



**HAL**  
open science

## Une analyse systémique et interdisciplinaire de scénarios de développement durable basés sur l'entomoconversion

Camille Vivas, Christelle Planche, Catherine Macombe, Patrick Borel, Erwan Engel, Rallou Thomopoulos

### ► To cite this version:

Camille Vivas, Christelle Planche, Catherine Macombe, Patrick Borel, Erwan Engel, et al.. Une analyse systémique et interdisciplinaire de scénarios de développement durable basés sur l'entomoconversion. *Revue Francophone du développement durable*, 2022, 20. hal-03999567

**HAL Id: hal-03999567**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03999567>**

Submitted on 21 Feb 2023

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

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

# Une analyse systémique et interdisciplinaire de scénarios de développement durable basés sur l'entomoconversion

Camille Vivas<sup>(1)</sup>, Christelle Planche<sup>(2)</sup>, Catherine Macombe<sup>(3)</sup>, Patrick Borel<sup>(4)</sup>, Erwan Engel<sup>(2)</sup>, Rallou Thomopoulos<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>IATE, Université de Montpellier, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France  
rallou.thomopoulos@inrae.fr

<sup>(2)</sup>QuaPA, INRAE, Theix, France

<sup>(3)</sup>ITAP, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France

<sup>(4)</sup>C2VN, Aix-Marseille Université, INSERM, INRAE, Marseille, France

**Résumé.** Cet article présente une méthode d'intégration des connaissances permettant de réaliser des analyses bénéfices-risques prenant en compte le point de vue de différentes parties prenantes, selon des critères variés. Plusieurs scénarios d'entomoconversion – une technologie prometteuse de valorisation de biodéchets par des insectes – sont explorés à un stade précoce sur la base des connaissances actuellement disponibles et comparés à l'aide de cette méthode. Inspirée des systèmes d'argumentation en intelligence artificielle où interagissent des arguments contradictoires, elle s'appuie sur une mesure synthétique d'opinion pour comparer la valeur de différentes options (ici les scénarios étudiés), soit suivant un critère spécifique (nutritionnel, sanitaire, etc.) ou un acteur particulier (citoyens, etc.), soit de façon globale en combinant ces informations. Les impacts ainsi mis en évidence permettent de conclure que les aspects sanitaires et l'acceptabilité sociale apparaissent comme des sujets cruciaux à traiter pour développer les filières d'entomoconversion, suivant l'opinion des acteurs interrogés et la littérature consultée.

**Mots clés :** Multicritère, Multiacteur, Argumentation, Approche interdisciplinaire, Développement durable.

**Summary.** This article presents a knowledge engineering method for carrying out risk-benefit analyzes considering the points of view of different stakeholders, according to various criteria. Several insect-based bioconversion scenarios – a promising technology for the recovery of bio-waste by insects – are explored at an early stage on the basis of currently available knowledge and compared using this method. Inspired by argumentation systems in artificial intelligence, where contradictory arguments

interact, the method is based on a synthetic measure of opinion to compare the values of different alternatives (here the scenarios studied), either according to a specific criterion (nutritional, health, etc.) or a particular actor (citizens, etc.), or globally by combining this information. The impacts highlighted lead to the conclusion that the regulatory and health aspects appear to be crucial topics to be dealt with in order to develop insect-based bioconversion sectors, according to the opinion of the actors questioned and the literature consulted.

**Keywords:** Multicriteria, Multiactor, Argumentation, Interdisciplinary approach, Sustainable development.

## 1. Introduction

Le traitement intelligent des données et des connaissances, ainsi que l'interprétabilité des résultats obtenus, a une importance de premier plan pour appuyer la décision et un rôle à jouer dans le pilotage éclairé du développement durable (Vinuesa & al., 2020). Dans différents domaines, des technologies se développent avec la préoccupation d'une meilleure préservation des ressources et de l'environnement. Parmi celles-ci, l'entomoconversion consiste à élever des insectes comme moyen écologique de recycler et de valoriser des biodéchets, par exemple sous forme de protéines pour l'alimentation animale, d'engrais, de biocarburant, etc. En milieu urbain et péri-urbain, où la gestion des déchets est plus que jamais un enjeu majeur, l'entomoconversion offre une solution séduisante mais pose aussi des questions spécifiques, notamment en termes d'hétérogénéité des biodéchets, de maîtrise des risques sanitaires, de contraintes réglementaires et sociétales. A l'heure actuelle en France, des études s'intéressent à évaluer à un stade précoce le potentiel de cette solution, en anticipant en parallèle les bénéfices et les risques du recyclage par entomoconversion de différents types de substrats et notamment de biodéchets, comme le projet FLY4WASTE dans lequel s'inscrit cette étude, faisant suite à la création du consortium Insect4City (Engel & al., 2022) qui regroupe 17 unités de recherche. C'est sur cette analyse bénéfices-risques que se focalise cet article.

