

BARRES DE CÉRÉALES À BASE D'INSECTES POUR UN BONUS PROTÉIQUE

Depuis 2022, la commission européenne a accepté l'introduction d'insectes dans l'alimentation sous différentes formes [1]. Nous nous sommes donc intéressées à ces nouveaux aliments, en s'appuyant sur l'exemple des *Tenebrio Molitor*, généralement appelés vers de farine. En effet, ces insectes ont une haute teneur en protéines [1] et pourraient constituer une alternative aux sources de protéines traditionnelles dont la production aggrave les problématiques environnementales actuelles (déforestation, émission de GES, pollution des milieux, perte de biodiversité...). Selon l'ADEME, un quart des émissions de GES de la France provient de notre alimentation. C'est pourquoi l'un des enjeux majeurs de la transition écologique réside dans le changement de nos habitudes alimentaires vers une agriculture et une alimentation plus durable. ✓

Nous nous sommes donc demandées à quel point les vers de farine seraient de bons candidats à la conversion à l'entomophagie, notamment incorporés sous formes de poudre dans des barres de céréales, et si leur consommation pourrait être favorable aux transitions agroécologiques et alimentaires. ✓

Pour y répondre, nous nous sommes penchées sur le temps de mise en place d'un tel élevage, son coût énergétique et monétaire et son impact environnemental. Enfin, en vue d'évaluer l'efficacité de son intégration dans l'alimentation humaine, nous avons mis en place un produit fini à partir de poudre de *T. Molitor* : une barre de céréales, proposée à plusieurs testeurs pour une analyse sensorielle.

Étude préliminaire autour de l'entomophagie

Nous avons d'abord réalisé un sondage auprès de 183 personnes pour connaître leur position sur l'entomophagie.

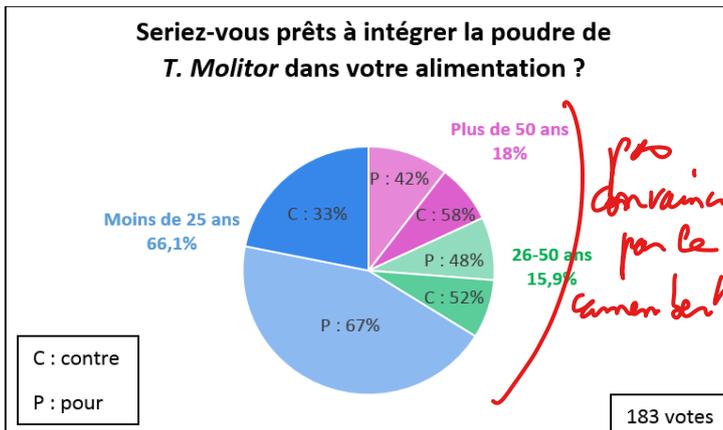


Figure 1 : Résultat du sondage de 183 personnes

Ce diagramme révèle que les personnes de moins de 25 ans sont plus enclines à l'entomophagie que les personnes plus âgées, dont l'avis est mitigé. Nous verrons ensuite, après qu'ils aient goûté nos barres de céréales, si leur avis évolue ou non. Cela nous permettra de donner un ordre d'idée de la possibilité d'acceptation des insectes dans l'alimentation humaine.

I- Mise en place d'un élevage de *Tenebrio Molitor*

A- Notre élevage

Pour réaliser nos barres, nous avons récupéré des *Tenebrio Molitor* de Magalie BRONNER qui réalisait un élevage pour ses élèves. Elle nous a donné 137 individus adultes, une nymphe et 95 larves.

Nous avons séparé les différents stades en 3 boîtes, pour mieux suivre leur évolution et car les adultes ainsi que les larves sont cannibales ([3] p26). Nous y avons disposé de la farine de blé bio puis une strate épaisse de litière de copeaux de bois (dans laquelle les femelles peuvent pondre leurs œufs). Nous avons aussi ajouté dans le bac pour adultes une couche de mouchoirs déchirés en surface, car les *T. Molitor* vivent préférentiellement dans l'obscurité ([3] p26). Par la suite, nous avons ajouté un tissu fin au-dessus des bacs afin de les conserver à l'obscurité et de réduire les variations thermiques.

Nous les avons nourri avec du pain de la cantine et des fruits et légumes (pommes, carottes, salade) qui sont leur seule source d'hydratation ([3] p26), et nous avons disposé les bacs à côté des radiateurs du lycée dont le thermostat indique une température entre 25 et 30°C, idéal pour la croissance et l'évolution des *T. Molitor*.

Enfin, nous avons mis sur les bacs une moustiquaire évitant que d'autres insectes viennent contaminer le milieu de vie des individus que nous suivons.

jeune 25-50 70 peut-être mieux...



