



© Catherine Heilmann

INRAE



Rapport Recherche et Innovation **TRANSFORM 2025**

Département aliments, produits biosourcés et déchets
TRANSFORM



MENTIONS LEGALES

Editeur: Johnny Beaugrand, Chef de département

Comité éditorial: Carole Tournier, Olivier Tranquet, Catherine Garnier, Renaud Escudié, Mathieu Schwartz, Maïa Meurillon, Yassin Refahi, Carole Antoine-Assor, Rachel Boutrou, Laurence Fournaison, Mélanie Delclos.

Design: Mélanie Delclos

*Beaugrand J., et al (2025). Rapport Recherche et Innovation TRANSFORM 2025
Département Aliments, produits biosourcés et déchets. INRAE.*

© INRAE - Photos: médiathèque INRAE, Adobe Stock, Pixabay,
photo de couverture: © INRAE BBF Catherine Heilmann



SOMMAIRE

RAPPORT R&I TRANSFORM

5

Infrastructures et Plateformes
Rayonnement international

11

Partie 1 : Modèles prédictifs et
outils

18

Partie 2 : Optimisation des
procédés

25

Partie 3 : Biotechnologies,
procédés biologiques naturels

33

Partie 4 : Protéines et assemblage
de protéines

40

Partie 5 : Connaître et caractériser
la matière première et la biomasse

49

Partie 6 : Aliments et régimes

61

Partie 7 : Impact environmental et
valorisation

70

CONTACTEZ NOS UNITÉS



Bienvenue dans ce nouveau rapport d'activités du département TRANSFORM !

Année après année, les collectifs évoluent mais notre ambition reste la même : explorer, innover et transformer – pour accompagner la transition vers des systèmes alimentaires et environnementaux plus durables, fondés sur l'optimisation de l'usage des biomasses et l'économie des ressources. Ce rapport 2025 illustre les avancées de nos équipes au fil des axes de notre plan stratégique, avec un regard résolument tourné vers l'avenir, pour répondre aux attentes complexes de la société.

Des modèles prédictifs aux biotechnologies, de l'optimisation des procédés à la valorisation de la biomasse, nos recherches croisent expertises et approches pluridisciplinaires. Les infrastructures IBISBA et CALIS y jouent un rôle clé en fédérant les moyens autour de plateformes d'envergure et méthodologies de pointe. Ce foisonnement scientifique se traduit aussi par des innovations concrètes : nouvelles sources de protéines, procédés plus efficaces, alimentation plus saine, et filières agricoles mieux accompagnées.

Dans un monde en quête d'équilibres durables, notre département agit à toutes les échelles : de la caractérisation fine de la matière première aux impacts environnementaux, en passant par l'optimisation de la qualité des aliments, et toutes les formes de réutilisation et bouclages des cycles et bioproduits.

Cette dynamique est renforcée par une dimension internationale croissante, que nous avons choisi de mettre en avant dans ce numéro, car la science doit en ce moment plus que jamais affirmer sa liberté, son ouverture à la société et son engagement international. La richesse de nos collaborations fait notre force collective et s'illustre dans nos multiples actions : projets européens (19 en coordination sur 2021-2025), laboratoires internationaux associés (6), réseaux européens et internationaux 2RI Infogest qui n'est plus à présenter...

Bonne lecture et merci pour votre confiance et votre intérêt. Suivez-nous et continuons ensemble à transformer les défis en solutions.

Johnny Beaugrand
Chef de Département TRANSFORM

Nos infrastructures et plateformes de recherches

Les infrastructures de recherche sont au cœur d'enjeux économiques et industriels majeurs. Le recours à ces infrastructures est devenu, dans la plupart des disciplines, un impératif en termes de compétitivité scientifique et de rayonnement international. Les stratégies nationales et européennes dans le domaine des infrastructures de recherche se déclinent à travers des "Feuilles de route", celle de la France ayant été renouvelée en 2021.

TRANSFORM est au centre de deux infrastructures de recherche, IBISBA (avec deux dimensions - IBISBA-FR et EU sur la feuille de route européenne ESFRI) et CALIS sur la feuille de route nationale MESR: la première au service d'une recherche multidisciplinaire d'excellence dans le domaine de la biotechnologie et la deuxième dédiée à une approche intégrée de l'alimentation du consommateur à la santé. Ces Infrastructures s'appuient sur des plateformes de recherche distribuées sur le territoire et hébergées dans les différents laboratoires (cartographie).

TRANSFORM au cœur d'IBISBA (Industrial Biotechnology Innovation and Synthetic Biology Accelerator)

EU-IBISBA

ESFRI en 2018, est une infrastructure de recherche translationnelle visant à accélérer le développement des biotechnologies industrielles et environnementales en Europe, en tant que pilier de la bio-économie circulaire. En unissant les infrastructures de recherche de pointe de 12 pays européens et en intégrant les dernières technologies numériques, IBISBA-EU offre aux communautés académiques et industrielles un accès unique à des services de R&D&I intégrés et innovants en biotechnologie, marquant ainsi l'entrée dans l'ère de la « BioIndustrie 4.0 ». Les 31 janvier et 1er février 2024, l'infrastructure IBISBA France, avec le soutien de l'INRAE, a eu l'honneur d'organiser le Mini-Sommet Inspiring Biotech Solutions d'IBISBA-EU. Cet événement a été l'occasion d'annoncer la candidature de la France pour accueillir le siège légal d'IBISBA-ERIC en 2026.

En tant que nœud français d'IBISBA-EU, IBISBA-FR est une infrastructure de recherche distribuée, reconnue comme une Infrastructure Nationale en Biologie Santé (INBS) et inscrite sur la Feuille de Route du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche depuis 2016. Elle propose des modules de



services et apporte son expertise scientifique et technologique à IBISBA-EU. Elle encourage les plateformes de recherche françaises à adopter les normes et pratiques nécessaires pour la production de services dans le cadre d'IBISBA-EU. Réparties sur six sites, les activités des plateformes d'IBISBA-FR couvrent les biotechnologies industrielles et environnementales, depuis la conception assistée par ordinateur de voies de synthèse construites par ingénierie métabolique pour la production de molécules d'intérêt via l'exploitation des données -omiques (génomiques, transcriptomiques, métabolomiques, fluxomiques), jusqu'à la découverte et l'amélioration des enzymes et des souches microbiennes appropriées, ainsi que le développement et la mise à l'échelle de bioprocédés.

INRAE, à travers son département TRANSFORM, est pleinement engagé dans la coordination d'IBISBA-EU et d'IBISBA-FR. Les services proposés par l'institut sont assurés par les plateformes du département : TWB, PICT-ICEO (UMR TBI), AlgoSolis (UMR GEPEA), Bio2E (UR LBE) et 3PE (UMR BBF).

Contacts : management@ibisba.eu / ibisba-fr@ibisba.eu

Web : <https://www.ibisba.eu> / <https://www.ibisba.fr>

TRANSFORM au cœur de CALIS (Consommateur-Aliment-Santé)

L'alimentation, source de forts enjeux économiques, sociaux, environnementaux et de santé, constitue une préoccupation majeure des politiques publiques. L'infrastructure CALIS propose des offres de service et de développement méthodologiques et technologiques performantes et innovantes qui s'appuient sur une organisation distribuée nationale de différentes entités telles que (i) des plateformes analytiques et technologiques de conception et de caractérisation des aliments, (ii) des dispositifs d'études cliniques et d'épidémiologie nutritionnelle, (iii) des plateformes de bases de données de consommation alimentaire, et (iv) des dispositifs d'expérimentation et d'étude des comportements alimentaires. Ces dispositifs, portés par différents partenaires, sont regroupés en trois pôles : Consommateur, Aliment et Santé.

TRANSFORM est particulièrement présent dans le pôle « Aliment » via

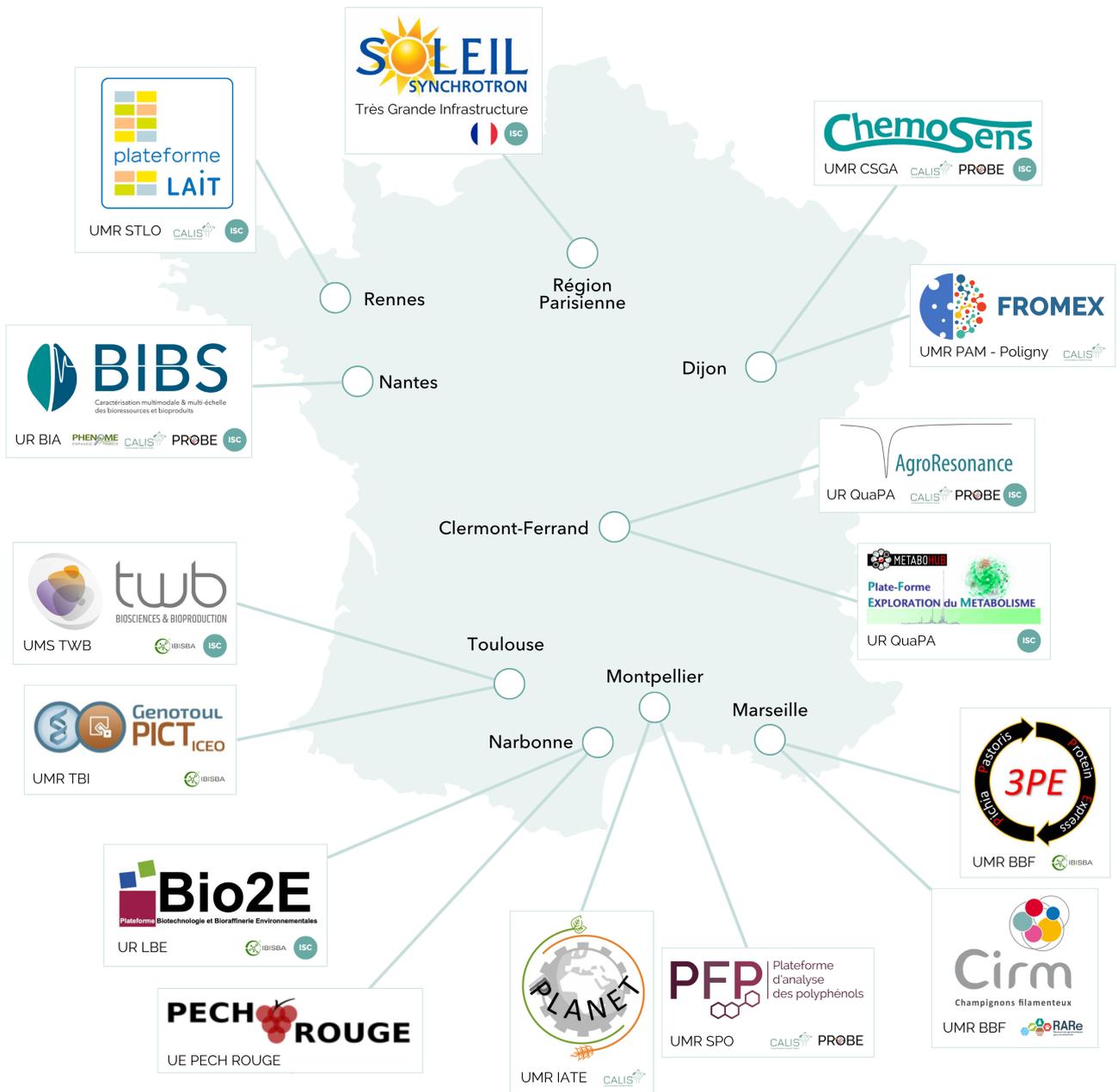


ses plateformes technologiques « Lait » (STLO) et « PLANET » (IATE) et son infrastructure analytique labélisée par INRAE « PROBE ». PROBE propose une expertise multidisciplinaire sur la caractérisation multi-échelle de la structure et des propriétés de systèmes biosourcés, notamment à usage alimentaire. PROBE met en œuvre des technologies de pointe complémentaires : spectrométrie de masse, RMN, IRM, microscopie, chemotypage, analyses sensorielles et études du comportement alimentaire et s'appuie sur une expertise innovante en traitement des données. PROBE repose sur les compétences de quatre plateformes, dont trois labélisées par INRAE, présentant une forte complémentarité en termes de molécules étudiées et d'approches : BIBS (BIA), ChemoSens (CSGA), AgroResonance (QuaPA) et Polyphénols (SPO).