L'usage des systèmes d'argumentation a montré son intérêt dans un nombre croissant d'applications aux filières agroalimentaires (Taillandier, Salliou, Thomopoulos, 2021 ; Flynn, Thomopoulos, 2022). Initié par Dung (1995), ce modèle représente les arguments comme des nœuds et les relations d'attaque comme des arêtes dans un graphe orienté. Différentes sémantiques peuvent ensuite être utilisées pour en extraire des sous-ensembles cohérents d'arguments appelés extensions. Toutefois dans de nombreux cas, ce mécanisme de raisonnement ne suffit pas à appuyer la décision car plusieurs extensions peuvent co-exister sans être départagées. De ce fait, une solution a consisté à les classer en utilisant les "ranking semantics" proposées dans la littérature. La manipulation de graphes d'arguments de grande taille, ainsi que l'interprétabilité des

poids associés aux arguments, ne sont cependant pas toujours intuitifs (Yun & al., 2017). D'où la proposition dans les travaux appliqués de structurer les arguments en y associant des données descriptives détaillées (Thomopoulos, 2018) pour pouvoir y effectuer des requêtes avancées, choix très marqué dans ce papier.

L'analyse bénéfices-risques proposée vise en effet à répondre aux questions suivantes, pour différents scénarios d'entomoconversion différant par leurs matières d'entrée et de sortie :

- Quelle est l'attractivité globale de chaque scénario ? Peut-on les classer ?
- Quelle est la représentation, en termes de quantité d'information disponible, de chaque critère considéré (sanitaire, nutritionnel, etc.) pour les différents scénarios ? De chaque acteur impliqué ?
- Quelle est l'attractivité de chaque scénario vu de l'angle de chaque critère ? De chaque acteur ? Pourquoi ?
- Peut-on comparer les scénarios critère par critère ? Acteur par acteur ?
- Quels acteurs sont les plus satisfaits par quels critères, dans chaque scénario ?

La section 2 expose les enjeux de l'entomoconversion, les scénarios étudiés et les données dont dispose cette étude. La partie 3 décrit les fondements de la méthode proposée pour réaliser l'analyse bénéfices-risques. La partie 4 présente les résultats obtenus dans le cas de la filière entomoconversion en reprenant point par point les questions énoncées ci-dessus. La section 5 présente la conclusion de ce papier.

## 2. Le cas de l'entomoconversion : Enjeux et données de l'étude

### 2.1 Potentiel pour le développement durable

#### 2.1.1 *Potentiel écologique*

**Recyclage de biodéchets.** Certaines espèces d'insectes comme la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*, communément appelée BSF pour Black Soldier Fly) ont la capacité de croître sur un large spectre de substrats organiques différents, du co-produit "noble" (son de blé) à des déchets comme le lisier de porc (Singh, Kumari, 2019). Cette capacité est aujourd'hui envisagée comme un moyen écologique de recycler certains biodéchets. Sachant que la production de déchets dans le monde devrait atteindre 3,4 milliards de tonnes par an d'ici 2050 (Kaza & al., 2018), l'entomoconversion offre une nouvelle solution pour répondre à cet enjeu.

**Bioéconomie circulaire.** Pour les territoires urbains et péri-urbains, l'entomoconversion permettrait de recycler les biodéchets et de les valoriser en "produits d'insectes" sur le même site, minimisant ainsi les coûts de transport. A l'avenir, il serait envisagé d'intégrer les unités d'entomoconversion dans un système d'échanges de flux de matière où coexisteraient différents secteurs d'activité (e.g.

récupération de la chaleur générée par le fonctionnement des datacenters pour alimenter les unités d'entomoconversion).

### 2.1.2 *Potentiel nutritionnel et autres usages*

**Fourniture de nutriments et de molécules d'intérêt.** L'entomoconversion est par ailleurs un moyen de valoriser des biodéchets. Les larves d'insectes peuvent être transformées en farines riches en protéines à destination de l'alimentation animale. Elles sont également riches en composés antimicrobiens et en lipides qui peuvent fournir des nutriments énergétiques ou du biocarburant. Les larves peuvent également contenir des concentrations importantes de certains micronutriments, ce qui augmente leur valeur en nutrition animale et, par conséquent, en nutrition humaine. Enfin, les larves produisent un fumier (frass) qui est un engrais naturel (Surendra & al., 2020), et de la chitine, à la base du chitosan (Cammack & al., 2021). Huit insectes sont aujourd'hui autorisés en alimentation animale, parmi lesquels *Hermetia illucens*.

## 2.2 Précautions nécessaires

### 2.2.1 *Précautions sanitaires*

Cependant, les risques de l'entomoconversion doivent être identifiés et surveillés. En effet, certaines substances indésirables peuvent contaminer les élevages d'insectes ou être produites lors des procédés de transformation (Meyer & al., 2021). Des contaminants microbiologiques ont été retrouvés chez des insectes d'élevage (Vandeweyer & al., 2021). Il est donc nécessaire d'évaluer l'impact de ces contaminants sur la survie des insectes et de déterminer leur devenir.