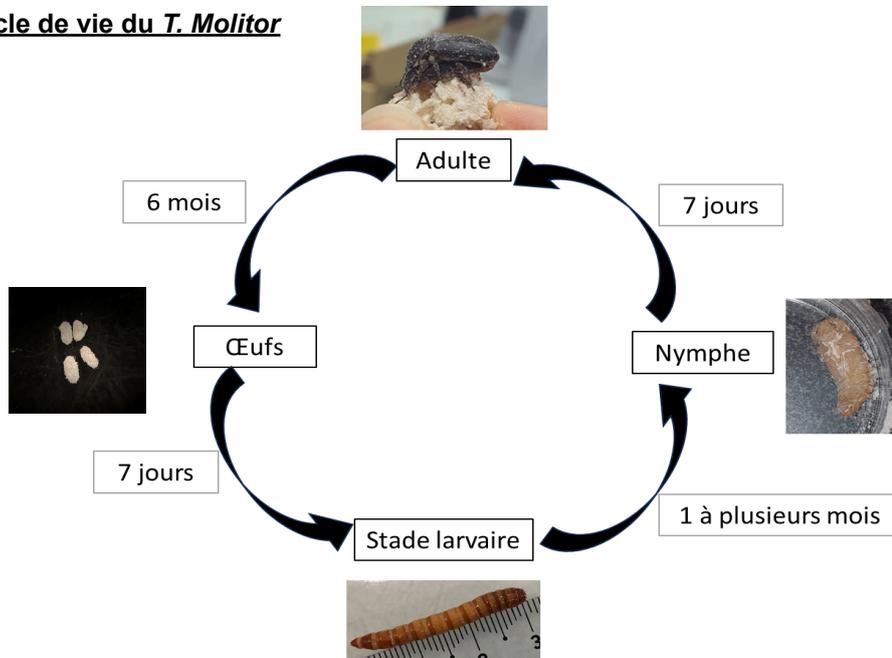
Figure 2 : Photos des bacs avec les adultes (à gauche) et les larves (à droite).

A côté du roxik au dessus ?

B- Cycle de vie du Tenebrio Molitor

Le *T. Molitor* est un Arthropode de l'ordre des Coléoptères et de la famille des Tenebrionidae ([4] p5). Cet insecte vit dans des lieux sombres et humides, préférentiellement dans les greniers et les entreprises de transformation de la farine, mais aussi dans du bois pourri ou sous des pierres ([3] p24)

Figure 3: Cycle de vie du T. Molitor



a) Étude du stade larvaire :

Pour estimer quand congeler les larves de *T. Molitor*, nous avons choisi 10 larves de 0,7cm et les avons isolées dans un autre bac. Nous les avons mesurées et pesées tous les 2 jours pendant 3 mois et demi dans le but d'observer un palier de croissance qui montrerait qu'elles ont atteint leurs taille et poids maximaux avant de se nymphoser, et que c'est donc le moment de les congeler pour les tuer, avant de les sécher au four.

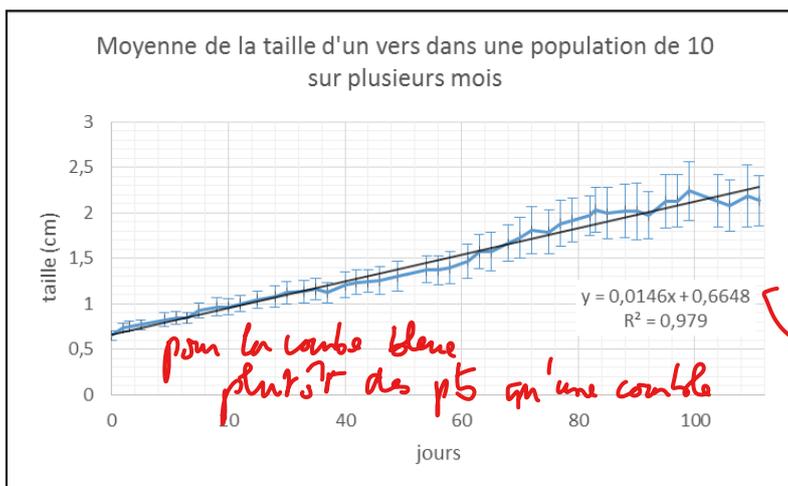


Figure 4 : Taille des vers en fonction du temps

Les barres d'erreur correspondent à un intervalle de confiance à 95% calculé grâce au coefficient de Student. ✓

étonnant pas mal de variabilité dans la taille

mais pas dans la masse apparemment...

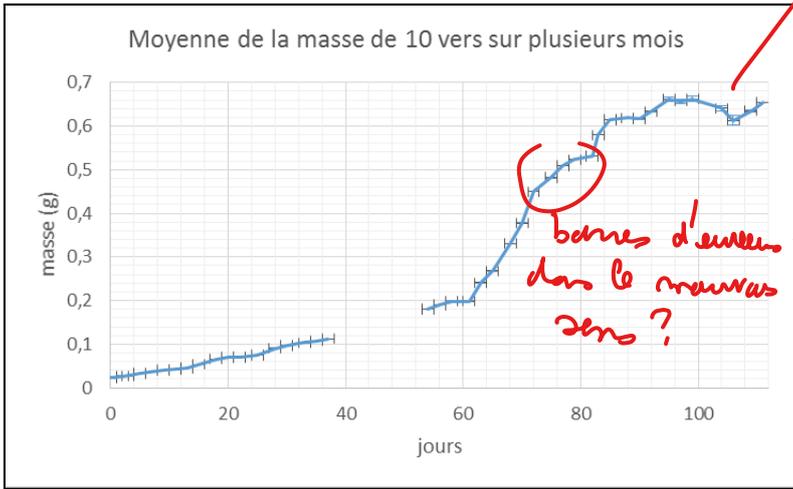


Figure 5 : Suivi de la masse de 10 vers en fonction du temps

Les barres d'erreur correspondent à un intervalle de confiance à 95% calculé grâce au coefficient de Student.