Contacts : probe-ir@inrae.fr ; calis-ir@inrae.fr



Nos infrastructures et plateformes scientifiques



Infrastructures de recherche distribuées



Retrouvez toutes les informations sur nos infrastructures dans la cartographie interactive





Notre rayonnement à l'international

TRANSFORM est fortement impliqué dans la recherche européenne, en tant que coordinateur ou partenaire de projets européens (respectivement 17 et 30 projets sur la période 2021-2025). Ces collaborations témoignent de nos succès dans le programme H2020 (SAFFI, FAIRCHAIN, MULTISOURCE, ZELCOR, NOAW), ainsi que dans le programme Horizon Europe, avec des projets récents répartis entre les piliers 1 (IBISBA) et 2 (clusters 4 – UPWEARS, et 6 – AGRILLOOP).

Ces projets reflètent nos expertises, allant de la maîtrise des risques dans les systèmes alimentaires au développement de technologies et de matériaux favorisant la circularité des systèmes agroalimentaires. Par ailleurs, le portage de deux projets PRIMA (Flat Bread of Mediterranean Area, FUNZYBIO) consolide nos partenariats avec les pays du bassin méditerranéen.

Parmi les projets européens en portage dans le département, nous avons sélectionné quelques exemples dans nos domaines d'excellence ayant conduit à des résultats marquants.



SAFFI: Safe Food for Infants in China and the EU H2020 SC2 SFS 37 - 2019

(RIA EU-China) - coordonné par Erwan ENGEL QuaPA + IATE, SECALIM, LABERCA

Le projet européen SAFFI coordonné par INRAE visait à renforcer la sécurité sanitaire de l'alimentation des 60 millions de nourrissons Européens et Chinois. SAFFI s'est appuyé sur un consortium pluridisciplinaire et multi-acteurs de 20 partenaires sino-européens pour améliorer l'identification, l'évaluation, la détection et la remédiation des risques liés aux dangers microbiens et chimiques des aliments infantiles. Destinés aux académiques, aux industriels et aux pouvoirs publics et valorisés notamment par plus de 80 articles scientifiques, les résultats marquants incluent 1/ des systèmes d'aide à la décision afin d'identifier les dangers clés à surveiller en priorité ; 2/ des procédés industriels « doux » et des pratiques domestiques remédiantes pour limiter les risques chimiques (ex : furanes) tout en préservant les qualités microbiologiques ; 3/ le sample pooling pour renforcer la surveillance des contaminants chimiques alimentaires ; 4/ la volatolomique pour phénotyper les micro-organismes pathogènes dans leur milieu et mieux prédire leur développement.



FAIRCHAIN FAIRCHAIN : Innovative technological, social and organisational solutions for a FAIRer distribution amongst actors of the agri-food value CHAIN H2020 SC2 RUR 06 - 2020 - (IA) coordonné par Geneviève GESAN-GUIZIOU STLO - (Innovation Action H2020, 25 partenaires, 8 pays) visait à renforcer les chaînes de valeur alimentaires « intermédiaires » (IVC) plus adaptées aux petits et moyens acteurs des secteurs des fruits, légumes et produits laitiers. L'objectif était de leur permettre de produire des aliments sains à échelle régionale, tout en incitant les grands acteurs à adapter leurs modèles aux attentes des consommateurs pour des produits régionaux, sûrs et de qualité.

Grâce à des approches de co-création et d'évaluation multi-perspectives, FAIRCHAIN a testé et exploré 16 innovations à travers 6 cas d'études. Parmi elles, certaines ont été démontrées à des TRL ≥ 7 : des modèles de gestion circulaire des coproduits, un incubateur d'innovation alimentaire, des outils de traçabilité basés sur la technologie blockchain ... Le projet a aussi conçu plusieurs modèles d'affaires durables adaptés aux IVC, renforcé les modèles économiques des acteurs impliqués et formulé des recommandations politiques accompagnées d'outils pratiques.



Notre rayonnement à l'international



MULTISOURCE: ModULar Tools for Integrating enhanced natural treatment SOLUTIONs in URban water CyclEs

H2020 SC5 27-2020 (RIA) - coordonné par Jaime NIVALA REVERSAAL

MULTISOURCE est un projet qui facilitera la planification systématique, à l'échelle de la ville, de solutions basées sur la nature pour le traitement, le stockage et la réutilisation des eaux urbaines. MULTISOURCE se concentre sur l'intersection des solutions fondées sur la nature (SfN) avec les quatre domaines clés que sont l'environnement, l'économie circulaire, la société et la politique. Des méthodologies efficaces et inclusives d'engagement des parties prenantes ont été utilisées pour chaque projet pilote MULTISOURCE, ainsi que pour le développement de modèles économiques et d'outils de planification. Les solutions contribuent également à la création d'habitats urbains de valeur et fourniront d'autres services écosystémiques importants. Pour ce faire, deux municipalités (Gérone (ES), Oslo (NO)) et deux municipalités métropolitaines (Milan (IT), Lyon (FR)) ont appliqué les méthodes pour évaluer la mise en œuvre généralisée des SfN dans les zones urbaines.



AGRILLOOP: Pushing the frontier of circular agriculture by converting residues into novel economic, social and environmental opportunities

HE CL6-2022 - CIRC BIO-01-05 - coordonné par Nathalie GONTARD IATE + BIA

Le projet AgriLoop développe des processus de bioconversion sûrs et durables, intégrés dans une approche de bioraffinerie en cascade, afin de convertir une série d'agro-résidus en protéines végétales et microbiennes, en polyesters et autres produits chimiques biosourcés destinés à l'alimentation humaine et animale, à la santé et aux matériaux.

Les objectifs scientifiques et techniques structurants d'AgriLoop sont les suivants i) renforcer les relations scientifiques entre l'Europe et la Chine ; ii) améliorer la récupération de molécules natives hautement fonctionnelles à partir de résidus primaires et secondaires et adapter les schémas de bioconversion aux protéines microbiennes et aux polyesters, afin de surmonter de manière équilibrée les limites liées à la complexité des matières premières, à l'éco-efficacité des processus et aux performances des produits finaux, et en parallèle iii) anticiper les circularités complexes d'une telle bioraffinerie pour se conformer aux exigences de sécurité et de durabilité, guider les avancées scientifiques et technologiques des processus en cascade d'AgriLoop vers des produits finaux adaptés au juste nécessaire (conception frugale) et accélérer leur adoption ultérieure.



FLAT-BREAD MINE: Flat Bread of Mediterranean area; INnovation and Emerging process and technology

PRIMA. Section 1 topic 1.3.12020 - coordonné par Patricia LE BAIL BIA

Le projet Européen PRIMA « FLAT-BREAD-MINE » (2021-2025) s'est intéressé aux pains plats, un produit emblématique de l'espace méditerranéen. Le projet comportait 18 partenaires dont 8 industriels. Outre de nombreuses recettes développées avec/sans gluten impliquant des variétés adaptées au changement climatique, on peut retenir quelques éléments clés : Développement d'un pétrin sous vide et d'un four basse pression favorisant le pain double couche signe de qualité. Confirmation que la précuisson permet de réduire l'indice glycémique et l'impact environnemental. Développement de farines maltées avec des activités maltogéniques (rassissement), xylanase et phytase.



COST, réseaux et Laboratoires Internationaux Associés

Le rayonnement international de TRANSFORM est également renforcé par des actions COST (FOODMC et WATER4REUSE, ce dernier sélectionné lors de l'appel COST 2024), qui favorisent l'émergence de réseaux scientifiques dynamiques, à l'image du 2RI Infogest, véritable pépinière de projets européens.

Depuis 2020, TRANSFORM soutient et finance le fonctionnement de six Laboratoires Internationaux Associés (LIA).

Dans cette section, nous vous proposons un focus sur ces projets qui viennent compléter ce panorama international.



FoodMC: Mathematical and Computer Science Methods for Food Science and Industry

COST- Alberto TONDA, MIA (2016-2020)

Le projet est une action de mise en réseau impliquant des partenaires de plus de 35 pays européens. FoodMC a rassemblé des scientifiques et des praticiens des domaines de la CSM (Computer Science Model) et de l'agroalimentaire, stimulant l'émergence de nouvelles recherches et structurant une nouvelle communauté pour coordonner les efforts de recherche ultérieurs. Exploitant des approches issues de différents sous-domaines des mathématiques et de l'informatique, des modèles mathématiques appliqués à l'ingénierie des connaissances, FoodMC a couvert deux sujets principaux : la compréhension et le contrôle des processus agroalimentaires et l'éco-conception des produits agroalimentaires.



WATER4REUSE: Mainstreaming water reuse into the circular economy paradigm

COST - Jérôme Harmand, LBE (2024-2028)

Water4Reuse (COST Action CA23104) est un réseau européen coordonné par INRAE, dédié à la réutilisation des eaux usées traitées dans une perspective d'économie circulaire. Il réunit des scientifiques, praticiens et décideurs de plus de 30 pays pour lever les freins techniques, réglementaires, économiques et sociaux à la réutilisation de l'eau. L'action favorise les échanges interdisciplinaires, le partage de bonnes pratiques, le renforcement des capacités et le développement de solutions innovantes. Elle soutient ainsi la transition vers une gestion plus durable et résiliente de l'eau, face aux défis du changement climatique et de la raréfaction des ressources.



INFOGEST : processus de digestion des aliments et ses conséquences sur la santé de l'homme

COST Infogest 2011-2015, 2RI depuis 2016 - Didier DUPONT, STLO

Le Réseau de Recherche International (R2I) INFOGEST a été créé en 2011 par INRAE. Il regroupe 800 chercheurs de 300 instituts dans 60 pays. Son objectif est de partager l'état des connaissances sur le processus de digestion des aliments. Le Réseau est structuré en 9 groupes de travail qui portent sur le développement de nouveaux modèles de digestion in vitro, in silico et de modèles d'absorption, la digestion des lipides, de l'amidon et des repas complexes, l'étude du processus oral et les techniques d'imagerie appliquées à la compréhension de la digestion.



COST et Laboratoires Internationaux Associés



FOODPRINT: FOOD engineering for nutrition and health: Phenomena Related to INTERfaces

Porté par Romain JEANTET - UMR STLO et Guillaume DELAPLACE - UMR UMET - Laboratoire partenaire : Université de Soochow, Chine

Le LIA FOODPRINT renforce les recherches sur la modélisation des processus de fabrication et de déconstruction des aliments, pour concevoir une alimentation plus durable et efficace nutritionnellement. Il explore deux axes : d'une part, la maîtrise de l'encrassement et du nettoyage au cours des procédés de fabrication des aliments, protéiques notamment; d'autre part, le développement et la validation de digesteurs physiologiquement pertinents simulant la déconstruction des aliments lors des phases orale, stomacale et intestinale de la digestion.



BIOMATA: BIOrefinery for sustainable MATERIALS and Technical Applications

Porté par Claire MAYER - UMR IATE avec les UMR FARE et UR BIA - Laboratoire partenaire : Scion Institute Nouvelle-Zélande

Le LIA BIOMATA réunit quatre laboratoires de recherche et d'enseignement pour mener des recherches fondamentales et appliquées portant sur la valorisation des ressources végétales pour concevoir des matériaux biosourcés répondant aux besoins des applications techniques de demain. Ces travaux s'ancrent dans une démarche de bioéconomie circulaire, en limitant l'empreinte écologique des procédés et en intégrant la fin de vie des produits dès leur conception.



