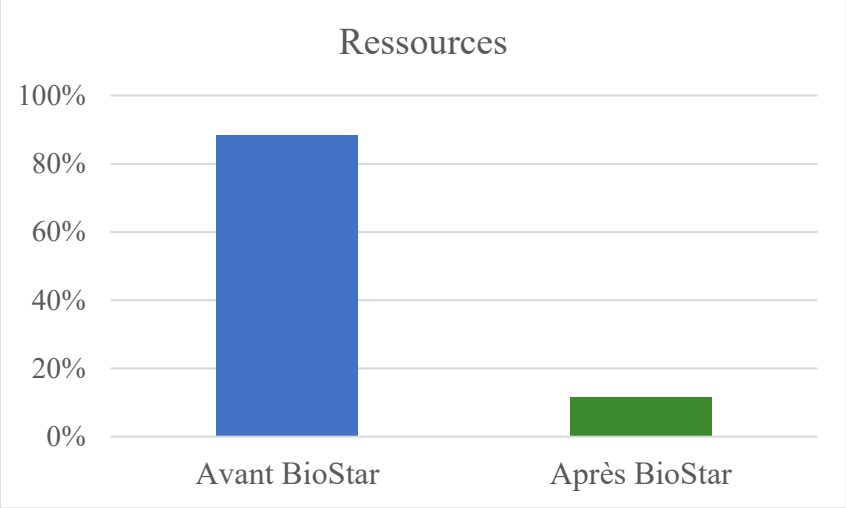


Figure 22: Comparaison des résultats avant et après l'installation de la gazéification de l'indicateur ressource

Interprétation : On remarque qu'il y'a baisse des impacts car il y'a eu substitution de l'énergie fossile par de la biomasse (balle de riz) qui est une matière renouvelable.

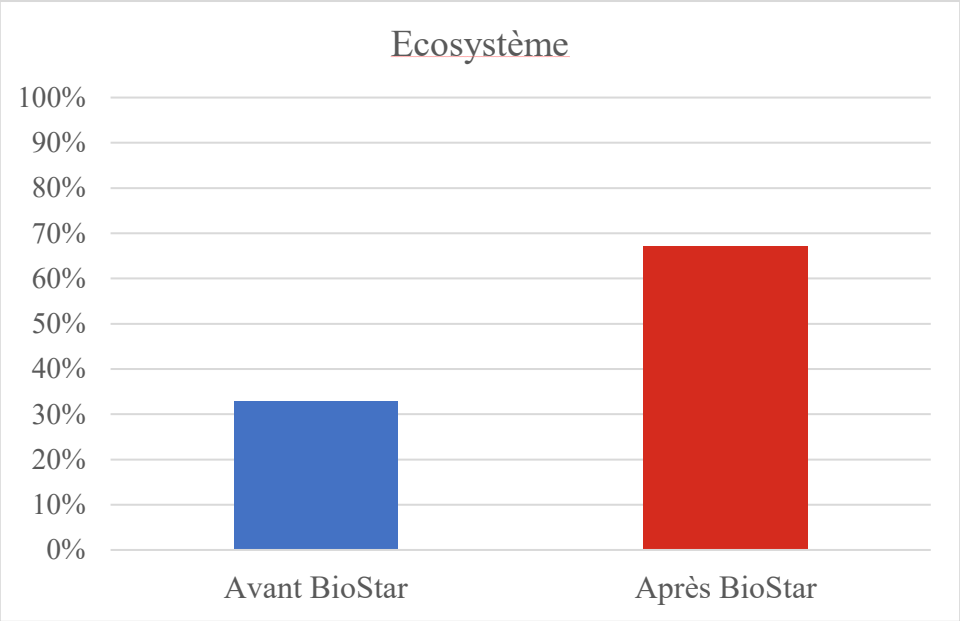


Figure 23 : Comparaison des résultats avant et après l'installation de la gazéification de l'indicateur santé humaine

Interprétation : On remarque une évolution de l'impact sur l'écosystème après l'installation de la gazéification. En effet, les eaux issues du traitement du gaz de synthèse sont fortement chargées en phénol, en ammoniac et en sulfure. Leur rejet entraine une forte écotoxicité pour l'écosystème.

Le tableau 6 présente les émissions de gaz avant et après l'installation de la gazéification.

Tableau 6 : Synthèse comparative des émissions

Substances	Avant BioStar	Après BioStar	Evolution
CO_2 (kg CO_2 eq)	42,47	7,78	Forte baisse de 81,68%
SO_2 (kg SO_2 eq)	0,28	0,04	Forte baisse de 85,71%
NO_x (kg NO_x eq)	0,1	0,08	Baisse légère de 20%
DCB	7	25,59	Augmentation de 72,65%

La gazéification a eu un impact positif sur la chaine de transformation de la PME. Cependant, cette gazéification a des limites. La DCB a augmenté considérablement après la substitution de l'électricité du réseau national par la gazéification. Cela est dû à l'utilisation de certaines données dans Ecoinvent qui ne reflètent pas les réalités du Sénégal.

V. Perspectives et recommandations

Les différentes recommandations à l'issue de l'analyse du cycle de vie réalisée, visent à améliorer la performance environnementale et opérationnelle de la PME DB Foods. En effet, il faut tout d'abord mettre en place une filière de valorisation du biochar comme amendement organique pour les sols rizicoles locaux, créant ainsi une économie circulaire. Également, il est essentiel de réaliser une potentielle ACV complète intégrant la phase de production agricole. Une étude d'impact environnemental des différents types d'emballages utilisés par DB Foods est aussi envisageable et faire des propositions alternatives biodégradables ou recyclables. Enfin, il faut compléter l'ACV environnementale par une Analyse du Coût du Cycle de Vie (ACCV) pour démontrer la rentabilité économique de la technologie BioStar par rapport aux coûts de l'électricité du réseau.

Conclusion

L'objectif principal de ce travail était d'évaluer, par la méthode de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), l'impact environnemental de la transformation du riz au sein de la PME Doing Better Foods (DB Foods) au Sénégal, dans le cadre du projet BioStar. Cette étude a permis de quantifier les bénéfices environnementaux liés à l'installation d'une centrale de gazéification alimentée par les balles de riz pour la production d'énergie selon l'approche Gate-to-Gate. Les résultats de l'évaluation sur SimaPro montrent que le processus de transformation est impacté par l'électricité du réseau national sénégalais. Par contre, la solution BioStar a réduit fortement l'impact sur presque toutes les catégories :

Avant BioStar, la contribution des opérations unitaires était énorme et variait d'une catégorie d'impact à une autre. Mais après l'implantation de la gazéification par BioStar, l'impact a été réduit : le SO_2 réduit de 85,71%, le CO_2 de 81,68% et le NO_X de 20%. Ce qui démontre l'efficacité de gazéification comme énergie du site de transformation.

Cependant, il y'a eu une évolution du DCB avec la gazéification, ce qui signifie que la gazéification a aussi un point négatif sur la chaine de production.

En somme, la substitution de l'énergie fossile qui est dans notre cas le réseau national du Sénégal par l'énergie issue de la biomasse, la balle de riz, a nettement amélioré le bilan carbone sur l'environnement. La technologie de gazéification a diminué l'impact environnemental de la transformation du riz sur le site de BioStar. Sachant que la maintenance technique reste un défi majeur, il faut noter que la valorisation de la biomasse agricole favorise une autonomie énergétique et une réduction des impacts environnementaux.

La valorisation de la biomasse est indispensable pour une durabilité des PME agroalimentaires aussi bien au Sénégal qu'en Afrique de l'Ouest.

Bibliographie

1) Agriculture et Développement rural. (2006). *Le marché du riz au Sénégal*. https://www.rural21.com/fileadmin/_migrated/content_uploads/ELR_Le_marche_du_riz_au_Senegal_0106.pdf
2) BAD. (2025). *RENFORCEMENT DE L'ADAPTATION DES CHAÎNES DE VALEUR RIZICOLES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN AFRIQUE DE L'OUEST (« REWARD-Adaptation »)*. https://www.afdb.org/sites/default/files/documents/projects-and-operations/africarice_centre_du_riz_pour_lafrique_-_renforcement_de_ladptation_des_chaines_de_valeur_rizicoles_au_changement_climatique_en_afrique_de_louest_reward_adaptaion.pdf
3) BioStar. (2026). *Fiche technique de DB Foods*. https://www.biostar-afrique.org/content/download/7021/51507/version/3/file/Fiche+technique_centrale+par+gazeification+balles+de+riz.pdf
4) Diallo, M. F. (2023). *Révolutionner la riziculture au Sénégal : Le potentiel inexploité des subventions aux intrants et leur impact sur la productivité des agriculteurs*.
5) ecoQuery. (2025). *Heat and power co-generation, biogas, gas engine, renewable energy products—Switzerland—Electricity, high voltage, renewable energy products | ecoQuery*. https://ecoquery.ecoinvent.org/3.12/cutoff/dataset/512/documentation
6) El Faiz, M. E. (2020). *Analyse du cycle de vie à l'aide du logiciel SimaPro*.
7) Fall, A. A. (2016). *SYNTHESE DES ETUDES SUR L'ETAT DES LIEUX CHAINE DE VALEUR RIZ EN AFRIQUE DE L'OUEST : BENIN, BURKINA FASO, MALI, NIGER ET SENEGAL*.
8) Giuliana, V., Lucia, M., Marco, R., & Simone, V. (2024). Environmental life cycle assessment of rice production in northern Italy : A case study from Vercelli. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *29*(8), 1523-1540. https://doi.org/10.1007/s11367-022-02109-x

9) Habibi, E., Niknejad, Y., Fallah, H., Dastan, S., & Tari, D. B. (2019). Life cycle assessment of rice production systems in different paddy field size levels in north of Iran. *Environmental monitoring and assessment*, *191*(4), 202.