Les larves atteignent un palier massique au bout d'environ 95 jours, correspondant à une taille d'environ 2,1 cm d'après notre équation de droite. Pour la suite de nos mesures, nous avons donc congelé les larves mesurant minimum 2,1 cm.

barres d'erreur dans le mauvais sens ?

pourquoi perdre le max ?

De plus, 10 vers de taille maximale pèse 0,76g. Or, leur poids est divisé par deux lors de leur séchage. Nous conviendrons par la suite que 10 vers réduits en poudre pèsent alors 0,38g. Nous n'avons pas eu accès à une balance assez précise pendant deux semaines donc nous n'avons pas pu peser les dix vers, d'où le trou.

à mettre sur le graphique.

a) Étude de la nymphose

Nous avons filmé 4 nymphes dès leur entrée en nymphose pendant une semaine, avec pour objectif de filmer la transformation en adulte et d'estimer la durée de cette transformation. Vous trouverez notre vidéo, réduite à 3min30, avec le lien [6]. Nous n'avons pas pu filmer d'autres transformations, mais celle-ci a pris [nb d'heures/jours].

vous en filmez qq chose ?

C- Mesure de l'empreinte carbone de cet élevage et comparaison

Nous avons isolé 10 individus adultes dans une cuve pour pouvoir mesurer la quantité de CO₂ émise au bout de 8 minutes, à l'aide d'une sonde à CO₂ PASCO Wireless.

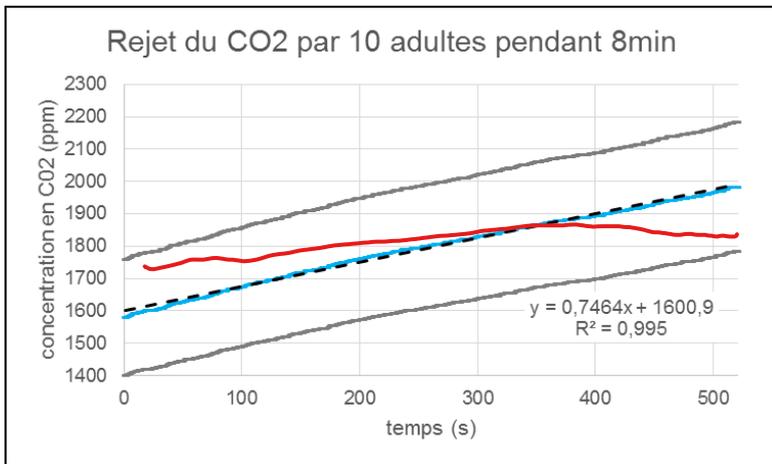


Figure 6 : Mesure de la quantité de CO₂ émise par 10 T. Molitor au stade adulte sur 8min.

Les courbes grises correspondent à l'incertitude de mesure indiquée par l'appareil.

elle sont énormes...

la courbe que j'ai mise en rouge est-elle possible ?

Ainsi, 10 adultes émettent entre 383,8 ppm et 424,2 ppm de CO₂ en 520s. Ces mesures nous permettent de calculer la quantité de CO₂ émise par un élevage de T. Molitor : pour fabriquer 100 g de protéines à partir de T. Molitor, il faut 119,2 g de poudre sèche, ce qui correspond à environ 3137 vers qui ont grandi pendant 95 jours. En supposant que les larves libèrent la même quantité de CO₂ que les adultes, l'élevage de ces 3137 vers émet entre 1,9 Gppm et 2,1 Gppm de CO₂.

Aliment	Empreinte carbone (kg CO ₂ e/kg)
Bœuf	36,6
Œufs	2,6
Dinde	6,13
Soja (steak végétal)	2,17
Lentilles	0,47
Oléagineux (amande, cajou)	~3
Céréales complètes (quinoa, sarrasin)	~1,5
Tenebrio Molitor déshydratés	À calculer (attention ppm a refaire)

Figure 7 : Comparaison de l'empreinte carbone de différentes sources de protéines

ordre de grandeur ?

En calculant l’empreinte carbone de l’élevage d’un kg de *T. Molitor* et en la comparant aux empreintes carbones d’autres activités agricoles [9] [10], nous avons mis en évidence que l’élevage de nos vers a une empreinte carbone plus faible au regard de sa richesse nutritionnelle. Toutefois, il semble nécessaire de manipuler ces résultats avec précaution car nous ne connaissons pas les paramètres exactes de mesure de l’ADEME, et nous n’avons pas pris en compte les émissions liées à la production de la nourriture ou la transformation de nos vers dans les calculs.