### 2.2.2 *Prérequis et impacts*

Il est également important d'anticiper l'impact environnemental, social et économique des activités d'entomoconversion et d'en déterminer les prérequis, tels que le cadre réglementaire, la faisabilité technique ou encore l'acceptabilité sociale. Il pourrait exister des freins au développement de l'activité en milieu urbain et péri-urbain, tels que de potentielles nuisances olfactives ou le manque d'espace qui pourrait limiter le volume d'activité.

## 2.3 Intérêt d'une analyse bénéfices-risques

Les revues de synthèse sur le sujet (e.g. FAO, 2021) énumèrent les bénéfices et les risques potentiels de l'élevage d'insectes en termes d'intérêt général. En effet, plusieurs bénéfices majeurs attendus, tels que la réduction de l'impact environnemental ou la sécurité alimentaire, sont d'intérêt public. Toutefois, les différents acteurs

(communauté scientifique, citoyens, collectivités locales, décideurs publics, entreprises agro-industrielles, start-up, etc.) concernés par l'entomoconversion ne sont pas également impactés par ses différents aspects. L'intérêt d'une analyse bénéfice-risque structurée (voir par exemple Flynn, Thomopoulos, 2022) est de mettre en évidence les impacts différenciés attendus sur les catégories d'acteurs, au prisme des différents aspects étudiés. La présente étude porte sur cette analyse bénéfices-risques réalisée au stade actuel du développement de la filière.

## 2.4 Données de l'étude

Une condition préalable à l'identification efficace et pertinente des informations est d'avoir précisément délimité le système étudié. Ici il s'agit de différents scénarios.

**Définition 1** Dans la suite du papier, nous appellerons "scénario" d'entomoconversion un cas de figure défini par le triplet :

- substrat utilisé,
- produit de valorisation visé,
- insecte considéré.

L'étude a été limitée à l'insecte *Hermetia illucens* (voir 2.1) et aux trois scénarios suivants :

**Scénario 1** "Alimentation animale" (Figure 1a) :

- Substrat : sous-produits agroalimentaires (e.g. résidus, produits non conformes)
- Produit : larves d'insectes pour l'alimentation animale. Le frass utilisable pour la fabrication d'engrais organiques est également un produit de sortie.
- Insecte : *Hermetia illucens*

**Scénario 2** "Biocarburants" (Figure 1b) :

- Substrat : biodéchets urbains compostables (déchets ménagers et de restauration)
- Produit : biofuel issu de l'huile extraite des insectes. Le frass utilisable pour la fabrication d'engrais organiques est également un produit de sortie.
- Insecte : *Hermetia illucens*

**Scénario 3** "Business-as-usual" : ce scénario consiste à considérer le cas où aucune solution novatrice n'est mise en place. Il sert de "témoin" dans l'analyse des scénarios.

- Substrat :  $\emptyset$
- Produit :  $\emptyset$
- Insecte :  $\emptyset$

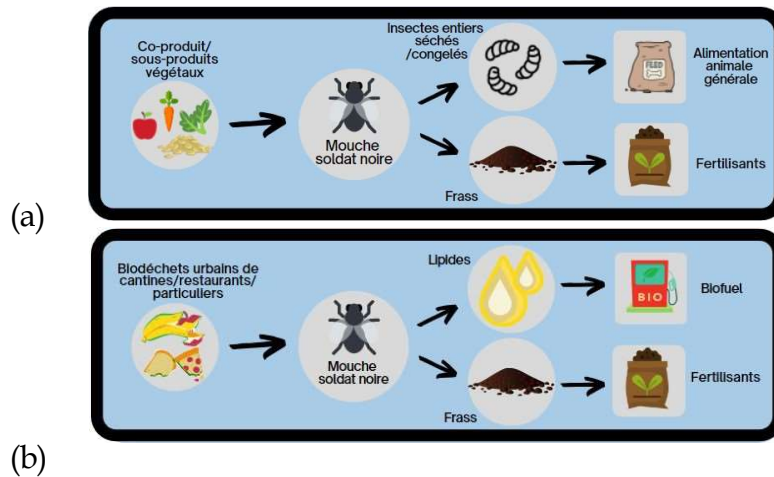


FIG. 1 – Schéma (a) du scénario 1 “Alimentation animale” (b) du scénario 2 “Biocarburants”

La délimitation de l’étude à ces trois scénarios réduit considérablement les sources d’information disponibles pour analyser cette filière émergente et permet de s’approcher de l’exhaustivité. Les types de sources utilisées comprennent :

1. des articles scientifiques évalués par des pairs ;
2. des rapports techniques et des informations publiées sur des sites Web ;
3. des conférences de scientifiques ou d’industriels et des réunions de projets de recherche ;
4. un colloque.

