
**DE LA POUBELLE À L'ASSIETTE :
ÉVALUATION DE LA PERTINENCE ENVIRONNEMENTALE
DES PROCÉDÉS ÉMERGENTS DE VALORISATION
DE BIOMASSE RÉSIDUELLE EN ALIMENTS**

Thèse de Ugo **JAVOUREZ**¹

Analysée par Pierre **de LÉPINAU**²

Directrices de thèse :

Lorie **HAMELIN** : INRAE, Professor Chairholder on Transitions towards low fossil Carb

Ligia **TIRUTA - BARNA** : Professor TBI - Toulouse Biotechnology Institute, Bio & Chemical Engineering

Cette thèse monumentale (200 pages et 350 pages d'annexes documentaire), rédigée en anglais, vise à proposer une méthodologie de modélisation et de comparaison de filières existantes ou émergentes de valorisation de bioressources, afin de préciser comment, et dans quelles conditions, la réutilisation des bioressources à des fins alimentaires peut contribuer à une transition vers une bioéconomie durable.

La première partie présente un état des lieux des filières existantes et émergentes de transformation de biomasse résiduelle en aliments (« de la poubelle à l'assiette »), qui s'appuie sur l'analyse de 950 articles issus de la littérature scientifique et industrielle. 150 matières premières ont été recensées, regroupées en dix catégories : biomasses résiduelles ligneuses, résidus de cultures, fumiers, déchets alimentaires, boues et eaux usées, biomasses résiduelles « vertes », sous-produits animaux, co-produits agroalimentaires, composés à un carbone (C1), et une catégorie « divers ».

Les procédés identifiés, existants ou émergents, s'organisent autour de quatre étapes de conversion : (i) l'amélioration de la qualité nutritionnelle, (ii) le craquage de la biomasse en composés fonctionnels, (iii) l'extraction des fractions d'intérêt nutritionnels et (iv) la bioconversion³.

En prenant en compte les caractéristiques de l'intrant et la fonction nutritionnelle désirée, l'auteur propose huit familles de stratégie de conversion : (i) l'élevage d'insectes, (ii) la bioraffinerie « verte », (iii) la bioraffinerie lignocellulosique, (iv) l'extraction de protéines végétales, (v) la fermentation solide, la production de protéines microbiennes depuis (vi) des

¹ Thèse de doctorat de "Génie des procédés et de l'Environnement", Unité de recherche « TBI - Toulouse Biotechnology Institute, Bio & Chemical Engineering » de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Ecole doctorale Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés (MEGEP), soutenue le 12 avril 2023

² Membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France, section 9, « Agro-fouritures »

³ Que l'auteur définit comme la conversion de biomasse en ingrédients nutritionnels, en utilisant le métabolisme d'organisme vivants

gaz C1 et/ou (vii) des substrats alternatifs, et (viii) la réutilisation complète des carcasses et sous-produits animaux.

L'auteur conclut en soulignant que l'analyse démontre que la plupart des besoins nutritionnels peuvent être satisfaits par les couples intrants - procédés identifiés.

La deuxième partie présente des modèles d'analyse de Cycle de vie (ACV), harmonisés pour comparer cinq voies différentes de valorisation de coproduits agroalimentaires, ce en fonction des caractéristiques d'un panel de six intrants représentatifs, et des performances des procédés. Le modèle ACV retenu intègre 293 paramètres régissant la performance des chaînes de conversion, et est construit afin que le contexte d'implémentation des filières, représenté par les marchés de l'énergie, des fertilisants et des denrées alimentaires, soit pilotable. L'ACV est complétée d'une analyse de sensibilité et d'une quantification analytique des incertitudes.

L'analyse détaillée montre que les résultats dépendront aussi bien des futures performances technologiques que du contexte dans lequel ces filières seront implémentées.