D- Coût de l’élevage de *T. Molitor* (eau, énergie, espace, prix)

Figure 8 : Comparaison des coûts pour la production de différents produits agricoles

revoir la présentation (pas agricole)

Aliment	Consommation d'eau (L/kg)	Consommation d'énergie (MJ/kg)	Occupation des sols (m ² /kg)	Coût de production (€/100 kg)
Bœuf (viande)	≈ 15 000 L en incluant l'eau de pluie (550 L hors eau de pluie)	88 MJ	≈ 214 m ² (principalement prairies pour l'alimentation)	≈ 360 € (~200-650 € selon le système d'élevage)
Œufs	≈ 3 300 L (beaucoup plus faible en eau "bleue" en France)	20 MJ (production d'aliments + élevage ; beaucoup moins que la viande de bœuf)	≈ 7-8 m ² (pour les cultures de grains servant d'aliments des poules)	≈ 120 € (par 100 kg d'œufs coquille en élevage standard, 2022)
Dinde (viande)	≈ 4700 L	25 MJ (un peu plus que le poulet, conversion alimentaire plus élevée)	≈ 10 m ²	≈ 177 € (par 100 kg de dinde standard, 2022)
Soja (steak végétal)	≈ 800 L	5-10 MJ (faible : culture nécessitant peu d'intrants + transformation)	≈ 3 m ² (cultures de soja à haut rendement)	≈ 20 € (par 100 kg de graines de soja)
Lentilles	≈ 1250 L (France, hors pluie – légumineuse peu irriguée) – empreinte hydrique totale ~4 000 L (moyenne mondiale)	2-3 MJ (très faible : 1,6-3,3 MJ/kg mesuré en Suède)	≈ 4 m ² (~3-6 m ² /kg selon les rendements- et l'utilisation d'intrants-)	≈30-50 € (culture rentable avec prix > 300 €/t)
Amande (oléagineux)	≈ 8 000 L (empreinte eau totale par kg, culture irriguée) – 4 000-5 000 L (certaines estimations plus basses)	≈ 18 MJ	≈ 12 m ² (vergers à rendement ~2 t/ha, surface arboricole)	300 € (par 100 kg d'amandes décortiquées, coûts élevés d'irrigation)
Noix de cajou	≈ 14 000 L (empreinte eau totale mondiale par kg de noix de cajou)	~ 10-15 MJ (collecte/écilage manuels, peu mécanisé)	~ 8-10 m ² (rendement modéré)	Non renseigné: Import – coût variable (petits producteurs tropicaux)
Quinoa (céréale)	≈ 1 600 L (souvent eau de pluie)	~ 8-12 MJ (mécanisation faible, transport maritime inclus)	~ 4 m ² (rendement modéré ~2-3 t/ha)	Non renseigné: Import Amérique du Sud – prix élevés, production encore marginale en France
Sarrasin (blé noir)	≈ 1 600 L (très majoritairement eau de pluie)	~ 5 MJ	~ 5 m ² (rendement ~2 t/ha en moyenne en France)	≈ 15 € (coût proche pour les autres céréales en France)
Tenebrio Molitor déshydratés	≈ 0 (besoin hydrique comblé par les aliment; ex: pomme)	~ 6 MJ	~ 0,06 m ²	≈ 15€ (chauffage + farine + pomme)

6 commentaires ? 4 diagrammes en barres ? - référence ?

Ainsi, le coût en ressources (eau, énergie, géographie, budgétaire) pour l’élevage de vers de farine est minime par rapport aux autres sources de protéines, et se montre intéressant pour la transition écologique et pour l’économie des ressources.

III/ Etude de la composition de la poudre de *T. Molitor*

A- Dosage des protéines

Nous avons voulu doser la teneur de protéines dans la poudre de *T. Molitor* obtenue grâce à notre élevage. Pour cela, nous avons utilisé la méthode de Biuret et la spectrophotométrie. En effet, le réactif de Biuret passe du bleu au violet lorsqu’il est en contact avec des protéines. Nous avons donc réalisé une courbe étalon avec des solutions d’albumine de sérum bovine à 98% de protéines.



Figure 9 : spectre d’absorption d’une solution d’albumine de bœuf à 5,88 g/L de protéines.

Cadre plus petit mais légende et graduation en plus grand!

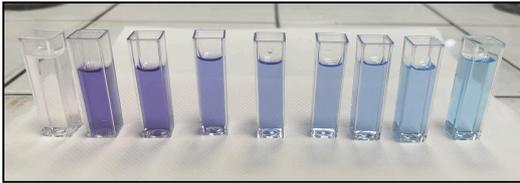


Figure 10 : Photographie des solutions réalisées après avoir réagi avec le Biuret (de gauche à droite : eau distillée (solvant) puis les solutions de la plus concentrée à la moins concentrée en albumine de bœuf).

On réalise donc notre courbe d'étalon à 558 nm.

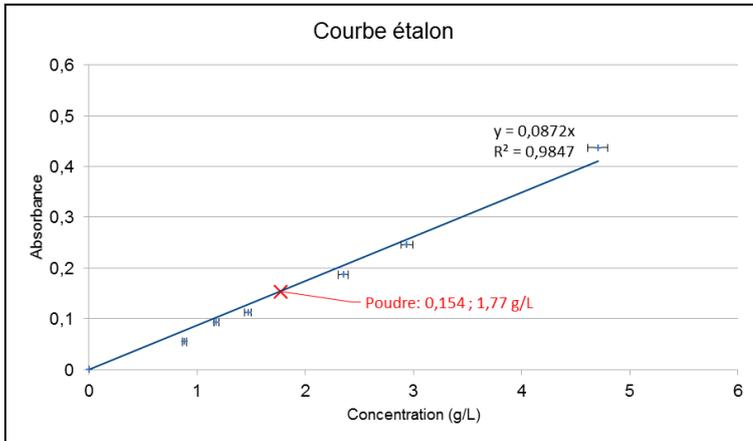


Figure 11 : Courbe étalon pour le dosage des protéines à partir de solutions d'albumine de bœuf.