REWACT: Reducing food WASTE in cold Chain of Tropical countries

Porté par Onrawee LAGUERRE - UR FRISE - Laboratoire partenaire : Univ. Kasetsart King Mongkut Institute Thaïlande

Le LIA REWACT a pour objectifs d'associer la réfrigération et la chaîne du froid (compétences FRISE), les sciences d'aliments et d'emballages biodégradables (KU) et la technologie de post-récolte notamment le bio-enrobage (KMILT) pour prolonger la durée de vie des fruits et légumes, et ainsi réduire les pertes et gaspillages. La problématique particulière de la chaîne d'approvisionnement des pays tropicaux y est centrale et présente des températures/humidité élevées, un manque d'infrastructure et une gestion de la chaîne inappropriée.



BOOST: Design of Biobased (non-foOd and foOd) Systems for a world in Transition

Porté par Claire BERTON-CARABIN UR BIA - Laboratoire partenaire : Université de Wageningen WUR Pays-Bas

Le LIA BOOST associe recherche et formation pour explorer de nouvelles voies de transformation et d'utilisation de la biomasse pour des usages alimentaires et non-alimentaires dans le cadre de la transition vers des systèmes biosourcés durables. Le programme cible notamment des ingrédients d'origine végétale et peu transformés, en se concentrant sur le fractionnement de la matière première, l'élaboration de matrices fonctionnelles à partir de ces ingrédients et la déconstruction de ces matrices in fine.



BIODEG: biodégradation de micropolluants par les champignons ligninolytiques et leurs enzymes

Porté par Eric RECORD UMR BBF - Laboratoire partenaire : Univ. Sfax Tunisie

L'utilisation massive d'antibiotiques a entraîné des niveaux dangereux de pollution des eaux souterraines et des sols, provoquant des changements significatifs dans les écosystèmes aquatiques, et créant des conditions favorables à la prolifération de pathogènes résistants aux antibiotiques.

Afin de lutter contre cette pollution, le LIA BIODEG cherche des solutions pour dégrader ces molécules par des procédés de bioremédiation durables et bon marché afin de préserver nos ressources en eau.



BIORAF: valorisation des co-produits agro-industriels marocains par une approche de bioraffinerie en cascade pour la production de bioénergie, biofertilisants et feed/food

Porté par Abdellatif BARAKAT - UMR IATE avec l'UR LBE - Laboratoire partenaire : Univ. Mohammed VI Maroc

Le LIA BIORAF vise à évaluer le potentiel de bioraffinage en cascade de co-produits agro-industriels marocains (oléagineux, agrumes, algues). Il mobilise une approche systémique pour caractériser les gisements, optimiser les procédés biotechnologiques (Feed, bioénergie, biofertilisants, biomolécules), et établir des bilans matière/énergie. L'objectif est de proposer des itinéraires technico-économiques durables et zéro déchet, dans une logique d'écoconception et d'économie circulaire adaptée au contexte méditerranéen.

Partie 1

Modèles prédictifs et outils



© Steven Le Feunteun

Nous développons des modèles prédictifs pour définir les conditions de prétraitement de la biomasse lignocellulosique afin de la valoriser au mieux et aussi pour maîtriser la stabilité des matériaux biosourcés vis-à-vis de l'air ambiant. Des modèles utilisant l'IA permettent d'améliorer la conception hygiénique des lignes de production en industrie agroalimentaire. Pour mener nos recherches sur la digestion, nous disposons de deux outils innovants : la bouche artificielle et le NERDT, digesteur dynamique mimant les contractions de l'estomac.



© Niklas Jarmatz

Des modèles prédictifs d'IA pour améliorer la conception hygiénique des lignes de production dans l'industrie alimentaire



En savoir plus

Jarmatz N. *et al.*

Development of a soft sensor for fouling prediction in pipe fittings using the example of particulate deposition from suspension flow.

Food and Bioproducts Processing . 2024

<https://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2024.02.009>

Partenariat

- Technische Universität Braunschweig

Contacts

Guillaume Delaplace et Alberto Tonda

UMR UMET et UMR MIA-PS

guillaume.delaplace@inrae.fr

alberto.tonda@inrae.fr



Contexte

Pour améliorer l'hygiène des produits alimentaires, il est important de concevoir des lignes de production alimentaire qui limitent le risque d'encrassement et se nettoient facilement. L'encrassement est l'accumulation indésirable de matière sur une surface d'un équipement. Il se produit lors du chauffage de protéines (dénaturation protéique) ou lors du traitement, à température ambiante, des suspensions alimentaires dans des tuyauteries (sédimentation de colloïdes et risques de dépôts dans des zones mortes). La prévision locale de l'encrassement à l'aide de capteurs et/ou la simulation numérique des phénomènes de sédimentation par des modèles traditionnels restent un défi en raison de la taille des installations industrielles à instrumenter de façon « non intrusive » et de la complexité des mécanismes d'encrassement pouvant se dérouler selon les influences produits/procédés. Les modèles prédictifs d'Intelligence Artificielle peuvent nous renseigner sur le risque de sédimentation en proposant des régressions à partir de l'analyse d'un jeu de données d'entrée.

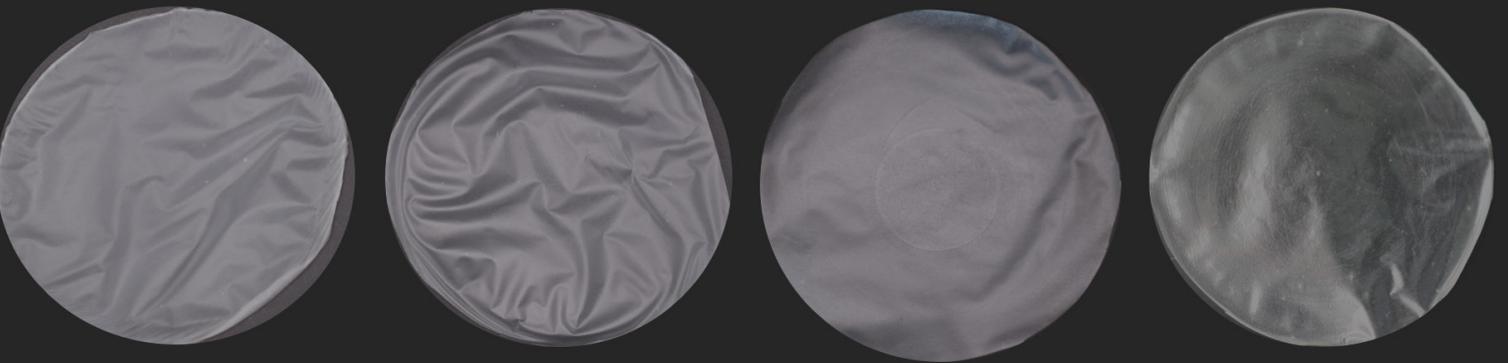
Résultats

Ici, plusieurs modèles prédictifs d'IA ont été générés en collaboration avec une équipe de recherche Allemande, pour 2 types de raccords de tuyauterie différents présents dans les lignes de production alimentaire. Ils s'appuient sur de nombreuses

données expérimentales de masse de dépôt de particules produites par la mise en circulation de suspensions modèles. Pour rendre cet apprentissage plus efficace, un regroupement des variables par analyse dimensionnelle a été effectué. Ce regroupement permet d'identifier un ensemble de descripteurs, qui sont des nombres sans dimension, communément utilisés dans la théorie de similitude. Les descripteurs ont été traités par trois algorithmes d'apprentissage automatique: Régression linéaire, Régression symbolique et Forêt aléatoire. L'algorithme Forêt aléatoire a obtenu le meilleur résultat par rapport aux deux autres en termes de prédiction ($Q2 = 0,88 \pm 0,09$). La variable temps et la fraction massique de particules solides des suspensions ont été déterminées comme étant les deux paramètres les plus impactants sur la sédimentation pour la plage explorée de conditions opératoires.

Perspectives

La méthode appliquée pour obtenir le modèle prédictif par IA peut être reproduite pour d'autres jeux de données. Le regroupement par analyse dimensionnelle réalisé en amont permettra systématiquement de condenser le nombre de descripteurs sans perdre de vue leur sens physique et permettront d'obtenir des régressions applicables pour d'autres conditions de mise en oeuvre dans des installations plus grandes (scale up).



©Véronique Aguié-Béghin - Représentation des différents films étudiés

Prédiction de la capacité de rétention d'eau de films à base de polysaccharides



En savoir plus

Falourd X. *et al.*

Assessing the complementarity of time domain NMR, solid-state NMR and dynamic vapor sorption in the characterization of polysaccharide-water interactions

Carbohydrate Polymers . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121579>

Partenariat

Projet support :

AIC REHYDRO (Rôle de l'eau dans la structuration et le comportement hygroscopique d'assemblages lignocellulosiques)



Contacts

Xavier Falourd, Corinne Rondeau-Mouro et Véronique Aguié-Béghin

UR BIA, UR OPAALE et UMR FARE

xavier.falourd@inrae.fr

corinne.rondeau@inrae.fr

veronique.aguie@inrae.fr



Contexte

Les fibres végétales et les polymères lignocellulosiques sont des candidats prometteurs pour le développement de nouveaux matériaux biosourcés. Cependant, la plupart de ces matériaux sont sensibles à l'humidité de l'air du milieu environnant, ce qui peut induire une instabilité de leurs propriétés structurales et mécaniques et ainsi réduire leur utilisation. Il est donc important de pouvoir maîtriser cette propriété hygroscopique lors de la production de biomatériaux.

Résultats

Afin de mieux comprendre le comportement hygroscopique des matériaux, des assemblages à partir de polymères extraits de la paroi végétale ont été réalisés et caractérisés à l'aide de méthodes physico-chimiques (gravimétrie d'adsorption de vapeur d'eau, DVS) et spectroscopiques (RMN du solide à haut champ et relaxométrie par RMN à bas-champ) complémentaires. La relaxométrie par RMN donne des informations de mobilité de l'hydrogène (proton) à l'échelle moléculaire via la mesure des temps de relaxation T2 alors que celles issues de la RMN du solide (temps de diffusion de spin) décrivent l'état de l'eau structurale ou en forte interaction avec les polysaccharides, contribuant ainsi à l'organisation de leurs assemblages. Des corrélations entre les différents paramètres mesurés dans le cas de films binaires cellulose-glucomannane ont été établies. Plus

l'affinité du film pour l'eau est élevée (teneur en eau), plus les protons des polysaccharides sont mobiles (augmentation du T2 mesuré par relaxométrie) et plus la structuration de l'eau dans l'assemblage (diminution du temps de diffusion de spin THHa des protons par RMN du solide) et sa capacité de rétention (hystérésis, dH) sont faibles. Ainsi, la RMN permet de prédire la capacité de rétention d'eau de ce type d'assemblages polysaccharidiques.

Il est envisageable de combiner différentes méthodes analytiques : utiliser la relaxométrie par RMN comme outil de criblage rapide (~15 minutes par échantillon), puis approfondir avec la RMN du solide (~1 journée par échantillon) pour mieux comprendre la structuration de l'eau et distinguer les contributions des polysaccharides (cellulose et glucomannane). La DVS, malgré une mise en œuvre plus longue reste toutefois très utile pour étudier la cinétique d'hydratation de l'échantillon et quantifier l'eau adsorbée à l'équilibre à chaque palier d'humidité relative comprises entre 0 et 90%.

Perspectives

Cette approche sera étendue sur des assemblages synthétiques ternaires incluant un motif hydrophobe comme la lignine puis des fibres naturelles plus ou moins lignifiées. Enfin, cette approche pourra être étendue à des systèmes plus hétérogènes comme des parois de fruits charnus.



© AdobeStock - Nahhan

Les cascades de réaction au cours du prétraitement de la biomasse



En savoir plus

Pasquier J. *et al.*

Chemical degradation, yields, and interactions of lignocellulosic compounds of poplar wood during dilute acid pretreatment assessed from a comprehensive data set.