Une partie de ces informations provient des 14 webinaires organisés dans le cadre du consortium Insect4City, dans lesquels sont intervenus 18 chercheurs et 4 industriels, abordant des aspects variés : biologie de l’insecte, procédés de transformation, recyclage des biodéchets, nutrition animale et humaine, sécurité chimique et microbiologique, acceptabilité par les consommateurs, durabilité environnementale, économique et sociale, évaluation multicritère. Ces webinaires et les informations partagées au sein du réseau ont permis de constituer une bibliographie pluridisciplinaire initiale. Par la suite, à l’aide de l’outil de documentation scientifique en ligne “Connected Papers”, une bibliographie élargie a été établie, complétée par des requêtes sur des bases de données de ressources scientifiques en accès contractuel (Web of Science, Scopus, Econlit, Food Science Source, Tair, . . .) ou en accès libre (HAL, ORBi, . . .), ainsi que Google Scholar, en utilisant les mots-clés descriptifs des scénarios. Enfin, le colloque “New Stakes and Challenges of the Industrial Insect Rearing Industry” tenu en avril 2022 en région parisienne (Adebiotech, 2022), a permis de compléter les données du projet avec des sources industrielles.

### 3. Cadres théoriques mobilisés

L'approche adoptée repose sur le modèle d'analyse introduit et implémenté par l'outil *MyChoice*, annoncé dans Thomopoulos, Cufi, Le Breton (2020) et appliqué à différents cas (e.g. Kurtz, Thomopoulos, 2021). Les cadres théoriques sous-jacents au modèle sont présentés pour la première fois dans cette section et utilisés dans la partie suivante (Section 4).

#### 3.1 Décision multicritère

Les éléments d'un cadre décisionnel sont classiquement constitués de trois principales notions (Roy, 2016) rappelées ci-après.

**Les actions potentielles.** Le terme générique d'*action* ou *décision* est utilisé pour désigner une solution, une option (ou alternative selon la terminologie anglophone) jugée réalisable. Dans notre cas d'étude, les options envisagées sont les 3 scénarios d'entomoconversion étudiés.

**Les critères.** Habituellement, dans la modélisation d'un processus décisionnel, une action est envisagée avec les conséquences de son éventuelle mise en pratique. Ces conséquences peuvent être multiples et hétérogènes dans leur nature. Elles reflètent la diversité des points de vue, ou *critères*, qui entrent en jeu dans la comparaison des actions – d'où le terme "multicritère".

Formellement, un critère est une fonction, souvent à valeur numérique, définie sur l'ensemble des actions potentielles, rendant possible la comparaison de deux actions en leur associant une évaluation. Dans l'approche proposée ici, les fonctions critères (nutrition, sécurité chimique, etc.) associent à chaque scénario une valeur numérique, appelée "attitude", décrite en 3.4. Elle a la particularité d'être calculée sur la base des arguments positifs et négatifs ex-primés pour chaque scénario suivant le critère considéré.

**Le type de problème décisionnel.** Trois principales problématiques sont classiquement identifiées, suivant l'objectif visé : (i) La problématique du choix, qui consiste à identifier un sous-ensemble d'actions jugées comme les meilleures ; (ii) La problématique du tri, qui consiste à affecter chaque action à une des catégories prédéfinies ; (iii) La problématique du rangement, qui consiste à établir un classement des actions, traduisant leur plus ou moins grande attractivité. Le cas d'étude concerne la dernière catégorie, visant à classer les scénarios en fonction de leur attractivité. Toutefois, l'évaluation en elle-même de chaque scénario, en-dehors de tout classement, est également une sortie importante de l'étude.

Nous considérerons également différents **acteurs** impliqués. En effet dans de nombreuses situations, le décideur ne correspond pas à un individu mais à un collectif



d'individus. La présence d'acteurs multiples ayant des systèmes de valeurs distincts rend nécessaire l'intégration de cette diversité dans la modélisation. On parle alors de processus de décision multi-acteurs.

### 3.2 Argumentation bipolaire

En théorie de l'argumentation (Besnard, Hunter, 2008), un argument est un ensemble de connaissances constitué d'une hypothèse dont est déduite une conclusion, par exemple pour justifier une croyance dans le cas d'un argument épistémique, ou une action dans le cas d'un argument pratique (Amgoud, Prade, 2009). L'introduction d'arguments en décision multicritère n'est pas usuelle. Dans l'approche proposée ici, les arguments sont des données recueillies qui permettent l'évaluation de chaque action par les fonctions critères. Un argument fournit en effet des éléments de connaissance qui le positionnent en faveur (argument positif ou *pro*) ou en défaveur (argument négatif ou *cons*) d'une action potentielle, suivant un critère donné. La structuration d'un argument adoptée sera décrite dans la partie 3.3.

L'un des premiers travaux en décision argumentée (Amgoud, Prade, 2009) distingue les principes décisionnels dits unipolaires, permettant la comparaison des actions sur la base des seuls arguments positifs ou des seuls arguments négatifs, des principes bipolaires, où les deux types d'arguments (positifs et négatifs) entrent en jeu pour comparer des actions. C'est le cas ici (voir partie 3.4).