10) ISO 14040. (2006). *Environmental management_Life cycle assessment_Principles and framework* (ISO 14040:2006 (E); iTech STANDARD PREVIEW).

11) Lamas, G. C. (2024). *Assessment of co-gasification of municipal solid waste and torrefied urban forest waste : A life cycle assessment perspective*.

12) MAERSA. (2022). *STRATEGIE NATIONALE DEVELOPPEMENT DE LA RIZICULTURE SENEGALAISE (2020-2030)*. MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE L'EQUIPEMENT RURAL ET DE LA SOUVERAINETE ALIMENTAIRE. https://riceforafrica.net/wp-content/uploads/2023/06/senegal_nrds2.pdf

13) Ortiz, O. A., Karina, A. O., & Riosa, L. A. (2025). *Life Cycle Assessment of a Novel Process for the Production of Synthetic Natural Gas from Empty Fruit Bunches*.

14) Ortiz, O. A., Ojeda Karina A., & Rios Luis A. (2025). Life Cycle Assessment of a Novel Process for the Production of Synthetic Natural Gas from Empty Fruit Bunches. *Chemical Engineering Transactions*, *117*, 85-90. https://doi.org/10.3303/CET25117015

15) Piriou, B., Kontao, O., & Diouf, D. (2023). *Diagnostique de DB Foods*. CIRAD.

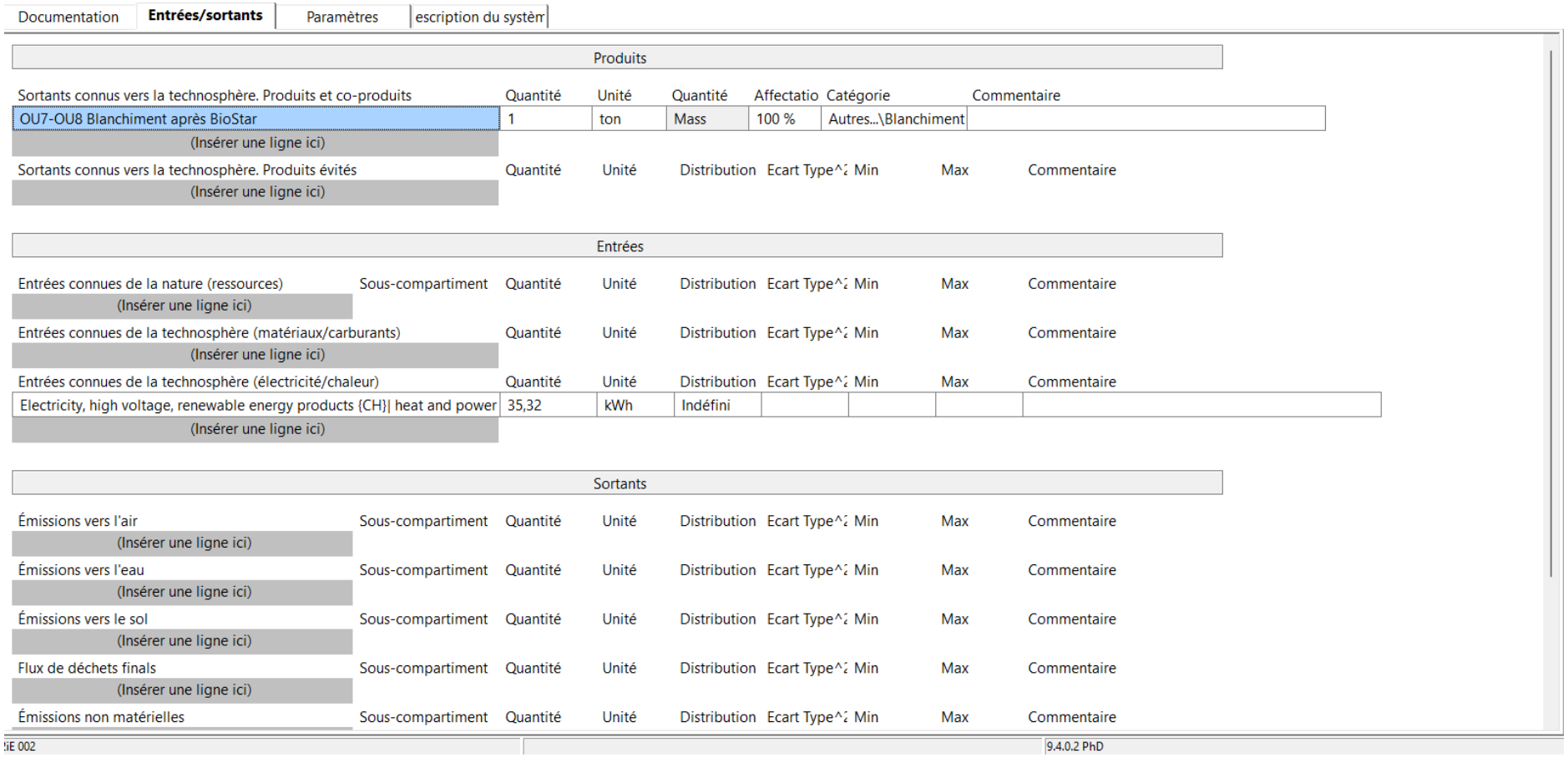
16) Ridwan, M., Setyono, P., & Budiastuti, M. T. S. (2026). *Paraffin-Olefin Content Analysis and Potential Solutions of Tar from Municipal Solid Waste Gasification Process in Indonesia*.

17) SAWADOGO, D., AROUNA, A., & OUEDRAOGO, S. (2020). *African Journal of Agricultural and Resource Economics*. *15*(3), 244-259.

18) Thengane, S. K., Burek, J., Kung, K. S., Ghoniem, A. F., & Sanchez, D. L. (2020). Life cycle assessment of rice husk torrefaction and prospects for decentralized facilities at rice mills. *Journal of Cleaner Production*, *275*, 123177. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123177

19) YAO, E., KARIDIOULA, K., & GREMBERT, O. (2023). *Réalisation d'une centrale d'autoproduction d'électricité basée sur la gazéification de balle de riz au sein de l'usine de transformation DB FOODS*. IED Invest.

Annexes



Documentation | **Entrées/sortants** | Paramètres | escription du systèm

Produits

Sortants connus vers la technosphère. Produits et co-produits	Quantité	Unité	Quantité	Affectatio	Catégorie	Commentaire
OU7-OU8 Blanchiment après BioStar	1	ton	Mass	100 %	Autres...\Blanchiment	
(Insérer une ligne ici)						

Sortants connus vers la technosphère. Produits évités	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type^2	Min	Max	Commentaire
(Insérer une ligne ici)							

Entrées

Entrées connues de la nature (ressources)	Sous-compartiment	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type^2	Min	Max	Commentaire
(Insérer une ligne ici)								

Entrées connues de la technosphère (matériaux/carburants)	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type^2	Min	Max	Commentaire
(Insérer une ligne ici)							

Entrées connues de la technosphère (électricité/chaleur)	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type^2	Min	Max	Commentaire
Electricity, high voltage, renewable energy products {CH}| heat and power	35,32	kWh	Indéfini				
(Insérer une ligne ici)							

Sortants

Émissions vers l'air	Sous-compartiment	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type^2	Min	Max	Commentaire
(Insérer une ligne ici)								

Émissions vers l'eau	Sous-compartiment	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type^2	Min	Max	Commentaire
(Insérer une ligne ici)								

Émissions vers le sol	Sous-compartiment	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type^2	Min	Max	Commentaire
(Insérer une ligne ici)								

Flux de déchets finals	Sous-compartiment	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type^2	Min	Max	Commentaire
(Insérer une ligne ici)								

Émissions non matérielles	Sous-compartiment	Quantité	Unité	Distribution	Ecart Type^2	Min	Max	Commentaire

:iE 002 9.4.0.2 PhD

Figure 24 : Implémentation de données de l'étape du blanchiment sur SimaPro après BioStar