Industrial Crops and Products . 2024

<http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118643>

Partenariat

Chaire de Biotechnologie de CentraleSupélec (Pomacle, 51)



Contact

Gabriel Paës

UMR FARE

gabriel.paes@inrae.fr



Contexte

Afin d'optimiser la valorisation de la biomasse lignocellulosique (BL) en différentes molécules plateformes par des procédés biotechnologiques, une étape de prétraitement est souvent nécessaire. Cette étape permet de faciliter l'accès aux catalyseurs enzymatiques et chimiques. Elle impacte la structure et/ou la composition de la biomasse et libère en même temps de nouveaux composés. Mais elle est également très coûteuse lorsqu'elle fait appel à des traitements physico-chimiques nécessitant des procédés énergétiques. Connaître l'impact très précis de ce pré-traitement sur la libération de différents composés est donc essentiel afin de définir les conditions optimales et trouver des compromis entre les conditions de procédés et l'impact économique.

Résultats

Notre travail a consisté à générer un large panel d'échantillons de bois prétraité et à caractériser une douzaine de composés différents générés pendant cette étape. Ce travail s'est appuyé sur un ensemble de données correspondant à une large gamme de conditions de Prétraitement à l'Acide Dilué (DAP) (durée : 2-60 min, température : 120-190 °C, concentration d'acide 0-4 % H_2SO_4) appliqué au bois de peuplier. Cette base comprend des données de caractérisation de 12 composés (sucres, inhibiteurs et lignine) dans la phase solide et la phase liquide issus de 38 échantillons de bois pré-traités. Toutes ces données ont été mises en

relation avec la valeur de sévérité du pré-traitement (Combined Severity Factor (CSF) sur une gamme de 0 à 4), de sorte que des cinétiques ont été proposées pour décrire l'évolution et quantifier les voies de dégradation des composés liés aux monosaccharides à 5 et 6 atomes de carbone.

Dans le cas de l'hydrolyse enzymatique visant à libérer des monosaccharides, des valeurs de CSF comprises entre 2,0 et 2,5 s'avèrent être les conditions de prétraitement les plus appropriées, tandis que pour produire du furfural, des valeurs de CSF légèrement inférieures à 3 sont plus adaptées. Les CSF supérieures à 3 doivent être évitées car elles conduisent à des pertes massives de polysaccharides.

En reliant ces informations avec la sévérité du prétraitement, des cinétiques d'évolution ont pu être définies pour décrire les voies de dégradation préférentielles de la cellulose, des hémicelluloses et de la lignine. Un schéma réactionnel complet permet ainsi de définir les conditions de prétraitement les plus adaptées en fonction des produits visés en sortie. Toutes les équations mathématiques dérivées de cette analyse sont accessibles à la communauté scientifique.

Perspectives

Ces travaux ont été menés sur des échantillons de peuplier, et sont poursuivis pour étendre ces résultats à d'autres géotypes modifiés génétiquement afin de maximiser la déconstruction enzymatique.



©AdobeStock, Anatol - Fibres de Lin

Caractérisation multi-échelle pour comprendre le lien entre les propriétés structurelles et mécaniques des fibres de lin



En savoir plus

Rajakumaran, V. *et al.*

Experimental and numerical approach to understand the role of defects in damage mechanisms of flax fibers at bundle scale
Industrial Crops and Products. 2024

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119025>

Partenariat

- IRDL
- Synchrotron soleil, Gif-sur-Yvette
- IFAO
- Louvre museum

Projet support :
ANR « ANUBIS »

Contacts

Sofiane Guessasma et Johnny Beaugrand

UR BIA

sofiane.guessasma@inrae.fr

johnny.beaugrand@inrae.fr



Contexte

Les fibres de lin représentent un renfort crédible dans les matériaux composites car la filière industrielle est mature. Cependant, la présence de défauts connus sous le nom de « kink-bands » dans les fibres de lin a la capacité d'influencer leurs propriétés mécaniques. L'objectif principal de cette recherche est d'acquérir une compréhension globale du mécanisme d'endommagement dans les faisceaux de fibres de lin, ce qui présente un aspect nouveau en raison de la structure complexe des fibres unitaires 'paquets' qu'on nomme faisceaux. Il est donc nécessaire d'étudier et de comprendre la structure de ces défauts et la manière dont ils affectent les propriétés de traction de la fibre et de la structure à l'échelle supérieure, le faisceau.

Résultats

L'étude explore spécifiquement les faisceaux de fibres de lin soumis à une charge de traction et étudie l'impact des bandes de déformation sur leur rupture par une approche combinée, en utilisant à la fois des méthodes expérimentales et numériques. Le travail expérimental comprend des essais de traction in situ sous microtomographie à rayons X, qui mettent en évidence des schémas de rupture complexes, en particulier

la rupture de la fibre observée dans la région déficiente. En outre, un modèle d'éléments finis 3D basé sur des fibres reconstruites est développé pour l'analyse numérique de la traction. Les résultats soulignent que la région de la bande de pliage est un site de défaillance majeur dans les faisceaux de fibres, mais où la porosité locale conduit à une concentration prononcée des contraintes.

Perspectives

Dans une perspective d'avenir, l'influence de la structure et des défauts peut être étudiée à l'échelle structurale du fil, plus complexe que la fibre unitaire ou le faisceau. En outre, les études pourraient se concentrer sur la réduction des bandes de pliage grâce à diverses techniques de traitement, depuis la revisite du machinisme agricole aux procédés d'extraction des fibres des tiges des plantes de lin. L'échelle du fil permettrait d'étudier des phénomènes d'endommagement prématurés observés aussi dans les textiles.



© Alejandro Avila-Sierra

Une bouche artificielle pour mieux étudier la transformation des aliments mous et la formation du bol alimentaire



En savoir plus

Avila-Sierra A. *et al.*

A first-of-its-kind 3D biomimetic artificial mouth capable of reproducing the oral processing of soft foods.

Scientific reports . 2024

<https://doi.org/10.1038/s41598-024-73629-9>

<https://sites.google.com/view/mramaioli/marco-ramaioli-group-research/food-oral-processing/in-vitro-fop-and-swallowing-models>

Partenariat

- Fujita Health University, Japon

- UMR STLO, Rennes

Projet support :

HORIZON-MSCA-2021-PF-01 SENSINGTech
Grant agreement ID: 101066647



Contact

Marco Ramaioli

UMR SayFood

marco.ramaioli@inrae.fr



Contexte

Avec une population mondiale croissante et vieillissante, l'industrie alimentaire a le défi de proposer des produits mieux adaptés aux besoins des personnes souffrant de pathologies liées au vieillissement, comme la sarcopénie ou les troubles de la salivation ou déglutition.

Les expériences in vitro permettent de comprendre les mécanismes mis en œuvre lors de la transformation des aliments en bouche. Cependant, jusqu'à présent les modèles in vitro ne reproduisent pas fidèlement l'anatomie de la bouche et la biomécanique de la langue, ce qui est pourtant essentiel pour évaluer, dans des conditions orales physiologiquement pertinentes, le devenir en bouche des aliments mous.

Résultats

Dans le cadre du projet MSCA SensingTech, l'UMR SayFood a créé la première bouche artificielle qui comprend une langue programmable pour simuler les contractions péristaltiques, la compression langue-palais et la déstructuration d'un aliment mou, jusqu'à l'agrégation du bol. La cavité orale est basée sur les données anatomiques collectée à la Fujita Health University. La langue artificielle, qui mobilise la technologie de la robotique molle, présente des papilles artificielles, une élasticité

et une hydrophilicité proches de la langue humaine.

Cette technologie de pointe a été testée avec trois aliments mous issus du commerce : une crème dessert, une mousse au chocolat et un fondant au chocolat.

Les pressions appliquées par la langue et sa forme sont proches des données in vivo, collectées par échographie à SayFood dans le cadre du projet ANR QuStoFood. Les caractéristiques mécaniques liées aux propriétés texturales (fermeté, propriétés adhésives et cohésives et viscosité) des bols obtenus reproduisent bien les mesures ex vivo pour les aliments considérés.

Perspectives

Ce dispositif est un nouvel atout pour étudier la dynamique de la transformation orale des aliments, qui pourra être mis à profit pour mieux comprendre la perception de la texture et adapter les aliments aux préférences et aux besoins spécifiques de différentes populations. Le processus oral in vitro peut aussi aider à mieux comprendre les pathologies du processus oral liées au vieillissement, comme la sarcopénie ou les troubles de la salivation ou déglutition et à proposer une alimentation adaptée.



Le NERDT, un nouveau digesteur in vitro biomimétique pour étudier la digestion gastrique du lait



En savoir plus

Feng J. *et al.*

Dynamic in vitro gastric digestion of skimmed milk using the NERDT, an advanced human biomimetic digestion system

Food Research International . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114898>

Partenariat



Contacts

Steven Le Feunteun et Didier Dupont

UMR STLO

steven.le-feunteun@inrae.fr

didier.dupont@inrae.fr



Contexte

Le NERDT a été spécialement conçu pour reproduire la biomécanique gastrique. C'est le seul digesteur artificiel à considérer finement la morphologie et l'anatomie de l'estomac humain. Il est aussi le premier digesteur qui permette de réaliser la vidange des aliments sans aucune pompe ! Ce digesteur a été conçu de sorte que la vidange gastrique des particules d'aliments (semi-)solides, comme les particules de lait coagulé qui se forment dans l'estomac, soit « naturellement » plus lente que pour des aliments liquides, à l'instar de ce qui s'effectue dans nos estomacs.

Résultats

Cette étude a d'abord permis de démontrer que le NERDT est un système de digestion artificiel particulièrement pertinent pour reproduire le comportement in vivo de la digestion gastrique du lait écrémé. Les cinétiques de vidange et d'acidification gastrique observées chez l'homme ont, en particulier, pu être fidèlement reproduites. Dans nos conditions expérimentales, la coagulation intragastrique du lait a eu lieu après environ 10 minutes de digestion, et un effet de tamisage conduisant à une rétention privilégiée des particules de caséines a ensuite pu être observé pendant près d'une heure. De façon semblable à ce qui est observé in vivo, la vidange des caséines s'est finalement accélérée sous l'action

combinée de la protéase gastrique (la pepsine) et des contractions biomécaniques en fin de digestion.

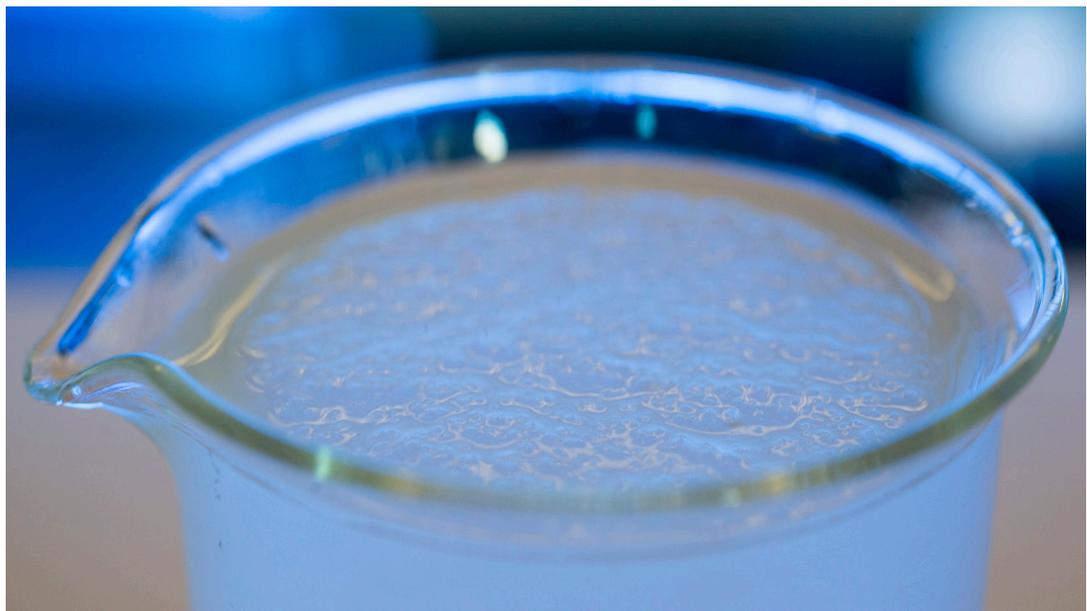
Dans un second temps, des digestions sans pepsine ont également été réalisées. Dans ces conditions, la coagulation intragastrique des caséines était retardée et aucune accélération de la vidange des particules de caséines n'a été observée en fin de digestion. Ces résultats confirment ainsi le rôle significatif de la pepsine dans la coagulation du lait dans l'estomac et dans la cinétique de vidange ultérieure des particules de caséines. Toutefois, les différences observées en présence et en l'absence de pepsine n'étaient pas aussi importantes qu'anticipées. Ces résultats mettent donc en lumière le rôle prédominant de la biomécanique dans la vidange gastrique du lait.