### 3.3 Intégration des arguments en mode "entrepôt"

En intégration de sources d'information hétérogènes, l'approche *entrepôt de données* (Jarke & al., 2000) consiste à construire une base de données (l'entrepôt) regroupant dans un même schéma toutes les informations issues des différentes sources. Les requêtes sont posées directement sur l'entrepôt. C'est l'approche adoptée ici en utilisant le schéma de données de l'outil *MyChoice* (Thomopoulos, Cufi, Le Breton, 2020). Les données stockées dans la base sont les arguments fournissant des éléments de connaissance en faveur ou en défaveur d'un scénario d'entomoconversion. A l'opposé des approches abstraites (Dung, 1995) où les arguments ne comportent aucune donnée descriptive, les arguments sont décrits ici par de nombreux attributs.

**Définition 2** *Un argument est un tuple  $(I, A, Sc, T, Cr, B, P, V, Cd, infV, supV, U, Cc, H, St, D, Sr, Ts)$  composé des éléments suivants :*

*I : l'identifiant de l'argument*

*A : l'acteur concerné par l'argument*

*Sc : le scénario (action potentielle) concerné par l'argument*

*T : le type, positif ou négatif, de l'argument*

*Cr : le critère considéré*

*B : le but ou sous-critère, plus précis que le critère. Il peut être vu comme un raffinement du critère*

*P : la propriété ou caractéristique du scénario évaluée par l'argument*

*V : la valeur qualitative attribuée par l'argument à cette propriété*

*Cd : la condition de validité de l'argument, facultative*

*infV : la valeur numérique attribuée par l'argument à la propriété (borne inférieure), facultative*

*supV : la valeur numérique attribuée par l'argument à la propriété (borne supérieure), facultative*

*U : l'unité dans laquelle sont exprimées ces valeurs numériques*

*Cc : la conclusion de l'argument*

*H : l'hypothèse de l'argument*

*St : le statut avéré ou hypothétique de l'argument*

*D : la date de l'argument*

*Sr : la source d'information à l'origine de l'argument. Lorsque plusieurs sources avancent l'argument, celui-ci est reproduit autant de fois qu'il y a de sources le mentionnant. Ce processus revient à attribuer une pondération aux arguments en fonction de leur répétition*

*Ts : le type de source d'information à l'origine de l'argument.*

Cette formalisation permet de fournir un descriptif détaillé des arguments, qui sera exploité lors de l'étape d'analyse. La relation d'attaque (Dung, 1995), représentant la contradiction entre arguments, est déduite de ce formalisme en considérant que deux arguments, l'un en faveur, l'autre en défaveur du même scénario suivant un même critère s'attaquent mutuellement.

### **3.4 Notion d'attitude collective**

En psychologie sociale, le concept d'"attitude" (au sens anglophone, c'est-à-dire l'opinion, l'état d'esprit) fait référence à une mesure définie pour un individu donné, au travers de questionnaires (Crano, Prislin, 2008 ; Chin, Fisak Jr, Sims, 2002). Plusieurs acceptions de l'attitude coexistent, synonymes ou non avec la notion d'opinion, sans définition uniforme à ce jour (Oskamp, Schultz, 2014). Dans Thomopoulos, Cufi, Le Breton (2020), la définition d'une mesure d'attitude collective est introduite, que nous adoptons ici. Cette proposition, basée sur la collecte préliminaire d'arguments provenant d'une variété de sources et de parties prenantes sur un sujet débattu, est orientée vers la décision collective. Elle peut être réalisée à un stade précoce du débat, puisque la mesure est mise à jour dynamiquement avec l'arrivée de nouveaux arguments.

**Définition 3** Etant donné les notations suivantes :

- $n^+_{s,c}$  désigne le nombre d'arguments positifs en faveur d'un scénario  $s$  selon un critère  $c$ ,
- $n_{s,c}$  désigne le nombre total d'arguments (positifs et négatifs) pour le scénario  $s$  selon le critère  $c$ ,
- $n_c$  désigne le nombre total d'arguments (positifs et négatifs) pour tous les scénarios selon le critère  $c$ ,
- $n$  désigne le nombre total d'arguments pour tous les scénarios et critères,
- $C$  est l'ensemble des critères considérés,

l'attitude collective vis-à-vis du scénario  $s$  est définie comme suit :

$$Attitude\_collective(s) = \frac{1}{n} \sum_C n_c \frac{n^+_{s,c} + 1}{n_{s,c} + 2}.$$

La mesure obtenue est donc un nombre réel compris entre 0 et 1. Les valeurs 0 et 1 sont des limites exprimant respectivement le rejet total et l'adhésion totale au scénario, tandis que 0,5 correspond au statut d'ignorance (en l'absence d'arguments) ou d'ambivalence (en présence d'arguments). Cette mesure d'attitude peut également être calculée pour des points de vue restreints, par exemple certains types de sources d'information, ou des acteurs particuliers (éleveurs, etc.), comme illustré dans la partie 4.