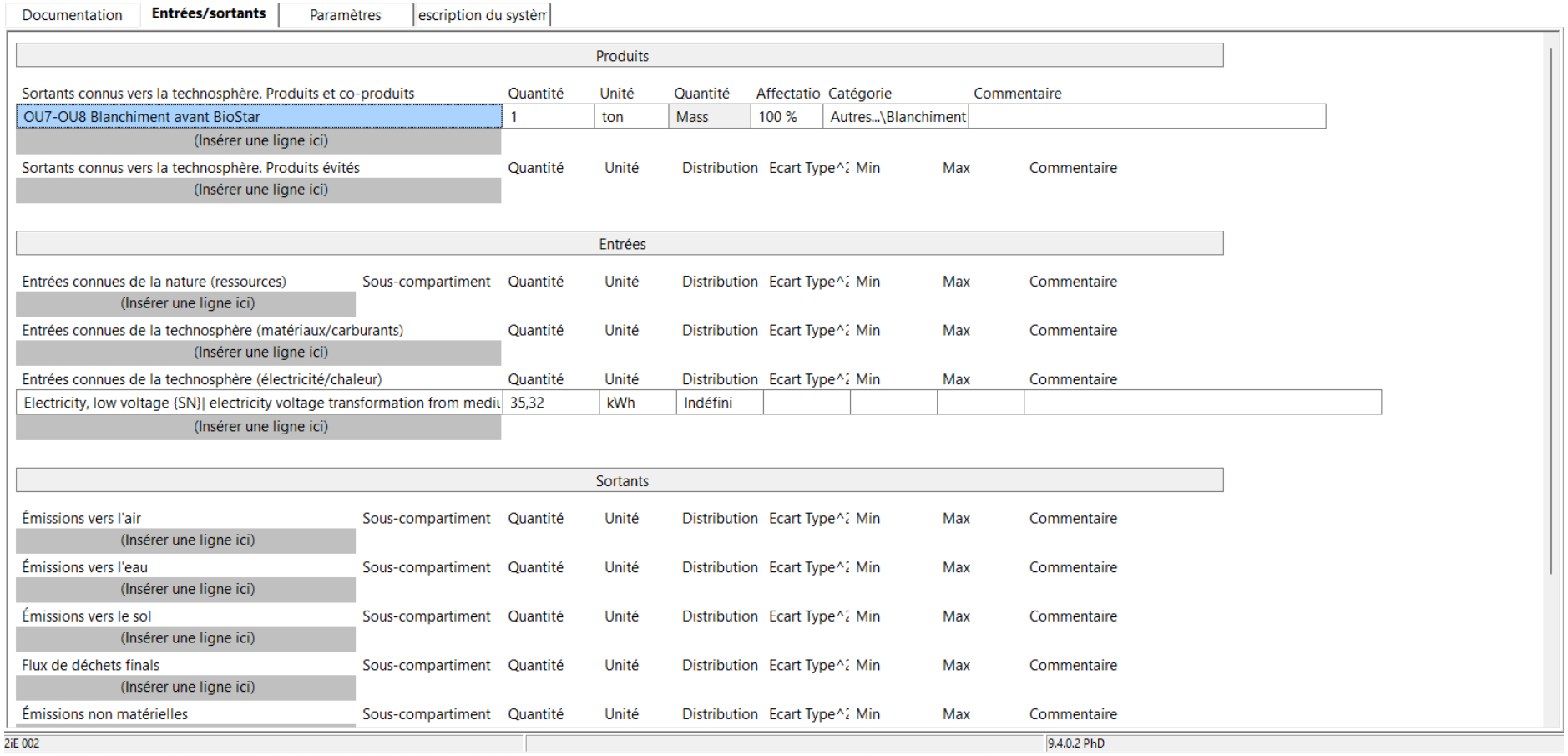


Figure 25 : Implémentation de données de l'étape du blanchiment sur SimaPro avant BioStar

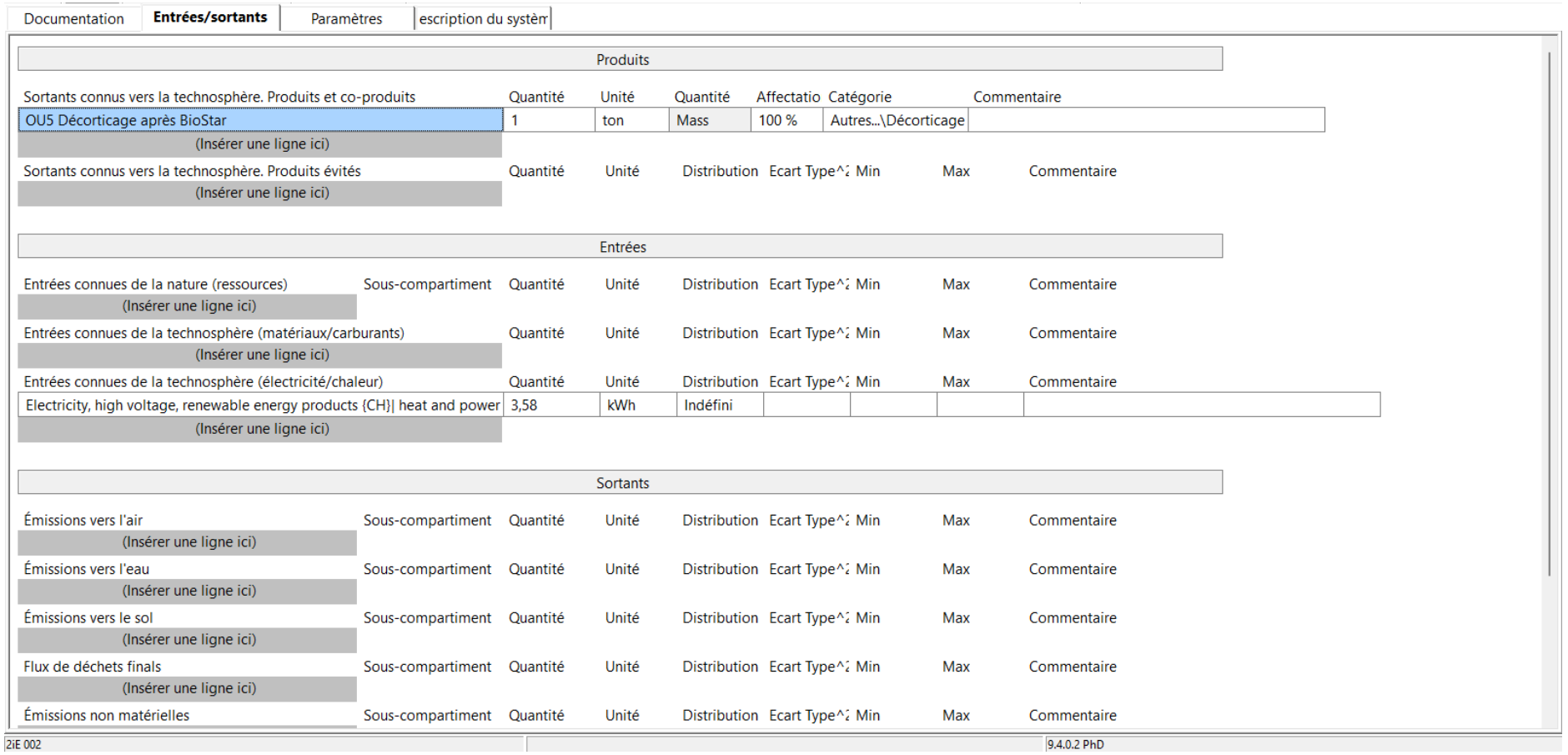


Figure 26 : Implémentation de données de l'étape du décorticage sur SimaPro après BioStar