Les barres d'erreur ont été obtenues à partir de la méthode de Monte-Carlo.

formulation usuelle?

Nous avons séché les larves de *T. Molitor* au four puis nous les avons broyées finement. Nous avons ensuite dissous 3g de poudre dans 250 mL d'eau distillée. Cette solution a été diluée par un facteur 35/100, et nous avons prélevé 2 mL de cette solution pour qu'elle réagisse avec 3 mL de réactif de Biuret. Nous avons obtenu une absorbance de 0,154, ce qui correspond à une concentration en protéines de 1,77 g/L d'après la **figure 11**. Ainsi, la poudre a une teneur en protéines de 42,1% ± 0,5% d'après la méthode de Monte-Carlo. Cette teneur en protéines est plus faible que celle annoncée par la commission européenne (entre 54% et 60% [1] p.7), ce qui pourrait s'expliquer par une alimentation différente des larves du commerce, une dissolution incomplète des protéines dans l'eau, ou par la congélation des vers avant cuisson. Dans la suite de notre rapport, nous prendrons en considération la teneur en protéines d'une farine de commerce (59,6%), achetée pour réaliser nos barres de céréales dans le respect de la réglementation européenne. *! bien !*

B- Comparaison de la proportion en protéines avec d'autres aliments

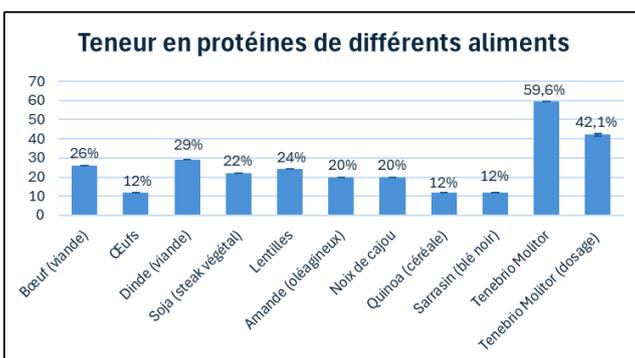


Figure 11 : Teneur en protéines de différents aliments
Les valeurs sont issues de la référence [11]. La première valeur pour Tenebrio Molitor correspond à celle indiquée sur le paquet acheté pour réaliser nos barres de céréales.

C- Mesure de la quantité de sucres



Figure 12 : Mesure de la concentration en glucose dans 3g de poudre de *T. Molitor* dissous dans 250 mL de deux solvants différents (eau en haut, éthanol en bas).

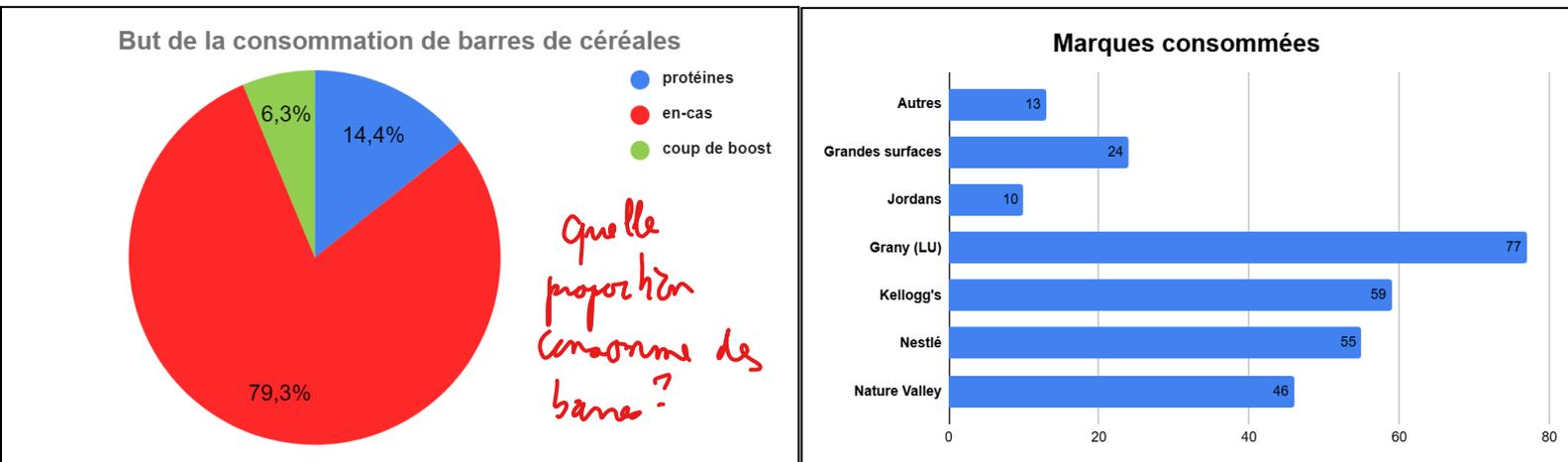
On en conclut que la poudre contient seulement quelques traces de glucose, peu importe le solvant utilisé.

un peu rapide...