Perspectives

Les travaux actuels s'orientent sur l'effet de la température de consommation du lait (froid ou chaud) sur sa digestion gastrique, ainsi que sur une évaluation plus fine de l'influence de la biomécanique gastrique sur la digestion du lait. Cet outil pourra aussi être mobilisé pour évaluer l'impact de la taille des morceaux d'aliments solides produits en bouche sur la vidange gastrique, ou encore pour étudier la digestion gastrique de mélanges d'aliments constitutifs d'un même repas.

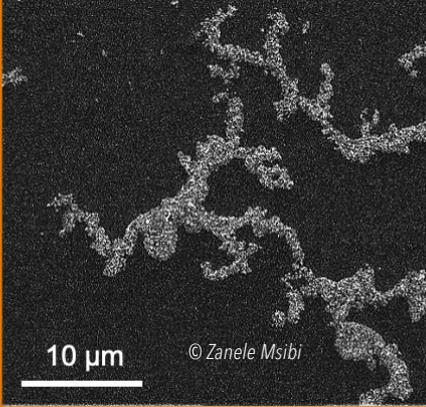
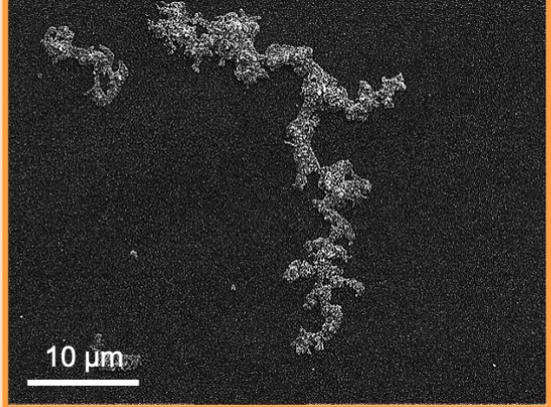
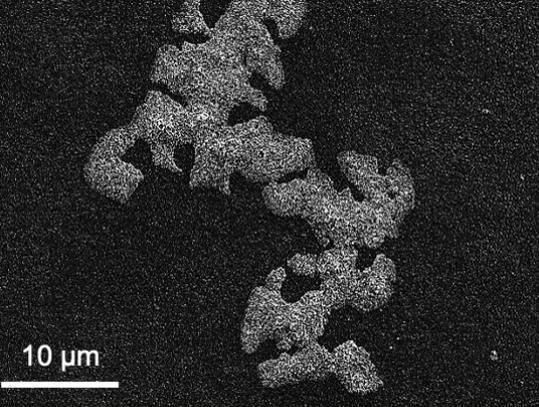
Partie 2

Optimisation des Procédés



© INRAE

Une multitude de procédés physico-chimiques est étudiée par les chercheurs du département. Nous présentons ici les recherches visant à s'assurer de la qualité des surfaces en luttant contre le développement de biofilms négatifs (salmonelle par exemple) ou en limitant l'encrassement des surfaces en acier inoxydable au cours d'opérations thermiques. La question du froid dans les procédés est traitée cette année, dans les meubles frigorifiques, dans les palettes de fruits ou encore pour produire de l'eau dessalée.



Comprendre les mécanismes de formation des dépôts encrassants des évaporateurs



En savoir plus

Grostete M. *et al.*

Exploring the formation of surficial whey protein deposits under shear stress by rheofluidic approach

International Journal of Biological Macromolecules . 2024

<https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.133291>

Partenariat

Projet support:

IMAGINABLE- Metaprogramme SYALSA



Contacts

Luca Lanotte, Jeehyun Lee et Romain Jeantet

UMR STLO

luca.lanotte@inrae.fr

jeehyun.lee@institut-agro.fr

romain.jeantet@institut-agro.fr



Contexte

L'encrassement des échangeurs de chaleur résulte notamment de l'adhésion de protéines à leur surface. Cependant, il diminue l'efficacité des transferts de chaleur, nécessite un nettoyage et consomme de l'eau, des produits lessiviels et de l'énergie. Très peu d'études traitent de l'encrassement dans le cas spécifique des évaporateurs à film tombant où la concentration en protéines varie tout au long du parcours du liquide alors que la température reste constante. L'effet thermique seul n'explique pas l'encrassement car des couches de protéines de lactosérum sont observées sur les parois des évaporateurs à des températures inférieures à celle de la dénaturation des protéines de lactosérum (70 °C). Ainsi, comprendre l'effet des autres facteurs (cisaillement, concentration protéique) sur les mécanismes d'encrassement constitue un enjeu scientifique et industriel important.

Résultats

Une stratégie expérimentale innovante a été utilisée pour étudier l'impact du taux de cisaillement et de la concentration sur l'accumulation de dépôts de protéines en surface. Elle consiste à appliquer à des solutions de protéines de lactosérum (5-10 % p/p) une gamme de taux de cisaillement (0-200 s⁻¹) à une température contrôlée (65 °C) à l'aide d'un rhéomètre plan/plan équipé d'un disque de verre, permettant ainsi la caractérisation microscopique des dépôts. Son originalité réside dans trois aspects :

i) la possibilité d'explorer une large gamme de taux de cisaillement en une seule expérience ; ii) le contrôle et la reproductibilité des conditions opératoires et iii) l'observation facilitée des dépôts du fait de la transparence du disque de verre.

Les dépôts formés à la surface ont ainsi été observés qualitativement et quantitativement par microscopie numérique, microscopie électronique à balayage et microscopie à force atomique. A 5 % p/p, le cisaillement a favorisé la formation de dépôts primaires ($\approx 10 \mu\text{m}$), alors qu'à 10 % p/p, il a entraîné le développement de structures ramifiées complexes ($\approx 50 \mu\text{m}$) notamment à 140-200 s⁻¹. Trois populations de dépôts ont pu être distinguées en termes de taille et de morphologie et des hypothèses concernant leurs mécanismes de formation en trois étapes ont été suggérées : dans l'ordre, i) formation de points d'initiation chimiquement liés à la surface ; ii) dépôts primaires constitués à partir de la liaison de ces points d'initiation et iii) structures ramifiées plus épaisses résultant de l'interconnexion des dépôts primaires, impliquant des interactions non-chimiques, très influencées aux valeurs élevées de cisaillement.

Perspectives

La comparaison de la stabilité des protéines de lactosérum dans la solution (bulk) et à la surface permettra de mieux comprendre la cinétique de développement des dépôts.

Maintenir la température des produits alimentaires en cas de coupures électriques



En savoir plus

Yedmel M.A. *et al.*

A novel approach combining thermosiphon and phase change materials (PCM) for cold energy storage in cooling systems: A proof of concept

International Journal of Refrigeration . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.12.015>

Partenariat

Projet support :

Projet ENOUGH, financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, sous l'accord de subvention n° 101036588

Contacts

Maria Aurely Yedmel, Antony Delahaye et Denis Leducq

UR FRISE

maria-aurely.yedmel@inrae.fr

antony.delahaye@inrae.fr

denis.leducq@inrae.fr



Contexte

Face au réchauffement climatique, des stratégies telles que l'effacement électrique, qui consistent à décaler temporairement la consommation d'électricité pour soulager le réseau, sont de plus en plus adoptées. Les Matériaux à Changement de Phase (MCP) offrent un soutien efficace à ces initiatives grâce au stockage thermique, bien que leur efficacité reste limitée surtout en réfrigération. Dans ce contexte, un accumulateur de chaleur couplé à un thermosiphon a été conçu pour remplacer la machine frigorifique lors de coupures électriques et pour améliorer les performances du stockage. L'accumulateur est connecté aux machines existantes sans nécessiter de système de refroidissement supplémentaire. Placé à l'extérieur de la chambre froide, il ne gêne ni l'espace destiné aux produits réfrigérés ni le flux d'air et n'impose aucune contrainte sur la quantité de MCP.

Résultats

Le MCP, un mélange de paraffines, est placé dans un conteneur rectangulaire (92 × 11 × 26 cm) équipé d'un échangeur de chaleur à ailettes, puis intégré au système à compression de vapeur d'un meuble frigorifique de vente à portes fermées. Lors de la phase de charge, l'énergie thermique est stockée par échange direct entre le MCP et le réfrigérant. Pendant la décharge, le froid est restitué à l'évaporateur par effet thermosiphon. Des tests d'effacements

électriques de 1,5 heure ont été réalisés avec et sans accumulateur dans une chambre à température contrôlée. Les températures de l'air et des produits, ainsi que le comportement du compresseur, ont été analysés. Les résultats montrent que le transfert de chaleur dans l'accumulateur n'est pas homogène, la charge étant plus lente que la décharge. Toutefois, grâce au système, les températures de l'air et des produits augmentent plus lentement en l'absence d'électricité. L'augmentation maximale des températures de l'air et des produits est de 7,1 °C et 0,6 °C avec l'accumulateur, contre 10,3 °C et 1,5 °C sans. De plus, après une panne électrique sans accumulateur, le compresseur fonctionne plus longtemps pour réduire la hausse de température. Avec le design proposé, en cas de coupure de courant, l'énergie stockée dans le MCP est restituée à 97 %, favorisant ainsi la pratique d'effacements électriques tout en protégeant les produits.

Perspectives

Le système sera testé dans diverses conditions de fonctionnement, et la consommation d'énergie sera évaluée pour optimiser son efficacité. Sa généralisation à l'ensemble des installations frigorifiques permettra d'alléger le réseau électrique, de préserver l'environnement en favorisant les énergies intermittentes et de renforcer la sécurité alimentaire.

Performance d'un procédé de dessalement avec du coulis de glace



En savoir plus

Yedmel M.A. *et al.*

Experimental study of the performance of a heat exchanger for a new desalination-cooling technique using ice slurry: A proof of concept

Applied Thermal Engineering . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123479>

Valorisation

Brevet (10/22) <https://data.inpi.fr/brevets/FR3114642?q=2009849>

Contacts

Laurence Fournaison, Hong-Minh Hoang et Anthony Delahaye

UR FRISE

laurence.fournaison@inrae.fr

hong-minh.Hoang@inrae.fr

anthony.delahaye@inrae.fr



Contexte

La croissance du marché du dessalement d'eau de mer est soutenue surtout dans un contexte de changement climatique. Plusieurs techniques de dessalement existent, soit par changement d'état, soit par séparation physique ou encore par séparation chimique. Les deux premières approches bénéficient d'une plus grande maturité et représentent la quasi-totalité des processus à l'échelle industrielle. Nous avons développé un procédé qui repose sur la cogénération d'eau dessalée et de froid pour des applications de climatisation ou de conservation de denrées. Ce procédé original de congélation par coulis présente l'avantage de former des cristaux de glace de la taille de 100 microns, permettant ainsi de piéger moins d'impuretés que les systèmes classiques de congélation. Afin d'être énergétiquement compétitif avec l'osmose inverse et la distillation, la récupération d'énergie lors de la fusion de la glace doit être optimale.