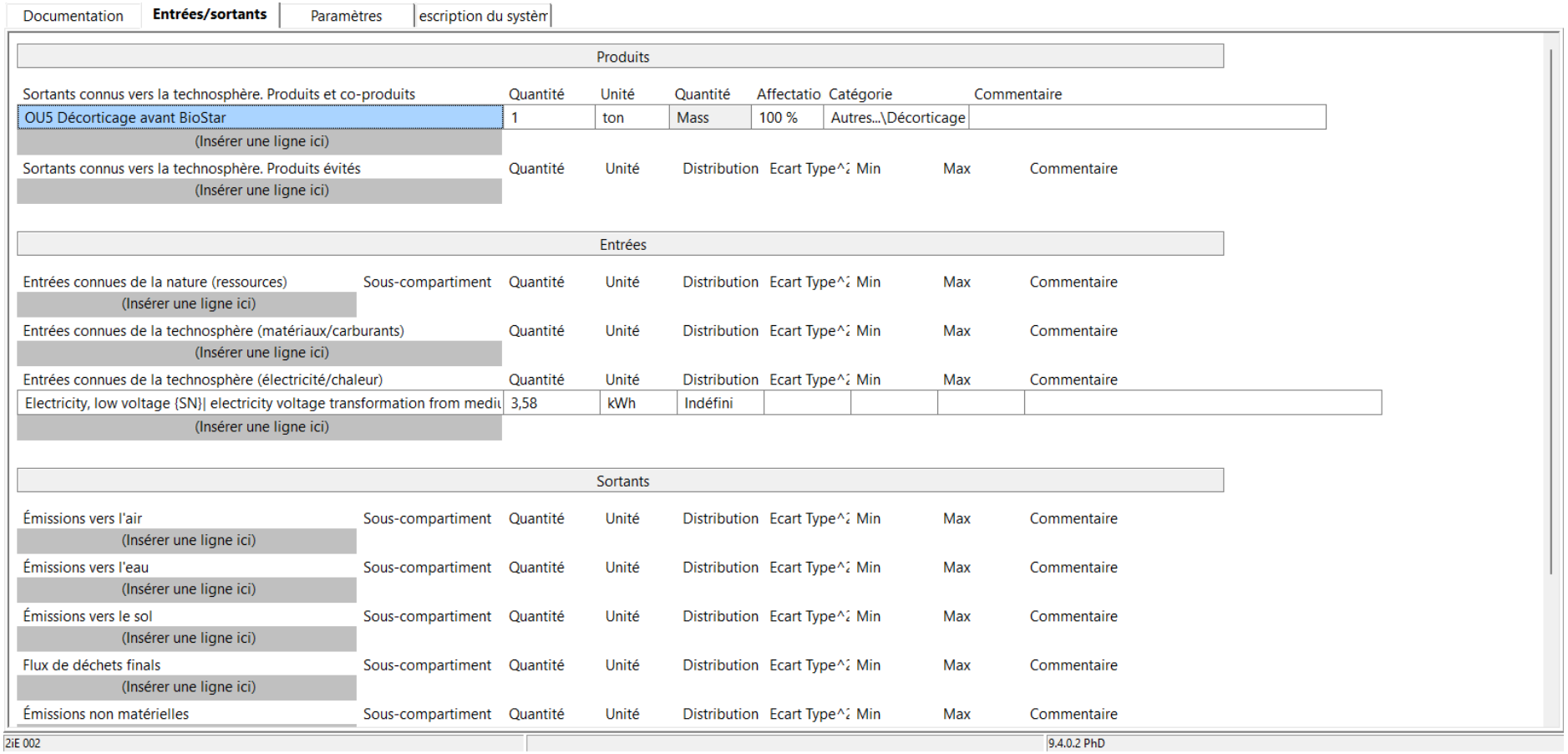


Figure 27 : Implémentation de données de l'étape du décorticage sur SimaPro avant BioStar

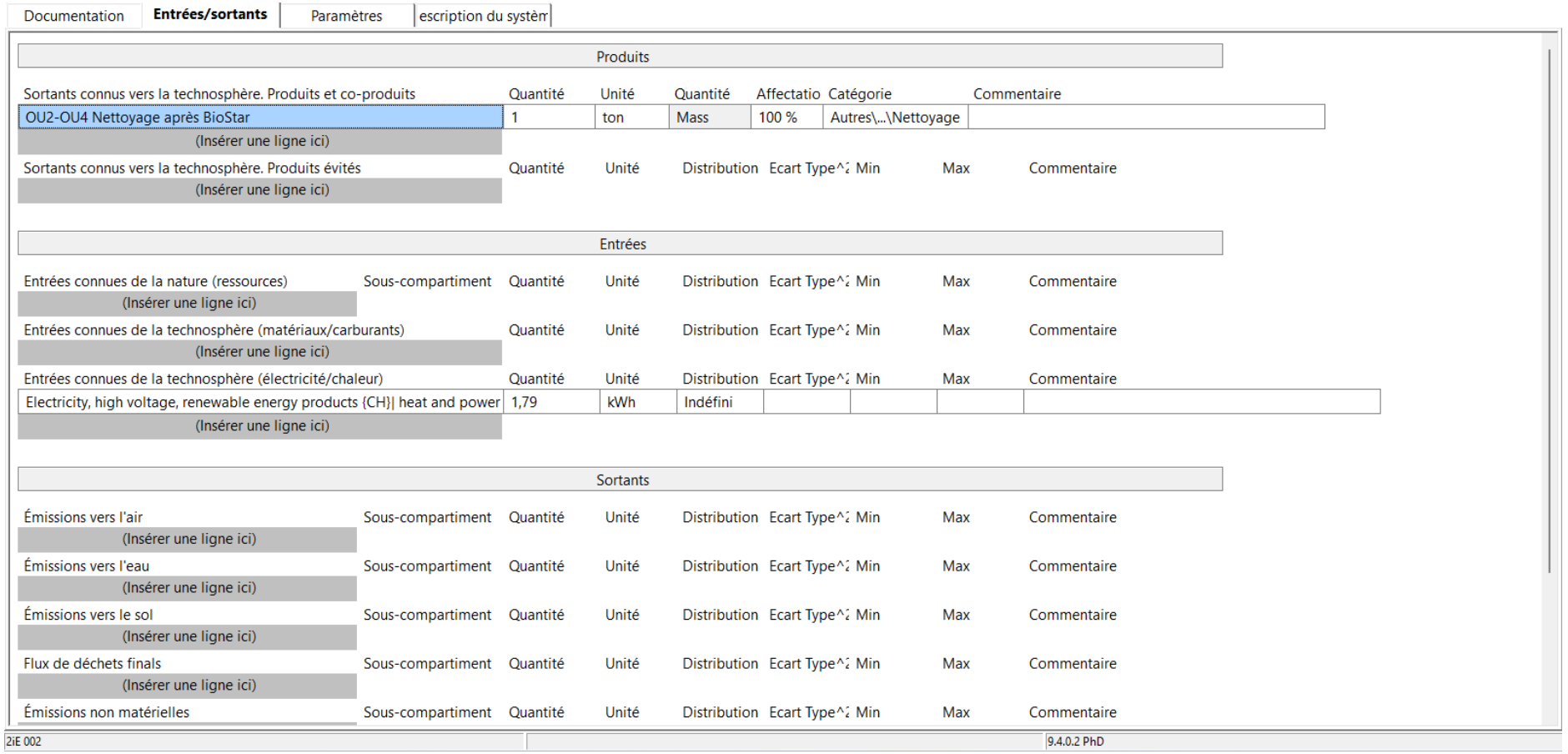


Figure 28 : Implémentation de données de l'étape de nettoyage sur SimaPro après BioStar