III/ Transformation en barres de céréales

A- Sondage des testeurs

Figures 13 : Résultats du sondage sur les habitudes de consommation de barres de céréales [2]:



on ne voit pas ça dans les graphes au dessus

Ce sondage révèle que les gens consomment assez régulièrement des barres de céréales, justifiant notre intérêt envers ces aliments. De plus, on remarque que seulement 1/7 des sondés consomment des barres de céréales pour leur apport protéique ; celles du commerce ne semblant donc pas être un apport protéique significatif par rapport à d'autres aliments auprès des personnes sondées. En effet, les barres de céréales les plus consommées par les personnes sondées contiennent 5,4% de protéines (barres de céréales au chocolat Grany LU, [2]).

De plus, la majorité des sondés semble accepter d'intégrer des insectes dans leur alimentation, notamment pour leurs apports protéiques, la diversification alimentaire et leur moindre impact écologique et sur la santé face à la consommation de viandes.

B- Mise en place du produit fini : recette et valeurs nutritionnelles

Recette pour 22 barres de céréales d'environ 20.8g :

- 120g de flocon d'avoine
- 40g huile de coco
- 40g miel
- 200g chocolat noir
- 70g de farine de *T. Molitor* (pour avoir 15% et respecter les normes européennes [1]) ou de farine de blé (témoin)

Valeurs nutritionnelles (barre aux insectes):

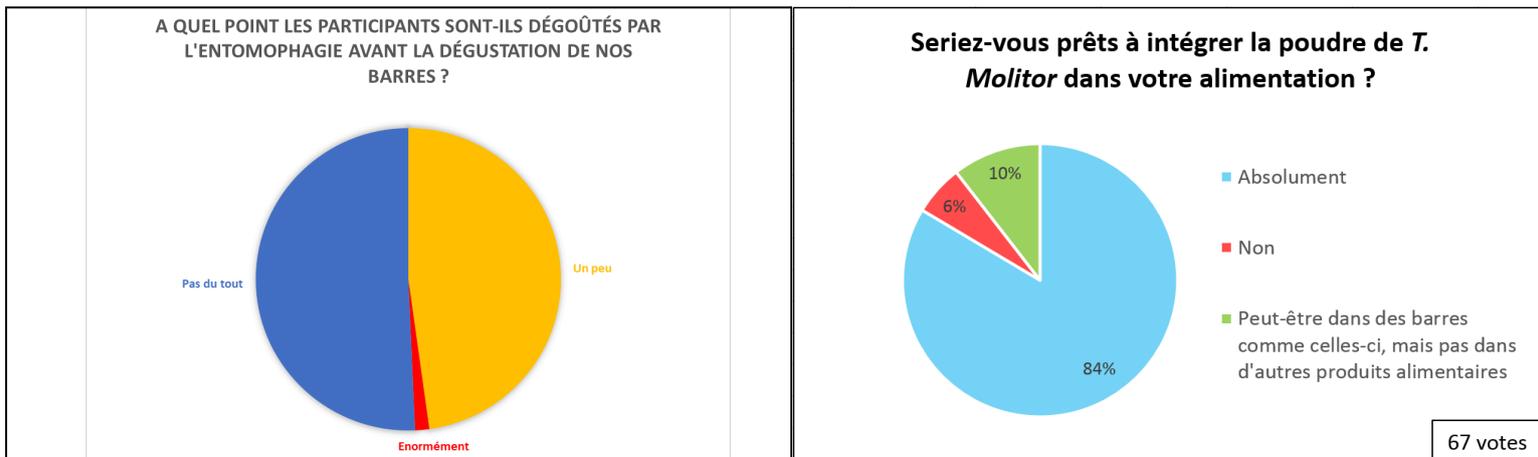
Protéines : 14,4 %
Glucides : 45,7 %
Matières grasses : 28,8 %



Figure 14 : photographies des barres de céréales de 5g (la plus foncée: aux insectes ; la plus claire.

C- Dégustations

Figures 15 : Résultats avant la dégustation (à gauche) et après les dégustations (à droite) pour 67 participants:



Alors que près de la moitié des sondés ne semblaient pas *enclin* à consommer des insectes avant de goûter nos barres de céréales, 84% le sont finalement après la dégustation. Notre produit semble donc les avoir convaincus. Cependant, il faut noter que la majorité des participants ont moins de 25 ans, catégorie d'âge qui était plus encline à l'entomophagie d'après notre premier sondage.

Nous avons réalisé une dégustation auprès de 33 personnes qui avaient le droit de voir les barres. Nous leur avons présenté en premier la barre aux insectes (barre 1) puis la barre sans insectes (barre 2), puis leur avons fait répondre à un questionnaire [7].

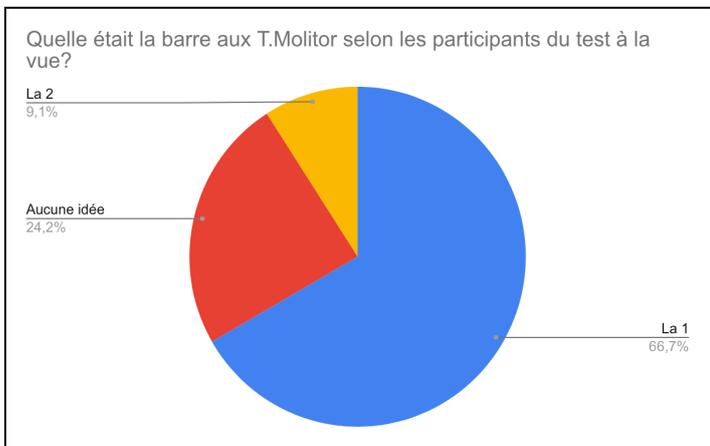


Figure 16 : Résultats de la dégustation à la vue réalisée par 33 personnes

Plus de 2/3 des sondés ont reconnu la barre aux insectes, notamment de par leur aspect très différent qu'on observe sur la **figure 14**.