Résultats

Le procédé consiste à séparer les cristaux de glace de la solution salée par centrifugation. La glace récupérée est ensuite fondue sur un échangeur dans lequel circule l'eau de mer. La glace fondue devient alors l'eau dessalée et l'eau de mer ayant permis la fusion se refroidit et devient une source d'énergie froide réutilisable.

Notre dispositif expérimental a montré que le procédé de dessalement par coulis de glace permettait de réduire la concentration en sel d'eau de mer par un facteur 10, soit 0.3 %.

L'efficacité de la fusion de la glace est directement influencée par le débit d'eau salée et le volume de glace à faire fondre. L'augmentation du débit d'eau salée de 33 % pour 400 g de glace sans compacter la glace a amélioré de 33 % de l'efficacité de la fusion. En revanche, l'augmentation de la quantité de glace de 36 % avec un débit d'eau salée de 4 kg/h a entraîné une diminution de 6 % de l'efficacité de la fusion. L'utilisation de poids pour forcer le contact entre la glace et l'échangeur de chaleur pendant la fonte a permis de réduire considérablement la température à la sortie de l'échangeur. Ces résultats ont montré le potentiel de la technique et ont permis d'identifier les points d'amélioration du procédé.

Perspectives

Les essais au laboratoire ont été traités en mode batch pour la séparation et la fusion. Le couplage des deux opérations permettra d'optimiser le procédé, et de développer un pilotage intelligent selon les besoins en froid ou en eau. L'objectif est de transférer notre brevet vers des industriels du dessalement.



© INRAE

Impact de la conception aéroulrique des colis ajourés sur le refroidissement des fraises au sein des palettes



En savoir plus

Nasser Eddine A. *et al.*

Heat transfer within a multi-package:
Assessing the impact of package design
on the cooling of strawberries

Journal of Food Engineering . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112190>

Partenariat

- CTIFL, Rungis
- UMR IATE, Montpellier
- CTP, Grenoble
- LGI, Gif-sur-Yvette
- UMR Sayfood, AgroParisTech, Palaiseau

Projet support :

ANR Ecofreshchain

Contacts

Jean Moureh, Steven Duret, Onrawee Laguerre, Denis Flick

UR FRISE

jean.moureh@inrae.fr

steven.duret@inrae.fr

onrawee.laguerre@inrae.fr

denis.flick@inrae.fr



Contexte

Les produits horticoles périssables mis à la vente peuvent nécessiter un mode de conditionnement en « multi-package » associant un emballage primaire (unité de vente au consommateur ou barquette) qui représente un emballage à atmosphère modifiée (MAP) et un emballage secondaire tel qu'un colis ajouré. Dans ce mode de conditionnement, les caractéristiques de l'ajourage : localisation et dimensions des orifices de ventilation sont des paramètres clés pour assurer autant que possible l'homogénéité de la ventilation et donc la distribution du froid au sein de la palette. Avec le renforcement du cadre réglementaire visant l'interdiction de l'usage du plastique dans les emballages des produits alimentaires, de nouvelles barquettes biosourcées ont été développées dans le cadre du projet ANR EcoFreshchain. Cette étude a examiné comment la conception de l'emballage secondaire impacte le refroidissement des fraises dans des barquettes hermétiques (AC) pendant le pré-refroidissement.

Résultats

Des expériences en laboratoire ont permis de caractériser le refroidissement d'un demi-niveau d'une palette pour différentes configurations de colis remplis de fraises modèles aux propriétés thermophysiques connues afin d'étudier les mécanismes de transfert de chaleur.

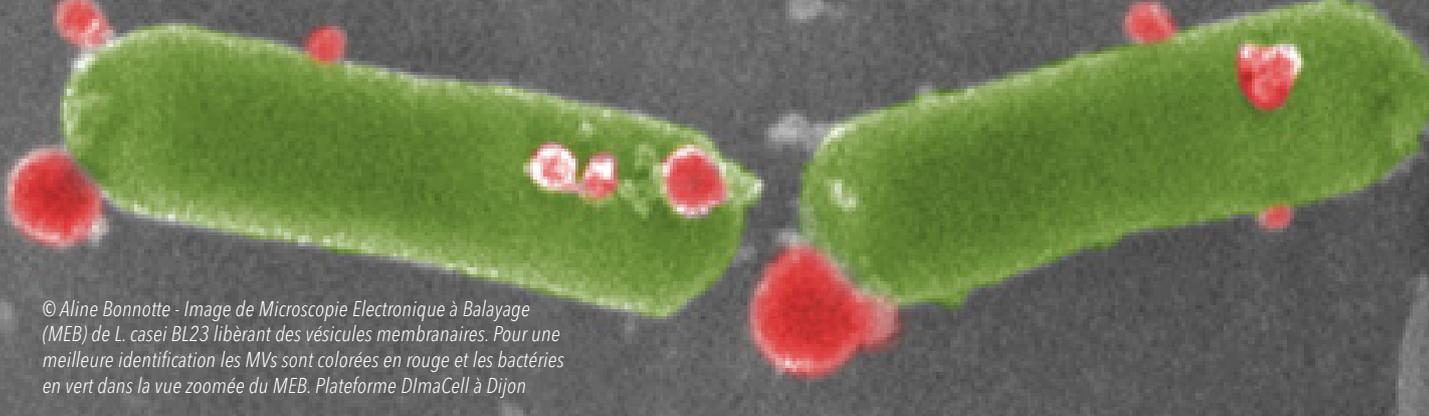
Les résultats expérimentaux ont mis en évidence des hétérogénéités de refroidissement significatives parmi les

différentes positions des barquettes hermétiques (AC). Les plus grandes disparités observées sont de 1,8 h pour le temps de demi-refroidissement (HCT). L'incorporation d'orifices additionnels dans le colis a montré une performance de refroidissement supérieure avec une amélioration de 8 % de la HCT moyenne globale tout en réduisant de 33% la consommation d'énergie. L'augmentation de l'épaisseur de la lame d'air au-dessus des AC augmentait de 91 % la HCT moyenne globale.

Par ailleurs, l'influence du débit d'air sur la consommation d'énergie de ventilation a été étudiée. Une réduction de 25 % du débit d'air entraîne une diminution de 94 % de la consommation d'énergie. Cependant, cet avantage est contrebalancé par une augmentation de 100 % de la HCT moyenne globale, ce qui pourrait affecter négativement la qualité des produits. Par conséquent, l'optimisation de la conception de l'emballage est essentielle pour assurer le bon équilibre entre l'efficacité énergétique et la qualité des produits.

Perspectives

Les résultats expérimentaux seront utilisés pour valider un modèle numérique CFD à l'échelle d'une palette. Après validation, ce modèle sera couplé avec un modèle de qualité pour évaluer l'effet de la température sur la détérioration de la qualité des fraises. Ce modèle sera utilisé pour optimiser la conception des colis en utilisant divers paramètres de performance: qualité, consommation d'énergie, taux de refroidissement et son hétérogénéité.



© Aline Bonnotte - Image de Microscopie Electronique à Balayage (MEB) de *L. casei* BL23 libérant des vésicules membranaires. Pour une meilleure identification les MVs sont colorées en rouge et les bactéries en vert dans la vue zoomée du MEB. Plateforme DlmaCell à Dijon

Le potentiel prometteur des vésicules membranaires de bactéries lactiques contre la formation de biofilms



En savoir plus

Da Silva Barreira D. et al.

Membrane vesicles released by *Lactocaseibacillus casei* BL23 inhibit the biofilm formation of *Salmonella* Enteritidis

Scientific Reports . 2023

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-27959-9>

Valorisation

Brevet : FR3118060 - Utilisation anti-biofilm de vésicules membranaires extracellulaires



Contact

Aurélie Rieu

UMR PAM

aurelie.rieu@u-bourgogne.fr



Contexte

Les biofilms sont des communautés microbiennes dans lesquelles les cellules sont intégrées dans une matrice autoproduite de substances polymériques extracellulaires permettant leur adhésion aux interfaces biotiques et abiotiques. Ce mode de vie confère aux microorganismes une tolérance accrue à divers stress environnementaux. Les biofilms de pathogènes peuvent se former sur des surfaces rencontrées dans les domaines médical, agroalimentaire et industriel, où ils représentent un enjeu majeur en termes de santé publique et de sécurité. Les méthodes de lutte actuelles sont basées sur l'utilisation de produits polluants provenant de la pétrochimie, qui représentent un risque pour l'opérateur et peuvent être peu efficaces. Le changement des mentalités et des réglementations environnementales nécessite de faire face au défi d'un nettoyage de plus en plus respectueux de l'environnement et plus performant.

Résultats

Les résultats ont montré que les vésicules membranaires (MVs) produites par *Lactocaseibacillus casei* BL23 exercent une forte activité antibiofilm contre *Salmonella enterica* serovar Enteritidis sans affecter la croissance bactérienne.

Ces MVs agissent principalement lors des étapes précoces du développement des biofilms de *Salmonella* Enteritidis et empêchent l'attachement des bactéries à des surfaces de polystyrène. De manière intéressante, les MVs n'ont pas d'effet sur la biomasse de biofilm déjà établi. Par ailleurs, il a également été démontré que l'activité antibiofilm dépend de la présence de protéines spécifiques associées aux MVs, dont deux hydrolases du peptidoglycane (PGHs), qui sont impliquées dans la dégradation de la paroi cellulaire et la perturbation de la structure du biofilm.

Perspectives

Ce travail révèle le potentiel des vésicules membranaires produites par des bactéries à Gram positif, comme *Lactocaseibacillus casei*, pour lutter contre la formation de biofilms pathogènes. Ces résultats ouvrent la voie à l'utilisation de vésicules de probiotiques comme alternatives écologiques aux méthodes de traitement traditionnelles. De futures recherches devront explorer les mécanismes sous-jacents à cette activité antibiofilm et tester l'efficacité des MVs dans des conditions plus complexes, afin de valider leur utilisation à grande échelle.



©AdobeStock - Tashechka

Des marqueurs phénoliques spécifiques de l'évolution du vin rouge en bouteille : Influence de l'obturateur



En savoir plus

Garcia L. *et al.*

Analysis of targeted phenolic ageing markers in Syrah red wines during bottle ageing: Influence of cork oxygen transfer rate

Food Chemistry . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138491>

Partenariat

- DIAM Bouchage (Céret)

Projet support :
OXYDIAM

Contacts

Cédric Saucier et François Garcia

UMR SPO

cedric.saucier@umontpellier.fr

francois.garcia@umontpellier.fr



Contexte

Afin de garantir un vieillissement optimum des vins rouges en bouteille, des méthodes analytiques et des modèles prédictifs doivent être développés. Il s'agit dans un premier temps de suivre de manière objective des cinétiques d'évolution de certains marqueurs moléculaires d'évolution ciblés de type polyphénols. Cette évolution peut impliquer des phénomènes liés à l'oxydation ou à des réactions catalysées par l'acidité du milieu. L'influence du taux de transfert de l'oxygène à travers l'obturateur (OTR) sur le vieillissement expérimental et « naturel » (non accéléré) peut ensuite être étudié.