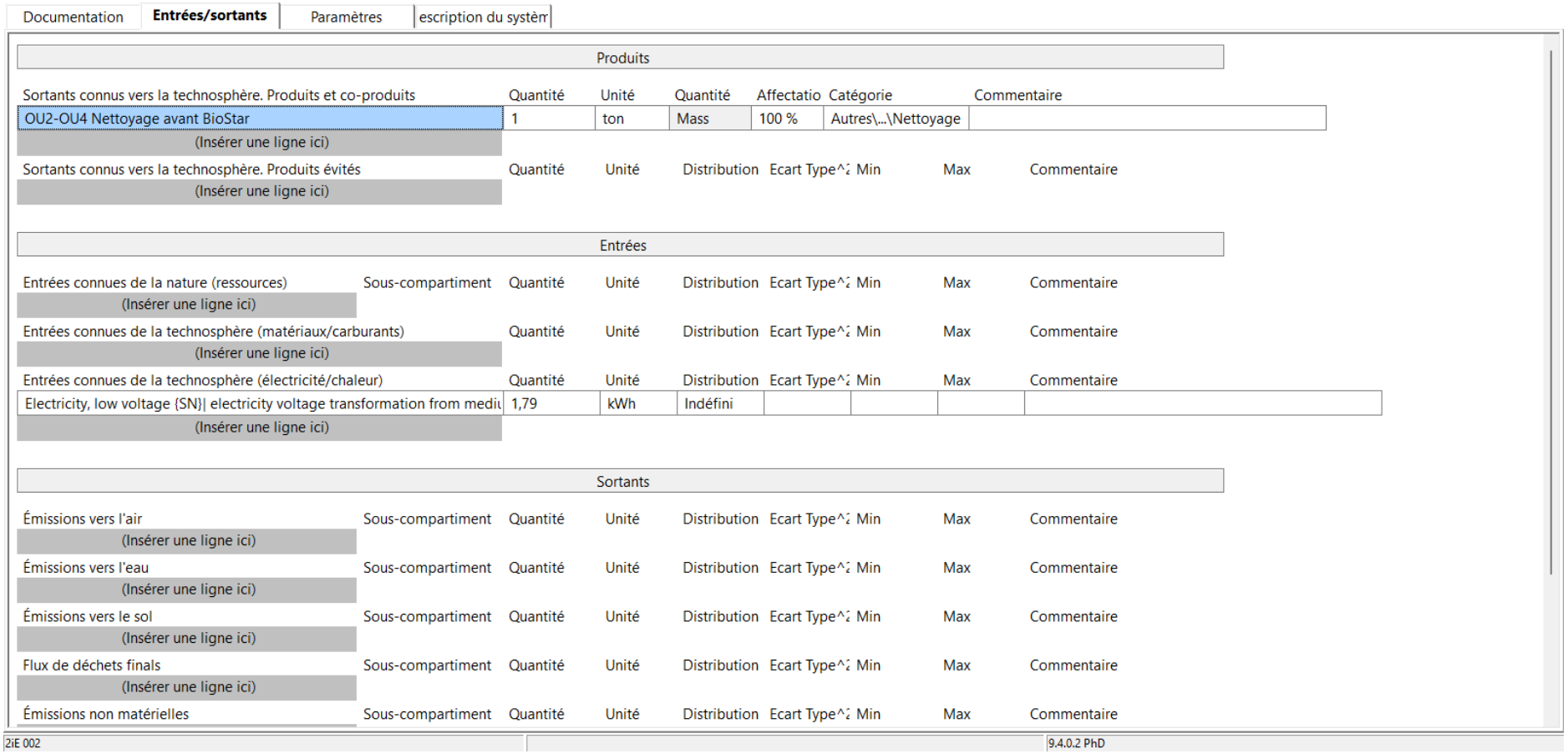


Figure 29 : Implémentation de données de l'étape de nettoyage sur SimaPro avant BioStar

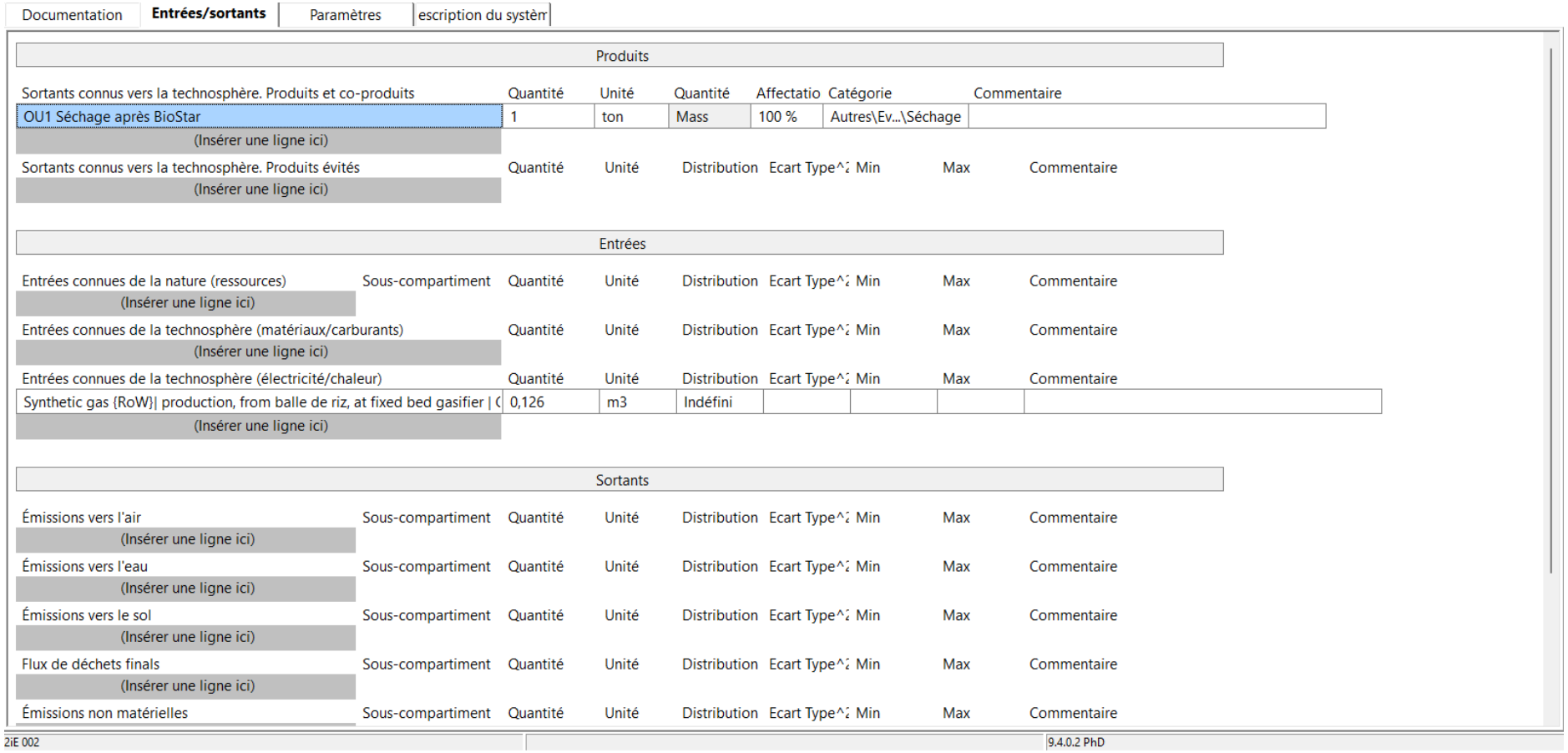


Figure 30 : Implémentation de données de l'étape du séchage sur SimaPro après BioStar

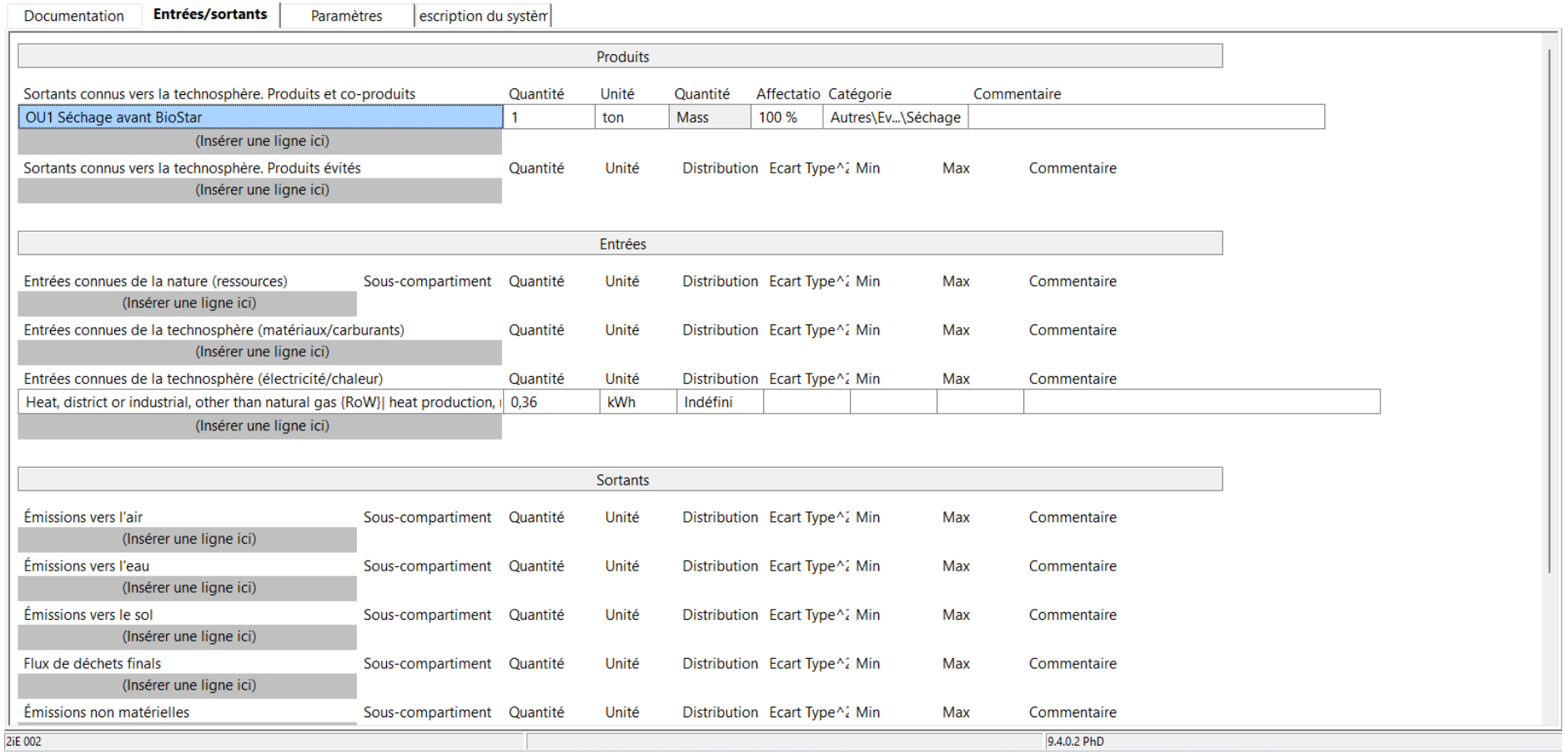


Figure 31 : Implémentation de données de l'étape du séchage sur SimaPro avant BioStar