## 4. Analyse bénéfico-risques

A partir des informations recueillies, l'étape suivante consiste à extraire et à modéliser les arguments selon la structure décrite dans la Définition 2. 337 arguments ont ainsi été obtenus et stockés au format relationnel. 178 concernent le scénario 1, 111 le scénario 2, 48 le scénario 3. Ces arguments ont permis de réaliser l'analyse bénéfico-risques répondant aux questions annoncées dans la partie 1.

### 4.1 Attractivité globale et classement des scénarios

En appliquant le calcul de la Définition 3, une mesure d'attitude collective est calculée pour chaque scénario. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1 traduisant, d'après les données collectées, un attrait pour les deux scénarios d'entomoconversion, plus marqué pour le Scénario 1, et un rejet du Scénario 3 "Business-as-usual".

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Attitude collective	0,67	0,62	0,41

TAB. 1 – Attitude collective obtenue pour chaque scénario.

## 4.2 Analyse détaillée

**Quantité d'arguments identifiés par critère ou par acteur.** La répartition quantitative des arguments selon les différents critères traduit des préoccupations différentes entre les scénarios 1 et 2. Pour le scénario 1, la majeure partie des arguments concerne, par ordre d'importance décroissante, la sécurité chimique (23% des arguments), la rentabilité économique (17%), la sécurité microbiologique (15%), l'impact environnemental (12%), l'intérêt nutritionnel (11%), l'acceptabilité sociale (10%), les autres critères représentant moins de 10% des arguments. Pour le scénario 2, la rentabilité économique arrive en tête des préoccupations (21% des arguments) tandis que les aspects nutritionnels sont effacés du fait de l'usage non-alimentaire (biocarburants). Les acteurs concernés sont plus variés dans le scénario 1 (éleveurs d'insectes, mais aussi citoyens, autres éleveurs, fournisseurs de biodéchets, ...).

**Attractivité des scénarios par critère ou par acteur.** Dans la figure 2, les arguments positifs (barres vertes) et négatifs (barres rouges) sont distingués et le calcul de l'attitude critère par critère permet de séparer les critères en différentes classes selon l'opinion favorable, dé-favorable ou mitigée qui en ressort. Dans le scénario 1, les critères liés à la réglementation, l'intérêt nutritionnel et l'impact environnemental obtiennent une évaluation très positive. La même analyse réalisée à un niveau plus fin (celui des sous-critères ou buts) permet d'obtenir des éléments d'explication sur le contenu des arguments. Par exemple, le critère sécurité chimique, qui fait partie de la classe mitigée, regroupe trois types de préoccupations : éviter les risques chimiques dans les frass utilisés comme engrais (opinion très favorable), éviter les contaminations chimiques qui impactent la santé des insectes (opinion mitigée), éviter les contaminations chimiques dans les produits finis (opinion mitigée). La même analyse peut également être réalisée par acteur.