Résultats

Une expérience de vieillissement de vins rouges de Syrah a été mise en place pendant 24 mois et l'influence de quatre bouchons micro-agglomérés en liège ayant des taux de transfert d'oxygène différents a été étudiée. Des marqueurs phénoliques spécifiques du vieillissement ont été sélectionnés et hémi-synthétisés : la vitisine B, la malvidine-éthyle-catéchine et l'épicatéchine-sulfonate. Une méthode de quantification ciblée de ces marqueurs a ensuite été développée et validée en utilisant la chromatographie liquide à ultra-haute performance couplée à la spectrométrie de masse en tandem (UHPLC-QqQ-MS) opérant en mode MRM (Multiple Reaction Monitoring). Ces marqueurs ont

permis de suivre l'évolution des vins rouges en bouteille et l'influence de l'obturateur. Les résultats ont montré au cours du vieillissement une diminution significative des taux de polyphénols natifs du raisin (anthocyanes, flavanols) tandis que les teneurs en pyranoanthocyanes, en pigments éthylés et en flavanol-sulfonates augmentaient. Le taux de transfert d'oxygène de l'obturateur est apparu comme un facteur pivot et a eu des effets significatifs sur l'évolution de la concentration en polyphénols mais n'a pas eu d'impact significatif sur la formation des flavanol-sulfonates. Ces résultats fournissent des informations précieuses sur l'évolution chimique en cours au cours du vieillissement du vin, accentuant le rôle central du choix du bouchon en liège dans la préservation de la qualité du vin au fil du temps.

Perspectives

Les composés phénoliques ciblés sont des marqueurs pertinents d'évolution pour les expériences de vieillissement en conditions "classiques". Il s'agit maintenant de construire des modèles prédictifs de ces cinétiques de vieillissement utilisant des variables de composition ou de tests globaux des vins avant leur mise en bouteille.

Partie 3

Biotechnologies

Procédés biologiques naturels



Les qualités du vin sont abordées avant même la vinification, lors du séchage des baies de raisin, par l'étude des levures présentes dans le moût pour limiter la présence de levures sauvages par bioprotection et optimiser le mode d'inoculation des levures qui assurent la fermentation alcoolique. Les études sur les microorganismes visent, entre autres, à préserver les fonctionnalités des bactéries lactiques lorsqu'elles sont lyophilisées pour l'industrie alimentaire et à utiliser comme biofilms des bactéries entourées de substances polymériques pour traiter les eaux usées. Les propriétés d'usage des poudres de légumineuses sont visitées au regard des modalités de broyage des graines.

Mécanismes de bioprotection des vins par *Metschnikowia*



En savoir plus

Puyo M. *et al.*

Bioprotection Efficiency of *Metschnikowia* Strains in Synthetic Must: Comparative Study and Metabolomic Investigation of the Mechanisms Involved

Foods . 2023

<https://doi.org/10.3390/foods12213927>

Partenariat



Contacts

Géraldine Klein, Raphaëlle Tourdot-Maréchal et Maelys Puyo

UMR PAM

geraldine.klein@u-bourgogne.fr

raphaele.tourdot-marechal@u-bourgogne.fr

maelys.puyo@gmail.com



Contexte

Dans la production de vin, la présence de levures indigènes et de bactéries peut compromettre la qualité du produit. Les méthodes traditionnelles de protection, comme l'utilisation de sulfites, soulèvent des préoccupations concernant la santé et la durabilité. Ainsi, la recherche de solutions alternatives et naturelles est devenue essentielle. Les souches de levure du genre *Metschnikowia*, qui ont des propriétés antagonistes contre les levures d'altération, sont examinées pour leur potentiel en bioprotection. Bien que l'effet positif de souches sélectionnées de *Metschnikowia* ait déjà été démontré dans des conditions de cave, peu d'expériences de laboratoire ont été menées pour élucider les interactions négatives se produisant sur le moût de raisin entre une souche bioprotectrice et la flore indigène d'altération.

Résultats

Sur les trois souches bioprotectrices du genre *Metschnikowia* testées dans nos conditions expérimentales simulant des phases pré-fermentaires à basse température, seules deux souches appartenant aux espèces *pulcherrima* et *fructicola* ont montré un effet inhibiteur sur la croissance des levures *Hanseniaspora*, en particulier dans les co-cultures avec la plus faible concentration initiale de levures apiculées. Cet effet bioprotecteur était fortement réduit lorsque la concentration initiale d'*Hanseniaspora* était du même ordre de grandeur que celle de *Metschnikowia*, ce qui souligne l'importance de quantifier la

charge initiale en levures indigènes pour garantir le rôle efficace de la souche bioprotectrice ajoutée. De plus, les différentes cinétiques d'inhibition observées entre les deux souches efficaces suggèrent différents mécanismes d'interaction négative. En effet, la cinétique de consommation des nutriments a montré que les levures apiculées telles que *Hanseniaspora* entrent en compétition avec les souches de *Metschnikowia* pour l'accessibilité aux nutriments. Cependant, cette compétition n'explique pas l'effet bioprotecteur observé, en raison de la teneur considérable en azote restant dans les cultures. L'effet antagoniste de *Metschnikowia* sur *Hanseniaspora* implique probablement une autre forme d'interaction. Des analyses métabolomiques dans un contexte de bioprotection ont été réalisées après l'étape de macération préfermentaire. Une empreinte spécifique de l'interaction a été observée, montrant le fort impact de l'interaction sur la modulation métabolique des levures, en particulier sur les voies de l'azote et des vitamines.

Perspectives

Les résultats ouvrent la voie à la sélection et à l'optimisation de souches spécifiques de *Metschnikowia* pour des applications ciblées dans la vinification, en fonction des types de vins et des conditions de fermentation. L'intégration de ces souches dans les pratiques de vinification pourrait réduire la dépendance aux agents chimiques, promouvant ainsi des méthodes de production plus durables et respectueuses de l'environnement.

Impact du mode d'inoculation des levures sur la composition du vin



En savoir plus

Bordet F. *et al.*

Impact of *Saccharomyces cerevisiae* yeast inoculation mode on wine composition

Food Chemistry . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138391>

Partenariat



Contacts

Fanny Bordet, Chloé Roullier-Gallet et Hervé Alexandre

UMR PAM

fanny.bordet01@u-bourgogne.fr

rvalex@u-bourgogne.fr

Chloe.Roullier-Gall@u-bourgogne.fr



Contexte

Les levures sont essentielles à la réussite de la fermentation alcoolique et au développement du potentiel aromatique des vins. La fermentation alcoolique peut être réalisée à l'aide de levures, appelées levures sèches actives (LSA), sélectionnées et reconnues pour leurs propriétés technologiques. Le plus souvent, ces LSA sont réhydratées avant d'être inoculées dans le moût. Ces dernières années, une méthode d'inoculation est à nouveau utilisée, le pied de cuve, qui consiste en une phase de multiplication des levures préalablement à l'inoculation dans le moût. Dans cette étude, nous avons cherché à déterminer l'impact du mode d'inoculation sur la diversité aromatique et chimique du vin Chardonnay.

Résultats

Notre stratégie a consisté à combiner deux techniques de chimie analytique à très haute résolution en utilisant des approches métabolomiques ciblées et non ciblées. Deux modes d'inoculation de levures *S. cerevisiae* ont été comparés pour quatre souches : l'inoculation de LSA avec réhydratation et la multiplication de LSA dans un milieu spécifique, avant inoculation du moût. Les résultats ont montré que le mode d'inoculation des levures en moût impacte de manière significative la composition chimique des vins. Les fractions non volatiles et volatiles des vins sont affectées, de manière qualitative et quantitative. La HRMS (Spectrométrie de masse à haute résolution) a révélé une modification

de l'exométabolome en fonction du mode de préparation des levures avant inoculation. L'intensité de 1484 biomarqueurs a été modulée par la méthode d'inoculation. Les levures ont présenté des métabolismes différents selon les étapes de réhydratation ou de multiplication subies avant l'inoculation, et semblent se souvenir des conditions dans lesquelles elles se sont développées. La plupart de ces biomarqueurs appartiennent au métabolisme de l'azote. Par ailleurs, il a été observé que l'intensité des polyphénols était également modulée. Comme le métabolome non volatil a été impacté par le mode d'inoculation quelle que soit la souche étudiée et plus particulièrement la grande famille des esters. Enfin, la singularité de chacune des levures semble être mieux conservée lors de l'utilisation de ces dernières sous forme de LSA réhydratées.

Perspectives

Pour confirmer nos observations, il serait intéressant de réaliser ces travaux sur d'autres matrices (cépages, climats, millésimes...). De plus, une analyse sensorielle sera à envisager pour déterminer l'impact du mode d'inoculation sur le profil sensoriel des vins d'un point de vue qualitatif. L'objectif à plus long terme serait également de comprendre la mécanistique responsable de ces modifications métaboliques.



©Giulia Scalzini- Grappes de raisin de cépage Aleatico après séchage traditionnel au soleil, avant vinification.

Influence de la déshydratation des raisins sur la qualité sensorielle et organoleptique du vin



En savoir plus

Scalzini G. *et al.*

Cell wall polysaccharides, phenolic extractability and mechanical properties of Aleatico winegrapes dehydrated under sun or in controlled conditions

Food Hydrocolloids . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109605>

Partenariat

- Department of Agricultural, Forest and Food Sciences, University of Torino, Italy

- Department of Plant and Environmental Sciences, University of Copenhagen, Denmark

Contacts

Thierry Doco et Céline Poncet-Legrand
UMR SPO

thierry.doco@inrae.fr

celine.poncet-legrand@inrae.fr



Contexte

L'Aleatico est un cépage rouge italien dont les baies sont séchées à l'air ou au soleil avant la vinification pour obtenir un vin doux traditionnel dénommé Passito. Le séchage post-récolte des raisins avant vinification joue un rôle clé dans la production de ces vins doux originaux, appelés vins passerillés. Ces vins sont élaborés à partir de raisins desséchés qui ont perdu entre 20 et 50 % d'eau. Ils sont particulièrement complexes gustativement et sensoriellement en raison de leur concentration en sucre et de leur richesse en composés phénoliques, tels que les anthocyanes et les tanins, qui influent sur la couleur, l'amertume et l'astringence.

L'objectif de cette étude est de fournir des informations pour choisir des stratégies de macération, d'une part pour mieux préserver les anthocyanes des pellicules, responsables de la couleur, et d'autre part pour réguler l'extraction des tanins des pépins qui ont un impact sur l'astringence, et donc sur la perception organoleptique et gustative du vin.

Résultats

Cette étude compare deux méthodes - séchage au soleil (SUN) et déshydratation contrôlée (CTR) - en termes de composition phénolique des raisins utilisés pour l'élaboration de vins. Le processus de séchage a un

impact significatif sur la composition en sucres neutres des parois cellulaires de la pellicule du raisin, en particulier dans les raisins séchés au soleil, alors que les polysaccharides de la pulpe sont moins affectés. Les anthocyanes et les tanins, en particulier les polymères, sont moins extractibles dans les raisins séchés au soleil en raison des températures plus élevées et de l'exposition au soleil, qui provoquent également une oxydation et une polymérisation plus importantes.

L'extractibilité phénolique dans les pellicules diminue avec le séchage, les raisins SUN subissant des pertes plus importantes que les raisins CTR. En revanche, l'extractibilité des composés phénoliques et des tanins des pépins augmente après le séchage, en particulier pour les raisins SUN. L'étude souligne l'importance des conditions de séchage sur l'extraction des composés phénoliques, les raisins SUN présentant moins de polyphénols extraits depuis les pellicules, mais plus depuis les pépins.

Perspectives

Ces résultats suggèrent l'importance de modifier les stratégies de macération afin d'équilibrer l'extraction phénolique et d'optimiser la qualité du vin en fonction des techniques de séchage choisies.



Approche multimodale pour décrire les mécanismes de fragmentation des pois jaunes lors du broyage



En savoir plus

Koëgel L. *et al.*

Exploration of fragmentation mechanisms of yellow split peas during grinding using a multimodal approach

Applied Sciences . 2024

<https://doi.org/10.3390/app14093740>

Partenariat



Les travaux ont bénéficié d'un financement de l'Université de Montpellier (bourse de thèse de doctorat de l'école doctoral GAIA) et d'un financement de l'Institut Agro Montpellier (projet CRI).