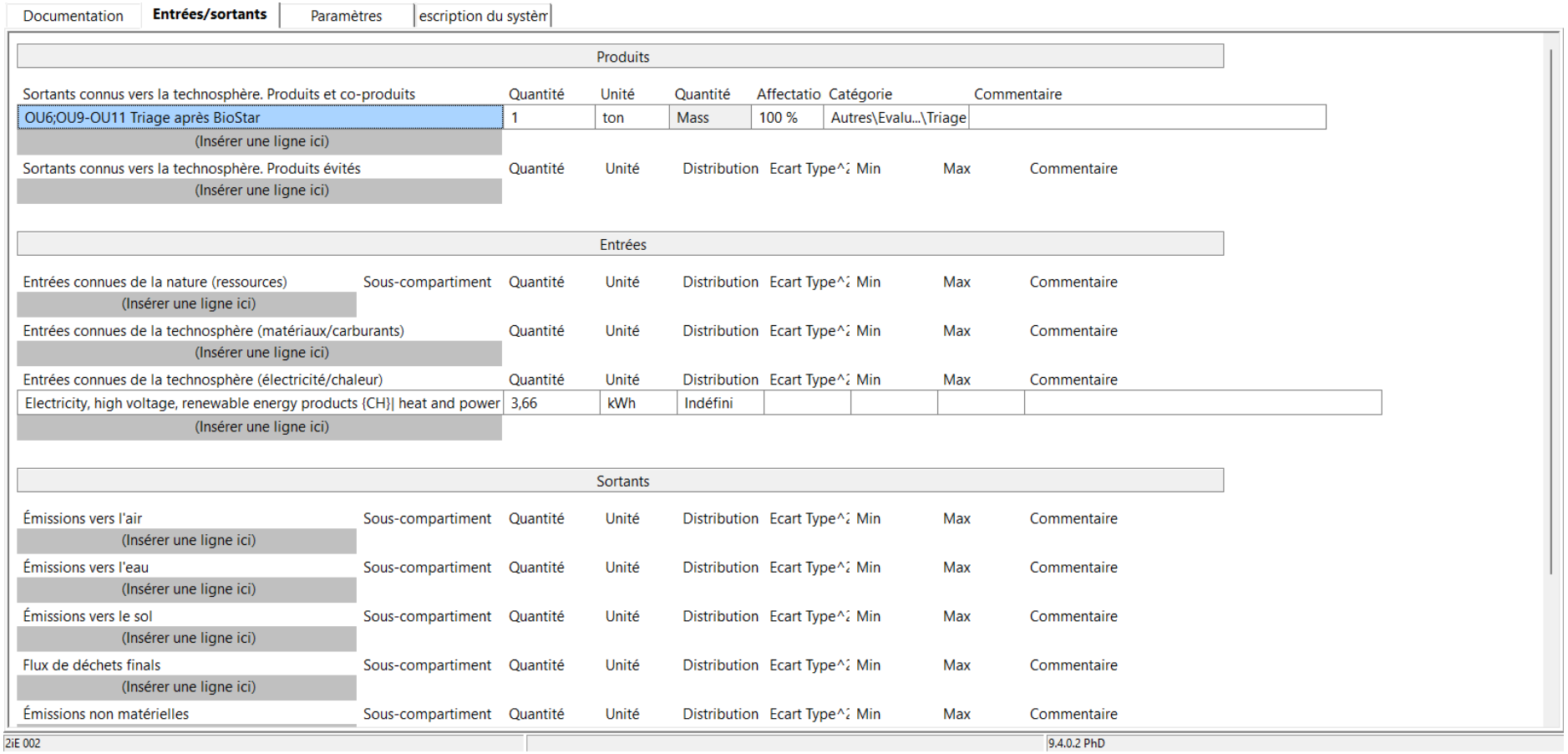


Figure 32 : Implémentation de données de l'étape du triage sur SimaPro après BioStar

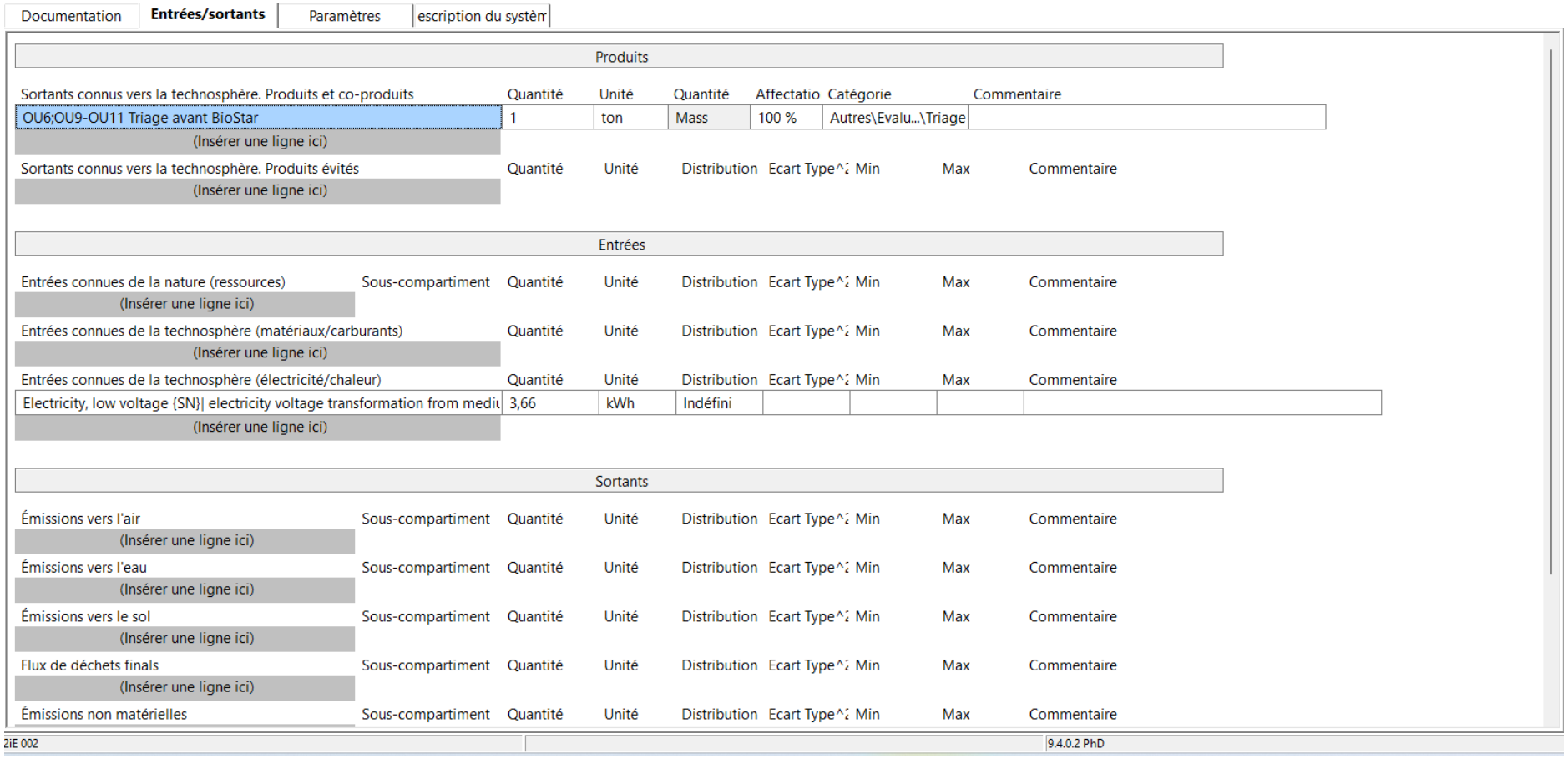


Figure 33 : Implémentation de données de l'étape du triage sur SimaPro avant BioStar