Cette différence d'aspect de la barre témoin et de la barre aux insectes constituait un biais de notre sondage. Nous avons donc réalisé une nouvelle dégustation auprès de 34 personnes différentes des précédentes, cette fois-ci à l'aveugle. Nous leur avons présenté en premier la barre aux insectes et nous leur avons soumis un nouveau questionnaire [8].

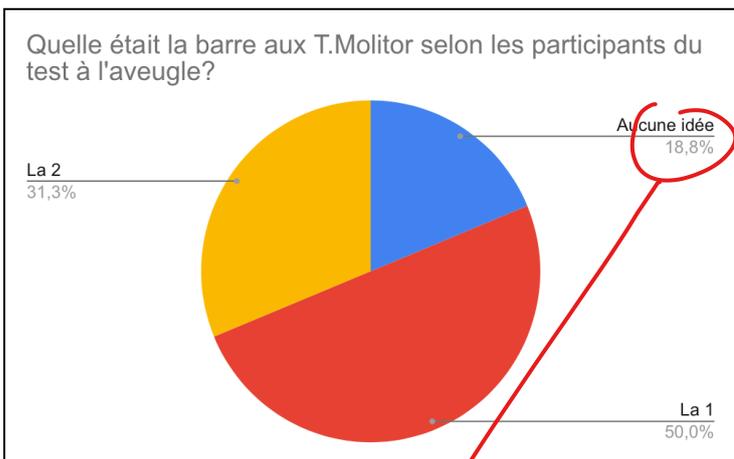


Figure 17 : Résultats de la dégustation à l'aveugle réalisée par 34 personnes.

Cette fois-ci, seulement la moitié des sondés l'ont reconnue.

ça ne devrait pas être le 1^{er} pourcentage ?

Nous les avons également interrogés sur ce qui leur a permis de reconnaître les barres et sur les différences qu'ils ont constaté

Je n'ai pas bien compris

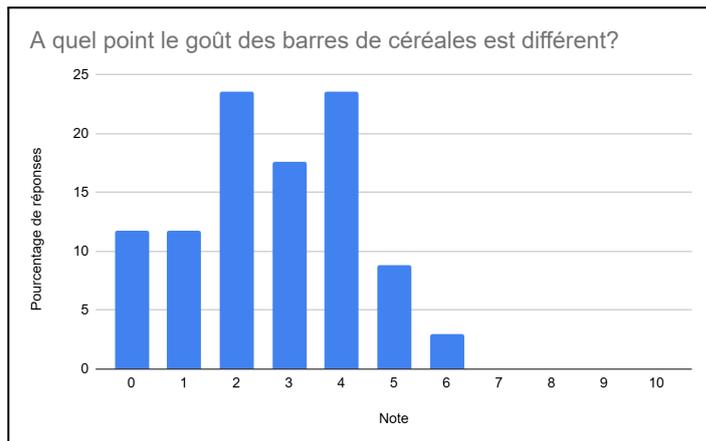
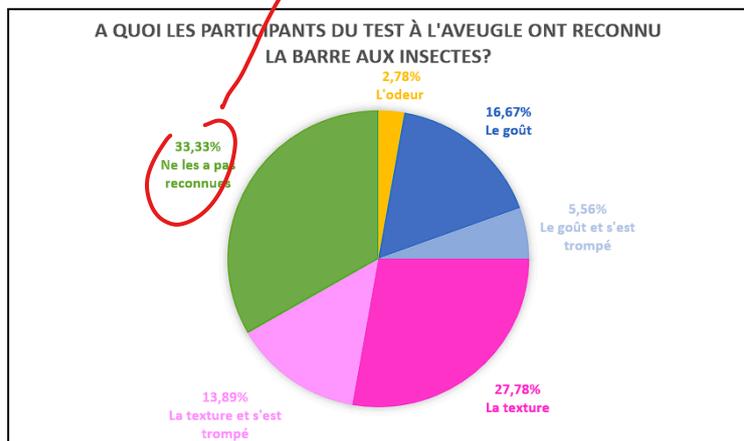


Figure 18 : Facteurs de la reconnaissance de la barre aux insectes.

Figure 19 : Différences au goût quantifiées entre les barres par les testeurs.

Les participants ont mis 0 s'ils ne percevaient aucune différence gustative entre les deux barres de céréales, et 10 si les barres étaient drastiquement différentes.

Ainsi, les deux barres semblent assez similaires au niveau du goût. Les insectes apportent un goût de noisettes qui a plu à de nombreux testeurs d'après leurs retours verbaux, alors que le goût des flocons d'avoine était plus prononcé dans la barre témoin. Les barres aux insectes étaient également plus friables que les témoins, d'où la différence de texture signalée. Cependant, elles restent difficiles à différencier : les insectes ne présentent pas de goût désagréable, ce qui est un avantage pour leur intégration dans l'alimentation humaine.