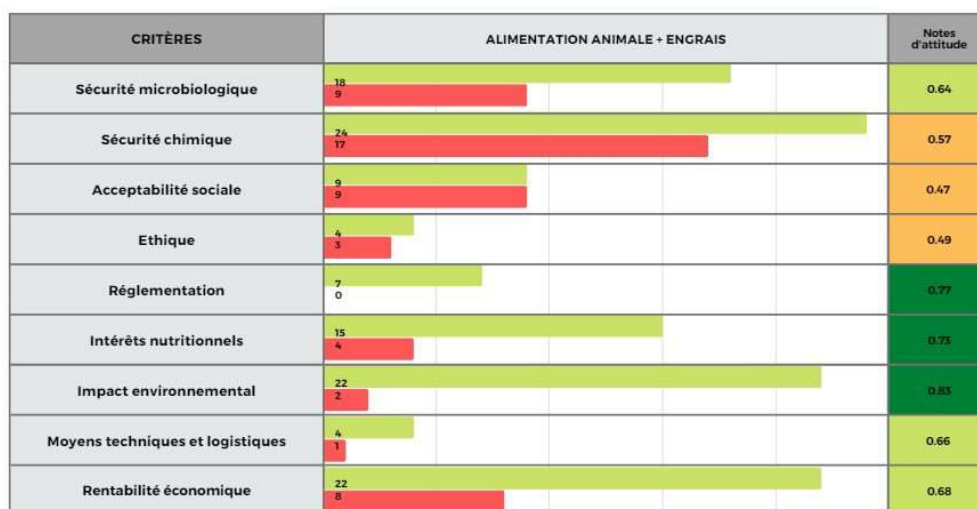


FIG. 2 – Analyse de l'attractivité du scénario 1 par critère

**Analyses complémentaires : Comparaison des scénarios par critère ou acteur, Analyse croisée critères / acteurs.** Des visuels complémentaires (Figure 3) permettent d'identifier les points forts et les points faibles des différents scénarios de façon comparative. La Figure 3(a) montre que les critères sécurité chimique et acceptabilité sociale sont mitigés dans tous les scénarios. Elle met aussi en évidence des différences entre les deux scénarios d'entomoconversion sur certains critères : nutritionnel, puisque le scénario 1 est à usage alimentaire tandis que le scénario 2 vise la production de biocarburant ; mais aussi en termes de réglementation, plus cadrée dans le cas du scénario 1, de rentabilité économique plus prometteuse dans le scénario 2, ou d'éthique en termes de bien-être animal. Dans la Figure 3(b), le calcul de l'attitude conjointement par critère et par acteur permet de montrer, pour le scénario 1, que la majorité des acteurs concernés n'escomptent que des bénéfices du développement de l'entomoconversion, à l'exception des éleveurs d'insectes, qui devront faire face aux difficultés de mise en place de cette nouvelle filière. Par exemple sur le plan de la nutrition des insectes (jugé très défavorable), ils devront s'adapter à l'utilisation des nouveaux substrats alimentaires que sont les biodéchets, pour bien mener l'alimentation des insectes.

L'analyse réalisée a donné lieu à un rapport de 38 pages présentant l'étude détaillée de chaque scénario et ne pourra donc pas être présentée ici de façon approfondie. Il est à noter que les résultats ont servi d'amorce à la discussion au sein du consortium, notamment sur la plus forte attractivité économique du scénario biocarburants. Des aspects pointus ont pu être soulevés au travers de l'analyse proposée. En particulier, une question centrale semble porter sur la nature et la qualité des lipides extraits des larves d'insectes, les besoins différant entre les scénarios : la qualité nutritionnelle des lipides et notamment leur richesse en acides gras oméga-3 prime dans le scénario alimentation animale pour le rendre concurrentiel vis-à-vis des aliments actuellement utilisés dans les élevages ; la qualité technologique des lipides est en revanche prioritaire pour le scénario biocarburants. La nécessité de connaissances complémentaires et d'expérimentations dans ce domaine a ainsi été relevé.

(a)

CRITÈRES	Alimentation animale + engrais	Biocarburants + engrais	Référence
Sécurité microbiologique	0.64	0.62	0.61
Sécurité chimique	0.57	0.55	0.55
Acceptabilité sociale	0.47	0.44	-
Ethique	0.49	0.34	0.42
Réglementation	0.77	0.62	0.47
Intérêts nutritionnels	0.73	0.60	0.34
Impact environnemental	0.83	0.74	0.09
Moyens techniques et logistiques	0.66	0.64	0.34
Rentabilité économique	0.68	0.71	0.44

(b)

Alimentation animale + Engrais	ACTEURS						
	Agriculteurs	Citoyens	Producteurs de biodéchets	Éleveurs d'insectes	Éleveurs de poissons	Éleveurs de volailles	Éleveurs toutes filières
CRITÈRES							
Sécurité microbiologique				0.64			
Sécurité chimique				0.57	0.67	0.67	0.67
Acceptabilité sociale				0.43	0.75		0.75
Ethique		0.81		0.20	0.75	0.83	0.83
Réglementation			0.75	0.78			
Intérêts nutritionnels	0.73	0.78		0.20	0.88	0.80	0.80
Impact environnemental			0.75				
Moyens techniques et logistiques			0.75	0.54			
Rentabilité économique	0.76		0.83	0.63	0.50	0.64	0.64

FIG. 3 – Analyse détaillée : (a) Comparaison des scénarios par critère et (b) Analyse croisée

## 5. Conclusion

La mobilisation du modèle d'intégration des connaissances présenté a répondu aux questions posées. L'attractivité globale de chaque scénario a été calculée, ce qui permet de les classer. La quantité d'information disponible par critère et par acteur est connue, de même que l'attractivité de chaque scénario vu sous l'angle de chaque critère ou de chaque acteur. La prise en compte des buts suggère les raisons de l'attractivité. Il est également possible de comparer les scénarios critère par critère et acteur par acteur.

L'approche permet aussi d'identifier les acteurs les plus satisfaits, pour quelles raisons, dans chaque scénario. La méthode proposée est générique, tant sur les étapes de l'analyse que sur les visuels utilisés pour présenter les résultats, et utilisable dans d'autres domaines, qu'ils relèvent ou non des sciences du vivant.

Les limites proviennent principalement de la non-complétude des informations récoltées, liée à l'immaturation du champ de connaissances. En effet, dans le cas d'un développement industriel et scientifique récent, des impacts nouveaux peuvent apparaître par la suite, suivant les évolutions réglementaires et l'avancée des recherches. D'autre part, les acteurs qui communiquent sur le sujet de l'entomoconversion sont probablement plutôt favorables à cette activité. Dans un champ de connaissances plus mature, le problème ne se poserait pas. Les analyses bénéfico-risques obtenues sont en effet d'autant plus réalistes que l'expérience des acteurs s'accumule et que les graphes de connaissance deviennent plus précis.

## Remerciements

Cette étude a bénéficié du soutien du projet FLY4WASTE 2022-2024 financé par l'INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement), métaprogramme BETTER (Bioéconomie pour les territoires urbains).