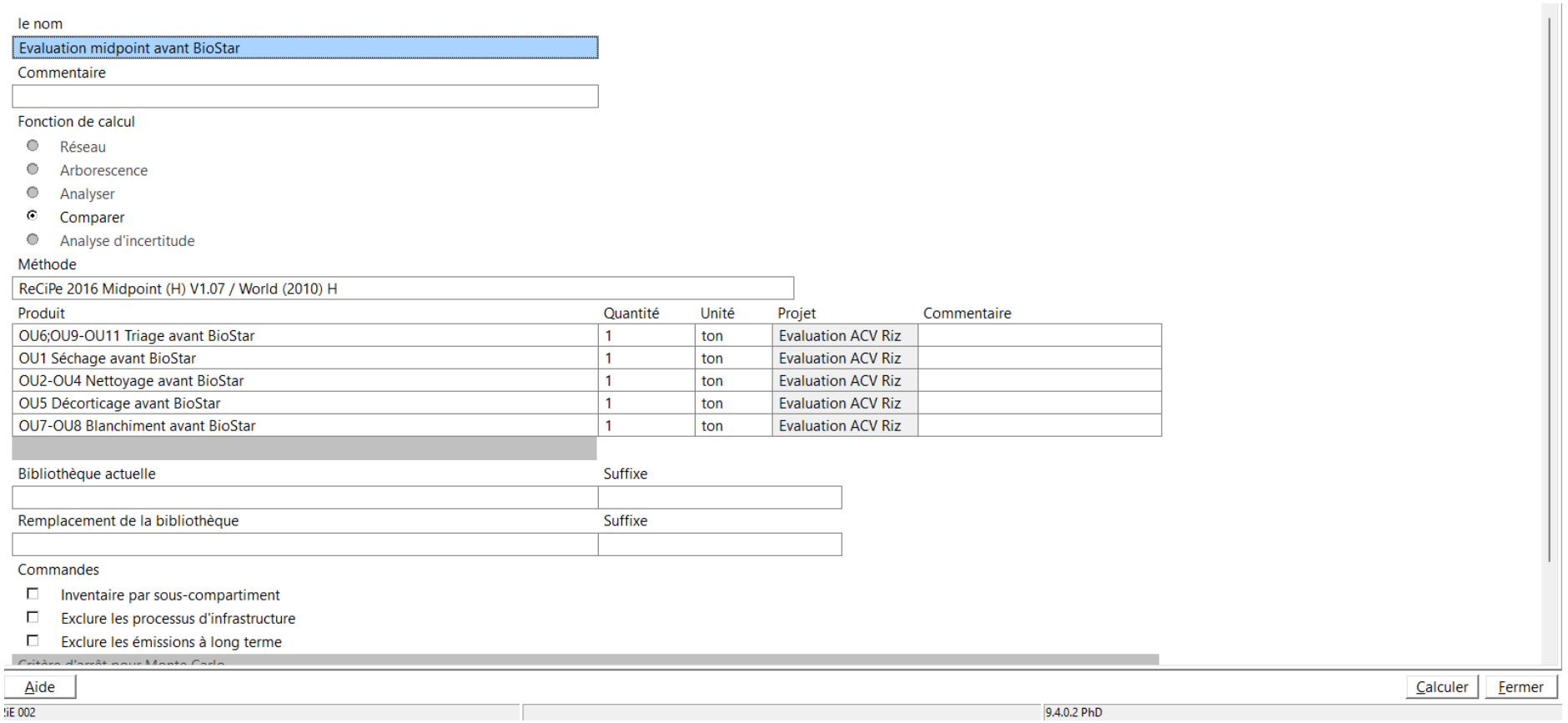


Figure 34 : Calcul de configuration des dommages midpoints sur SimaPro avant BioStar

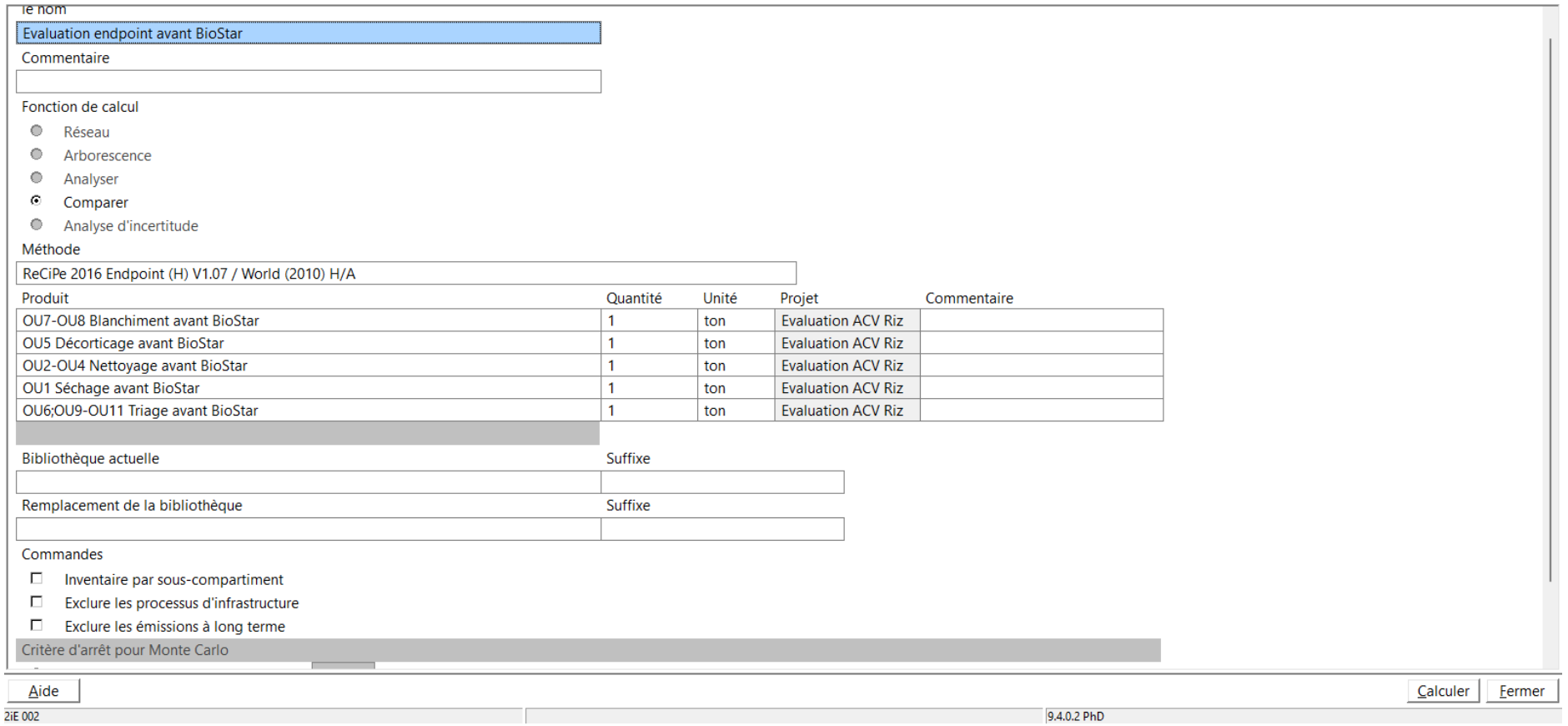


Figure 35 : Calcul de configuration des dommages endpoints sur SimaPro avant BioStar