Conclusion :

Nous avons étudié l'intérêt nutritionnel de *Tenebrio Molitor*, l'impact écologique de son élevage et sa transformation en un produit fini : une barre de céréales. Nous avons mis en évidence que l'empreinte carbone de cet élevage est inférieure à celle des élevages classiques, qu'il est moins coûteux en termes de ressources pour un même rendement et qu'il engendre très peu de déchets. De plus, sa teneur protéique est aussi, voire plus, importante que celle des sources protéiques déjà utilisées dans l'alimentation humaine. Parallèlement, les résultats des dégustations montrent que le *T. Molitor* semble être un bon candidat pour l'entomophagie. Ainsi son intégration dans notre alimentation constitue une bonne alternative à la consommation de viandes ou de végétaux dans le cadre d'une transition agroécologique et alimentaire. Cependant, la proportion de *T. Molitor* dans les aliments est encore très réglementée par la commission européenne, ce qui ralentit son introduction. Enfin, de nombreuses personnes sont encore réticentes à l'entomophagie, c'est pourquoi un travail de communication est nécessaire afin de briser les *a priori*.

Remerciements:

Un grand merci à Magali BRONNER et à ses élèves, pour nous avoir confié son élevage de T. Molitor. Nous remercions également Maëlle AMOSSÉ, Faustine ROCCA--SAVIO, et Giovan GASSIES pour nous avoir aidé dans l'entretien de notre élevage et les mesures de nos individus.

Bibliographie:

[1] Commission européenne (8 février 2022). Règlement d'exécution (UE) 2022/169 de la Commission autorisant la mise sur le marché des formes congelée, séchée et en poudre de vers de farine (larves de *Tenebrio molitor*). Consulté le 22 décembre 2024.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R0169>

[2] Référence originale. Questionnaire sur les habitudes de consommation. Réalisé en novembre 2024. [Questionnaire sur les habitudes de consommation](#)

[3] Agromisa. (2015). Insectes comestibles en Afrique : Introduction à la collecte, au mode de préparation et à la consommation des insectes. Consulté le 30 novembre 2024.

[Insectes comestibles en Afrique. Introduction à la collecte, au mode de préparation et à la consommation des insectes. Agrodok](#)

[4] BOUZID Rayen et BOUBAKER Kahina. (2019). Production et évaluation d'un nouvel aliment d'engraissement pour les volailles « *Gallus gallus domesticus* » à base des larves de Ténébrion meunier. Consulté en mars 2025.

[http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/13558/1/BOUZID Rayen et BOUBAKER Kahina](http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/13558/1/BOUZID%20Rayen%20et%20BOUBAKER%20Kahina)

[5] Institut de l'élevage. (2015). Élevage de ruminants et changement climatique Consulté le 29 octobre 2024.

[Élevage de ruminants et changement climatique - Institut de l'élevage](#)

[6] Référence originale. Vidéo de la transformation d'une nymphe en adulte. Réalisé en mars 2025.

<https://youtu.be/YvawU6kntzA>

[7] Référence originale. Questionnaire donnée lors de la dégustation des barres de céréales à la vue. Réalisé en février 2025.

[Questionnaire de dégustation à la vue](#)

[8] Référence originale. Questionnaire donnée lors de la dégustation des barres de céréales à l'aveugle. Réalisé en février 2025.

[Questionnaire de dégustation à l'aveugle](#)

[9] ADEME, Agence de la transition écologique. (2013). Agribalyse. *Agribalyse*. Consulté le 2 avril 2025.

<https://agribalyse.ademe.fr/>

[10] ADEME, Agence de la transition écologique. (2024). Base empreinte. *Base empreinte*. Consulté le 2 avril 2025.

<https://base-empreinte.ademe.fr/>

[11] ANSES. (2020). Table de composition nutritionnelle des aliments. *CiquaI*. Consulté le 2 avril 2025.

<https://ciquaI.anses.fr>

[12] Ministère de l'agriculture. Agreste. *Agreste*. Consulté le 2 avril 2025.

<https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/>

[13] POORE Joseph et NEMECEK Thomas. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, Vol 360, Issue 6392. Consulté le 2 avril 2025.

<https://science.org/doi/10.1126/science.aag0216>

[14] OiEau. (2012). Volume d'eau utilisé pour produire un kg de poulet. *Les chiffres-clés*. Consulté le 2 avril 2025.
<https://chiffreкле.oi eau.fr/2237>

[15] INRAE. (2013-2016). ECOALIM : une base de données ACV pour l'alimentation animale. *ECOALIM*. Consulté le 2 avril 2025.
<https://ecoalim.hub.inrae.fr>

[16] LEROY François, BESNIER Antoine, BOSQUE Fabrice. (2024). Substituts végétaux ICV pour AGB. *Production d'Inventaires de Cycle de vie "Substituts végétaux" pour la base de données Agribalyse*. Consulté le 2 avril 2025.
<https://doi.org/10.57745/4B2E6Y>

Contacts:

Magalie BRONNER

magalie.bronner@ac-versailles.fr

Collège Armande Béjart, classe SEGPA, Meudon la Forêt