## Bibliographie

ADEBIOTECH (2022), <https://asso.adebiotech.org/new-stakes-and-challenges-of-the-industrial-insect-rearing-industry/>

AMGOUD L., PRADE H. (2009), Using arguments for making and explaining decisions, *Artificial Intelligence*, vol 173, n°3-4, p. 413 - 436

BESNARD P., HUNTER A. (2008), *Elements of Argumentation*, The MIT Press

CAMMACK J. A., MIRANDA C. D., JORDAN H. R., TOMBERLIN J. K. (2021), Upcycling of manure with insects: current and future prospects, *Journal of Insects as Food and Feed*, vol 7, n°5, p. 605 - 619

CHIN M. G., FISAK JR B., SIMS V. K. (2002), Development of the attitudes toward vegetarians scale, *Anthrozoös*, vol 15, n°4, p. 332 - 342

CRANO W. D., PRISLIN R. (2008), *Attitudes and Attitude Change*, Frontiers of Social Psychology, New York : Psychology Press

DUNG P. M. (1995), On the acceptability of arguments and its fundamental role in nonmonotonic reasoning, logic programming and  $n$ -person games, *Artificial Intelligence*, vol 77, n°2, p. 321 - 357

- ENGEL E., PLANCHE C., THOMOPOULOS R., MACOMBE C., NIELSEN LEROUX C., BAZOCHE P., BRESSAC C., DONKPEGAN A., MEDA B., MEZDOUR S., HARCHAOU S., BOUE G., BERRI M., SCHLICH P., SKIBA S., STEYER J. P., BOREL P. (2022), INSECT4CITY: benefits and risks of insect-based bioconversion for recycling bio-waste from urban and peri-urban areas, *Journal of Insects as Food and Feed*, vol 8, supplement 1, p. S75
- FAO (2021), *Looking at Edible Insects from a Food Safety Perspective. Challenges and Opportunities for the Sector*, Rome, Italy
- FLYNN B., THOMOPOULOS R. (2022), The development of a decision support system for the infant food chain, *Global Pediatrics*, vol 2, 100015
- JARKE M., LENZERINI M., VASSILIOU Y., VASSILIADIS P. (2003), *Fundamentals of Data Warehouses*, Springer-Verlag
- KAZA S., YAO L. C., BHADA-TATA P., VAN WOERDEN F. (2018), *What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*, Washington, DC: World Bank Publications
- KURTZ A., THOMOPOULOS R. (2021), Safety vs. sustainability concerns of infant food users: French results and European perspectives, *Sustainability*, vol 13, n°18, 10074
- MEYER A., MEIJER N., HOEK-VAN DEN HIL E., VAN DER FELS-KLERX H. (2021), Chemical food safety hazards of insects reared for food and feed, *Journal of Insects as Food and Feed*, vol 7, n°5, p. 823 - 831
- OSKAMP S., SCHULTZ P. W. (2014), *Attitudes and Opinions (3rd ed.)*, New York: Taylor & Francis
- ROY B. (2016), *Paradigms and Challenges*, p. 19 - 39, New York, NY: Springer New York
- SINGH A., KUMARI K. (2019), An inclusive approach for organic waste treatment and valorisation using black soldier fly larvae: A review, *Journal of Environmental Management*, vol 251, 109569
- SURENDRA K. C., TOMBERLIN J. K., VAN HUIS A., CAMMACK J. A., HECKMANN L.-H. L., Khanal S. K. (2020), Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF), *Waste Management*, vol 117, p. 58 - 80
- TAILLANDIER P., SALLIOU N., THOMOPOULOS R. (2021), Introducing the argumentation frame- work within agent-based models to better simulate agents' cognition in opinion dynamics: Application to vegetarian diet diffusion, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol 24, n°2
- THOMOPOULOS R. (2018), A practical application approach to argumentation for multicriteria analysis and decision support, *EURO Journal on Decision Processes*, vol 6, n°3-4, p. 237 - 255
- THOMOPOULOS R., CUFI J., LE BRETON M. (2020), « A Generic Software to Support



Collective Decision in Food Chains and in Multi-Stakeholder Situations » in *FoodSim 2020 - 11th Biennial FOODSIM Conference*, Proceedings of FoodSim 2020, Ghent, Belgium

VANDEWEYER D., DE SMET J., VAN LOOVEREN N., VAN CAMPENHOUT L. (2021), Biological contaminants in insects as food and feed, *Journal of Insects as Food and Feed*, vol 7, n°5, p. 807 - 822

VINUESA R., AZIZPOUR H., LEITE I., BALAAM M., DIGNUM V., DOMISCH S., FELLÄNDER A., LANGHANS S. D., TEGMARK M., NERINI F. F. (2020), The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals, *Nature Communications*, vol 11, n°233

YUN B., VESIC S., CROITORU M., BISQUERT P., THOMOPOULOS R. (2017), « A structural benchmark for logical argumentation frameworks » in Adams N., Tucker A., Weston D. (Eds.), *Advances in Intelligent Data Analysis XVI*, p. 334 - 346, Springer, Cham