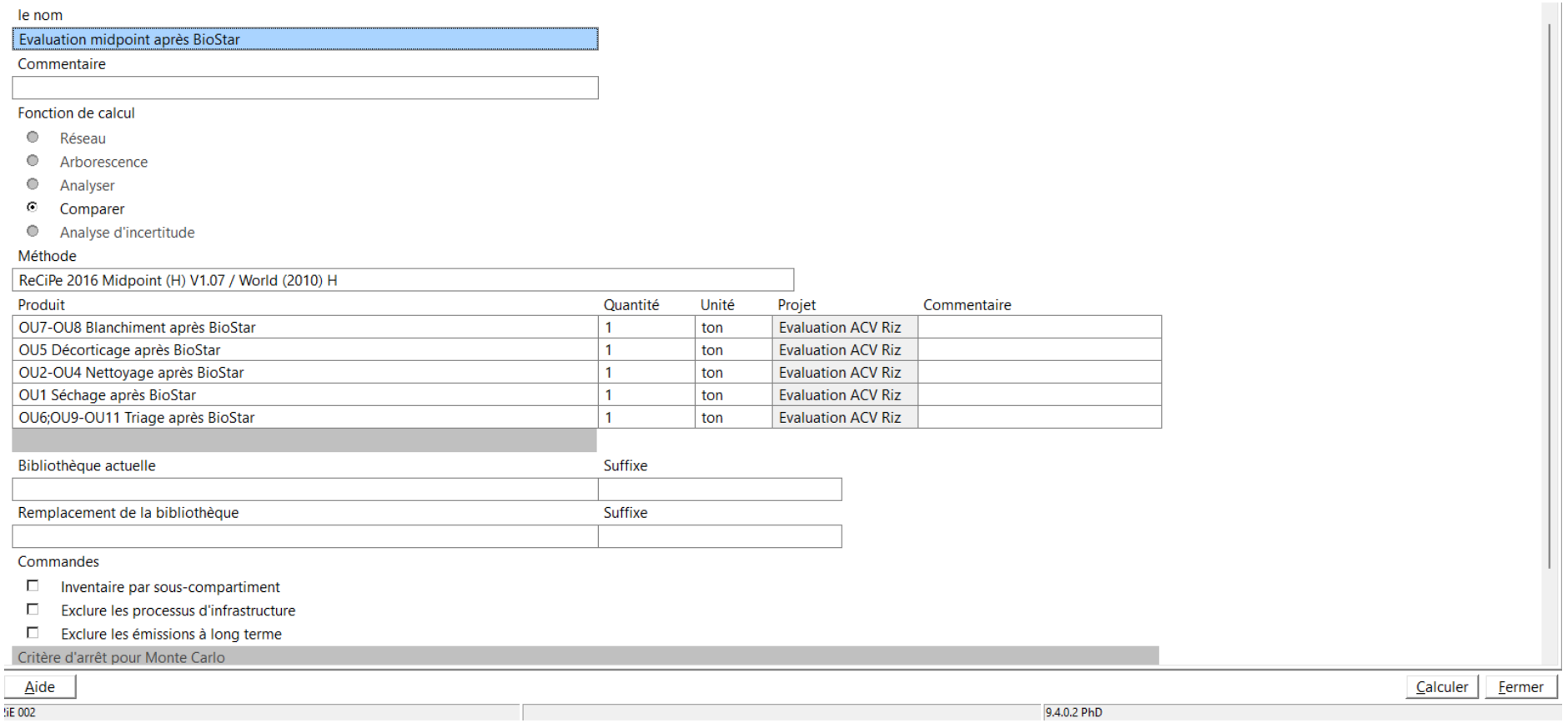


Figure 36 : Calcul de configuration des dommages midpoints sur SimaPro après BioStar

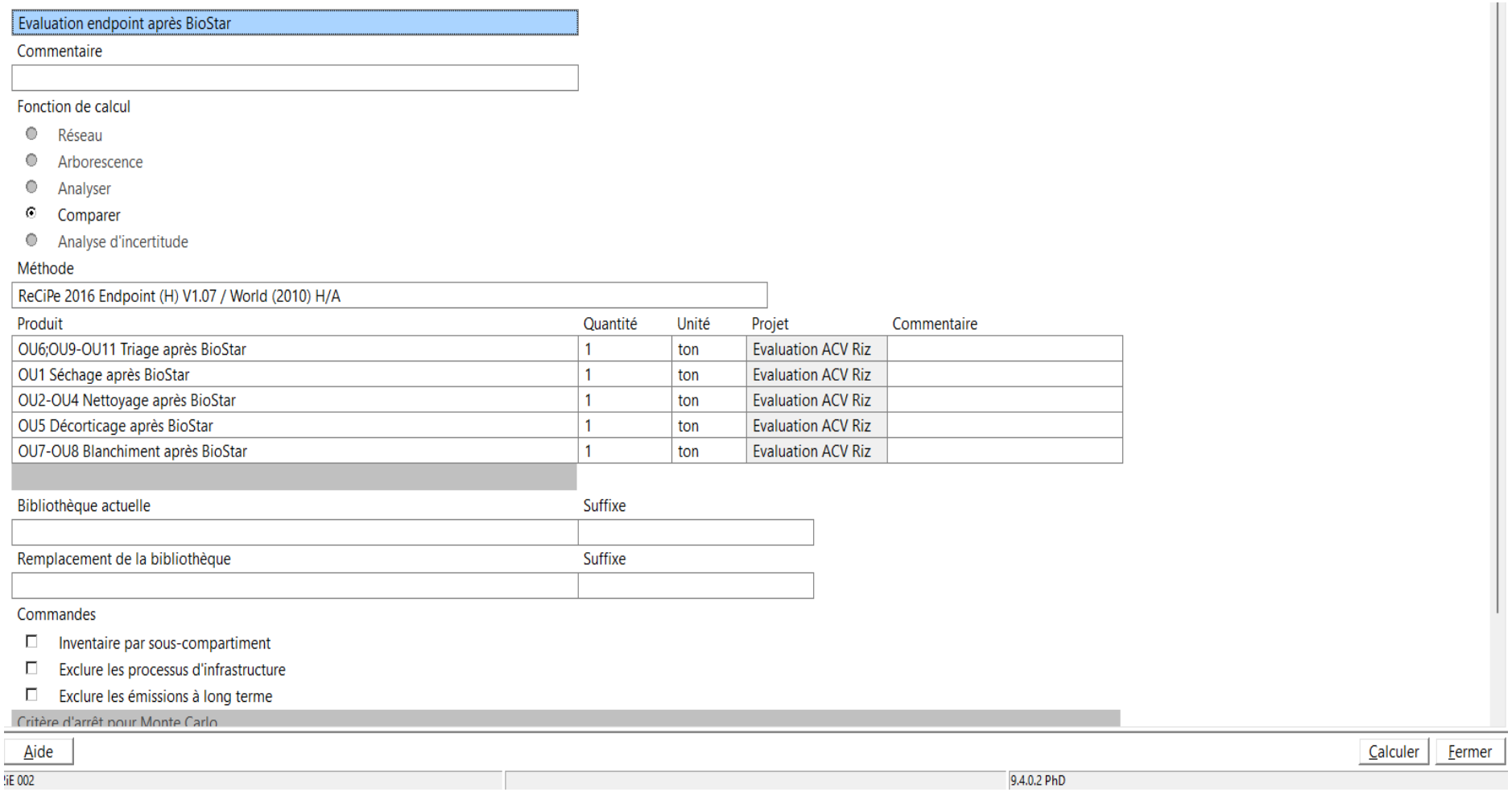


Figure 37 : Calcul de configuration des dommages endpoints sur SimaPro après BioStar

Tableau 7 : Tableau des résultats midpoints avant l'installation de la technologie BioStar

Catégorie d'impact	Unité	OU6 ; OU9-OU11 Triage avant BioStar	OU1 Séchage avant BioStar	OU2-OU4 Nettoyage avant BioStar	OU5 Décorticage avant BioStar	OU7-OU8 Blanchiment avant BioStar
Global warming	kg CO2 eq	3,5039026	0,01210523	1,7136573	3,4273145	33,813617
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	0,01185387	0,00021402	0,00579738	0,01159477	0,11439308
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0,00735767	0,00019586	0,00359842	0,00719685	0,07100355
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	0,02328834	0,00010852	0,01138965	0,02277931	0,22473886
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	12,859196	0,17712292	6,2890603	12,578121	124,09475
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,57414785	0,03999215	0,28079909	0,56159817	5,5406836
Water consumption	m3	0,00870262	6,10E-05	0,0042562	0,0085124	0,08398266

Tableau 8 : Tableau des résultats endpoints avant l'installation de la technologie BioStar

Catégorie de dommages	Unité	OU7-OU8 Blanchiment avant BioStar	OU5 Décorticage avant BioStar	OU2-OU4 Nettoyage avant BioStar	OU1 Séchage avant BioStar	OU6 ; OU9-OU11 Triage avant BioStar
Human health	DALY	7,84E-05	7,95E-06	3,98E-06	1,47E-07	8,13E-06
Ecosystems	species.yr	1,66E-07	1,69E-08	8,43E-09	7,39E-10	1,72E-08
Resources	USD2013	4,1454079	0,42017442	0,21008721	0,00092472	0,42956379

Tableau 9 : Tableau des résultats midpoints après l'installation de la technologie BioStar

Catégorie d'impact	Unité	OU7-OU8 Blanchiment après BioStar	OU5 Décorticage après BioStar	OU2-OU4 Nettoyage après BioStar	OU1 Séchage après BioStar	OU6 ; OU9-OU11 Triage après BioStar
Global warming	kg CO2 eq	6,1872656	0,62713508	0,31356754	0,00746053	0,64114927
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	0,05900041	0,00598022	0,00299011	3,30E-05	0,00611386
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0,0171255	0,00173582	0,00086791	1,61E-05	0,00177461
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	0,03826847	0,00387885	0,00193943	3,06E-05	0,00396553
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	38,668566	3,9194073	1,9597036	0,04543999	4,0069918
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	20,365512	2,064228	1,032114	0,02419535	2,110356
Water consumption	m3	0,05620908	0,0056973	0,00284865	6,82E-05	0,00582461

Tableau 10 : Tableau des résultats endpoints après l'installation de la technologie BioStar

Catégorie de dommages	Unité	OU6 ; OU9-OU11 Triage après BioStar	OU1 Séchage après BioStar	OU2-OU4 Nettoyage après BioStar	OU5 Décorticage après BioStar	OU7-OU8 Blanchiment après BioStar
Human health	DALY	2,36E-06	2,42E-08	1,15E-06	2,31E-06	2,28E-05
Ecosystems	species.yr	3,54E-08	4,17E-10	1,73E-08	3,46E-08	3,41E-07
Resources	USD2013	0,05557188	0,00064948	0,0271786	0,05435719	0,53628381