Dans la troisième partie, Ugo Javourez compare, avec ce modèle d'ACV, 27 filières de valorisation de la biomasse résiduelle en France. Celles-ci ont été sélectionnées afin de comparer les performances environnementales des principales voies de valorisation actuelles (compostage, épandage, incinération, etc.) avec celles de cinq familles de procédés émergents de valorisation « de la poubelle à l'assiette » : (i) l'élevage d'insectes, (ii) l'extraction de protéines végétales, (iii) l'enrichissement nutritionnelle *via* la fermentation solide, (iv) le couplage du raffinage lignocellulosique avec la production de mycoprotéines et (v) la production de protéines microbiennes basée sur des gaz C1 biosourcés.

Le modèle ACV est élaboré pour être paramétrable selon les caractéristiques biochimiques des 11 intrants étudiés⁴ (18 critères sélectionnés), les indicateurs de performances des procédés (les 293 paramètres mentionnés plus haut) et, enfin, selon le futur contexte de 12 marchés de denrées et services sélectionnés⁵ dans les secteurs de l'énergie, de l'alimentation, de la nutrition animale et de la fertilisation, avec lesquels ces voies de valorisation vont interagir.

Le quatrième et dernier chapitre présente une analyse couplée de sensibilité et d'incertitude pour les différentes filières. Selon l'auteur, cette méthode, appliquée à plusieurs contextes de déploiement « offre un panorama nuancé de l'aptitude des filières émergentes, de la poubelle à l'assiette, à répondre aux enjeux environnementaux »

Ugo Javourez avance plusieurs conclusions :

- La production d'insectes et de mycoprotéines est seulement pertinente si elle permet de remplacer la production de viande à au moins 80% en poids équivalent !
- Sinon, la meilleure utilisation possible d'une biomasse résiduelle comestible est son intégration dans les formulations alimentaires pour animaux, si l'alimentation humaine n'est pas atteignable.
- Il faudrait que le potentiel d'émission de gaz à effet de serre d'une production additionnelle de tourteau protéique soit supérieur à 4.5-5 kg eq.CO2/kg de matière

⁴ (i) le menu bois de feuillus, (ii) la sciure de bois, (iii) les pailles de blés, (iv) le fumier bovin, (v) les boues d'épuration, (vi) les tontes de pelouses/fauchages, (vii) les fanes de betteraves, (viii) les drèches de distilleries, (ix) les écarts de tri de pommes de terre, (x) les protéines animales transformées et (xi) les déchets ménagers organiques

⁵ Electricité, chauffage industriel ou domestique, fertilisation azotée, phosphatée ou potassique, fourrages, nutriments protéiques, lipidiques ou à haute valeur énergétique, substituts à la viande, alternative à la farine de céréales

sèche pour rendre pertinente la fabrication de protéines microbiennes basée sur ces déchets et résidus, sous conditions d'une mise à échelle industrielle réussie. Le cas échéant, la valorisation énergétique des déchets et résidus organiques est préférable à leur transformation en nouveaux ingrédients.

De façon générale, ces résultats remettent en cause les promesses d'atténuations des impacts environnementaux de la plupart des procédés visant à transformer des déchets en aliments ; les voies de transformation « de la poubelle à l'assiette » sont à présenter plutôt comme des mesures d'adaptation, et non d'atténuation des impacts environnementaux.

Le grand intérêt et la valeur de cette thèse est d'avoir analysé et hiérarchisé la quasi-totalité des cas de figure de la valorisation des bioressources, en s'appuyant sur une méthodologie harmonisée de mesure des bénéfices environnementaux. Les simulations portant sur des procédés encore non industrialisés restent bien entendues incertaines.

L'auteur suggère, par ailleurs, de compléter ce modèle en prenant en compte la demande en biens et services, ainsi que de la disponibilité des bioressources. Le jury a indiqué également que la prise en compte de paramètres économiques aurait également enrichi l'analyse.

À noter, enfin, que cette thèse a été jugée excellente par le jury, et a donné lieu à deux articles en anglais retenus par des journaux à comité de lecture.

L'analyse de cette thèse imposante, avec des résultats pleins de promesses pour des recherches à venir, a toute sa place sur le site de l'Académie d'agriculture de France et dans le Mensuel, pour valorisation.