Contacts

Reine Barbar et Bernard Cuq

UMR IATE

reine.barbar@supagro.fr

bernard.cuq@supagro.fr



Contexte

Les légumineuses font partie de l'alimentation humaine depuis les débuts de la domestication de l'agriculture et des plantes, et sont cultivées dans le monde entier. Consommées à l'origine sous forme de graines décortiquées et cuites, les légumineuses sont également moulues et utilisées sous forme de farines, ou fractionnées et utilisées comme des poudres enrichies (concentrats & isolats de protéines). L'utilisation de farines de légumineuses est un important levier de croissance des filières concernées, en diversifiant les consommations potentielles dans les formulations d'aliments fonctionnels polyvalents. Par rapport à la mouture du blé, la mouture des graines de légumineuses et les mécanismes sous-jacents restent mal compris. Il y a encore peu d'informations sur les paramètres des procédés associés à la production de farines de légumineuses et leur optimisation pour des applications alimentaires. Les travaux actuels visent à établir des relations entre les paramètres du procédé de broyage, les mécanismes de fragmentation associés et les propriétés des poudres générées.

Résultats

À partir de graines de pois jaunes décortiquées (variété Kameleon) et broyées dans différentes conditions contrastées à l'aide d'un broyeur à billes ou d'un broyeur à micro-cylindres, il a été possible de montrer que le broyage des graines de pois génère des poudres caractérisées par des courbes

de distribution granulométrique de forme multimodale. Quatre populations de particules de tailles différentes ont été identifiées par une approche simplifiée de déconvolution et corrélées à des mécanismes spécifiques régissant le broyage des graines de pois (fragmentation, délamination, libération de composants subcellulaires, érosion). Leurs propriétés physiques et biochimiques respectives ont été déterminées. En tenant compte des proportions des 4 populations au sein des poudres, les résultats ont montré une corrélation positive entre les proportions volumiques de particules très fines (0-10 μm) et fines (10-55 μm) et le taux d'endommagement de l'amidon ainsi que la surface spécifique développée, indépendamment du mécanisme de broyage des pois jaunes. Ces travaux permettent de mieux comprendre l'impact des modalités de broyage sur la prédominance des différentes populations de particules et leur implication sur les propriétés d'usage des poudres de légumineuses d'une part, et d'autre part de piloter la génération de poudres fonctionnelles en utilisant une approche d'ingénierie inverse.

Perspectives

Des études prospectives chercheront à consolider les hypothèses proposées sur les mécanismes par une analyse plus détaillée de l'état des constituants et de la qualité des poudres générées en fonction des conditions de broyage.



© Adobestock - Lapeepon

Compréhension de la sensibilité des bactéries aux stress induits par les procédés de stabilisation



En savoir plus

Gagneten M. *et al.*

Mechanistic study of the differences in lactic acid bacteria resistance to freeze- or spray-drying and storage

Applied Microbiology and Biotechnology . 2024

<https://doi.org/10.1007/s00253-024-13186-3>

Partenariat

- Université de Buenos Aires (ITAPROQ-CONICET, Argentine)

Projet Support :

Projet européen PREMIUM (MSCA-RISE H2020)



Contacts

Fernanda Fonseca et Stéphanie Passot

UMR SayFood

fernanda.fonseca@inrae.fr

stephanie.passot@inrae.fr



Contexte

Les bactéries lactiques jouent un rôle essentiel dans notre alimentation et notre santé mais subissent des dommages cellulaires importants lors de leur production sous forme de concentrés bactériens lyophilisés. De plus, les opérations mises en œuvre sont énergivores et ont des effets néfastes sur l'environnement.

Dans le cadre du projet européen PREMIUM (MSCA-RISE H2020), des chercheurs de l'UMR SayFood en collaboration avec des chercheurs argentins du CONICET ont comparé différents procédés de déshydratation (lyophilisation et séchage par atomisation) et de stockage pour préserver les fonctionnalités de deux bactéries lactiques présentant une sensibilité différente aux procédés de stabilisation.

Résultats

La résistance à la lyophilisation et au séchage par atomisation de *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* CFL1 (a priori sensible) et *Lactiplantibacillus plantarum* WCFS1 (a priori résistante) a été quantifiée par la mise en œuvre de méthodes complémentaires de caractérisation biologique, biochimique et physique. L'étude a montré que *Lb. bulgaricus* CFL1 est sensible aux stress osmotique, mécanique et thermique, tandis que *Lpb. plantarum* WCFS1 est surtout sensible au stress thermique. La microspectroscopie infrarouge

et la cytométrie en flux ont permis d'identifier les dommages cellulaires spécifiques causés par la lyophilisation (membrane et paroi cellulaire) et par le séchage par atomisation (acides nucléiques et protéines). Les résultats ont confirmé le rôle essentiel de la température de transition vitreuse du concentré bactérien déshydraté qui devra être 40 °C au-dessus de la température de stockage pour assurer la stabilité au stockage. Par ailleurs, cette étude a révélé de manière inattendue que le séchage par atomisation reconnu comme générant plus de perte de fonctionnalité que la lyophilisation, serait une alternative prometteuse pour la préservation de *Lb. bulgaricus* CFL1, moins coûteuse et plus respectueuse de l'environnement.

Perspectives

L'étude des bactéries en environnement aqueux par microspectroscopie infrarouge apparaît très prometteuse pour identifier des conditions de fermentation, protection et/ou stabilisation améliorant la fonctionnalité finale. Par ailleurs, nous orientons nos travaux sur le rôle des molécules protectrices pour limiter les dommages cellulaires et la compréhension de leurs mécanismes d'interaction avec la membrane bactérienne. Les résultats de cette étude ont été combinés à des analyses de vie pour proposer des itinéraires technologiques à moindre impacts environnementaux.

Des boues granulaires à la formation de gel : la nécessité de caractérisation fonctionnelle des polymères



En savoir plus

Bou-sarkis A. *et al.*

Impact of biochemical properties on the gelation of EPS extracted from aerobic granules

Journal of Environmental Chemical Engineering . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113648>

Partenariat

- LBAE, Laboratoire de Biotechnologies Agroalimentaire et Environnementale, Université de Toulouse, Institut Universitaire de Technologie, France

- Department of Process Engineering, EAWAG, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Switzerland

- Department of Civil and Environmental Engineering (DICEA), University of Florence, Italy.



Contacts

Etienne Paul et Yolaine Bessière

UMR TBI

etienne.paul@insa-toulouse.fr

yolaine.bessiere@insa-toulouse.fr



Contexte

Les granules aérobies épuratifs sont des biofilms sphériques et denses, composés de bactéries entourées par une matrice de substances extracellulaires polymériques (EPS). L'utilisation de ces biofilms pour le traitement des eaux usées est en plein essor en raison de leur efficacité à traiter les polluants tout en étant plus compacts et moins consommateurs en énergie que les procédés à boues activées. Leur valorisation à travers l'extraction de biopolymères représente un enjeu économique et sociétal pour les années à venir. Ces exo-polymères sont utilisables par exemple en agriculture sous forme d'hydrogels et ce dans une logique d'économie circulaire. Dans ce contexte, un des enjeux est de développer une méthode capable de détecter la présence de polymères gélifiants dans des mélanges complexes contenant des biopolymères le plus souvent inconnus et non caractérisés. Une difficulté supplémentaire réside dans la quantité limitée de polymères que l'on peut extraire sur des procédés de laboratoire ; ainsi la question de la miniaturisation des méthodes d'évaluation est un point clé.

Résultats

Une méthode de screening miniaturisée a été développée pour détecter la formation de gel. Basée sur une caractérisation de l'absorption dans l'UV-vis du surnageant avant

et après addition de cation divalent, cette méthode utilisant seulement 1 mg de polymère permet à la fois de détecter la réactivité des molécules à l'addition de calcium et de quantifier le volume d'hydrogel formé. Appliqué à des EPS fractionnés selon leur charge et leur taille, le test a mis en évidence que les fractions fortement chargées négativement sont largement impliquées dans le processus de gélification alors que les molécules de faible poids moléculaire ne participent pas à la formation du réseau.

Perspectives

En raison de sa facilité d'application, de sa faible consommation de matériaux et de sa rapidité, ce test peut s'avérer très utile dans la progression vers une sélection efficace des molécules gélifiantes à partir de granules aérobies. À l'avenir, il sera possible d'utiliser ce test pour suivre l'enrichissement en polymères gélifiants au cours des processus de purification/fractionnement mais aussi pour détecter la participation de groupes biochimiques spécifiques à la gélification en couplant ce test à la détection par fluorescence à l'aide de sondes spécifiques. De plus, ce test peut aider à moduler et à comprendre les paramètres affectant la gélification de différentes solutions, tels que le pH, les ions divalents, la concentration en polymères, etc. et ainsi permettre une valorisation plus efficace des EPS.



© Sylvain Renard

Compréhension de la séparation de phases dans les mélanges de biopolymères



En savoir plus

Vakeri A. *et al.*

Coacervation and aggregation in lysozyme/alginate mixtures

Food Hydrocolloids . 2024

<https://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110359>

Partenariat

Projet Support :

Ce travail a été réalisé avec le soutien financier de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) et celui de la Région Pays de la Loire.

Contacts

Denis Renard, Saïd Bouhallab et Antoine Bouchoux

UR BIA, UMR STLO et UMR TBI

denis.renard@inrae.fr

said.bouhallab@inrae.fr

antoine.bouchoux@inrae.fr



Contexte

L'étude des interactions entre le lysozyme (LYS) et l'alginate (ALG) s'inscrit dans un domaine de recherche en pleine expansion portant sur l'auto-assemblage de biopolymères opposément chargés. Les complexes coacervés et les agrégats formés par ces interactions électrostatiques sont exploités dans divers domaines industriels tels que l'alimentation, les biomatériaux et la délivrance de médicaments. L'intérêt croissant pour ces systèmes est alimenté par leur potentiel à créer des structures fonctionnelles, comme des films ou des systèmes d'encapsulation, qui sont à la fois biodégradables et biocompatibles. Cependant, bien que largement étudié, le processus par lequel ces interactions conduisent à la formation d'agrégats solides (séparation liquide-solide) ou de coacervats liquides (séparation liquide-liquide) reste mal compris.

L'enjeu majeur de cette étude est de déterminer les facteurs qui influencent ces deux types de séparations de phase. Des éléments comme la force ionique, le rapport de mélange entre LYS et ALG, et la concentration totale en biopolymères jouent un rôle essentiel mais complexe dans ces processus. Une compréhension approfondie de ces mécanismes est cruciale pour mieux contrôler la fabrication de matériaux innovants. Par exemple, la coacervation est souvent recherchée pour des applications de microencapsulation, tandis que l'agrégation peut poser des problèmes d'instabilité dans des formulations alimentaires ou cosmétiques.

Résultats

Motivés par ce besoin de mieux maîtriser les interactions entre biopolymères, un dispositif millifluidique pour cartographier les conditions précises menant à l'agrégation ou à la coacervation dans des mélanges de LYS et d'ALG a été utilisé. Un diagramme de phase en 3D a pu être établi, représentant les conditions et la nature de la séparation de phase en fonction de la concentration en sel et en biopolymères. Les aspects thermodynamiques de ces deux types de formation de complexes ont été étudiés par la calorimétrie de titration isotherme (ITC). L'agrégation est associée à une très forte affinité entre LYS et ALG, avec un rapport stœchiométrique de 100 LYS : 1 ALG, tandis qu'une affinité de liaison réduite entre les deux biopolymères conduit à la coacervation.

Perspectives

Cette étude ouvre la voie à une meilleure compréhension et à un contrôle plus précis des interactions entre biopolymères, en particulier pour les applications en encapsulation et en délivrance de molécules bioactives. Les résultats permettent d'optimiser les conditions de coacervation ou d'agrégation, offrant ainsi des solutions sur mesure pour divers secteurs industriels. Les prochaines étapes incluront l'exploration d'autres systèmes biopolymériques pour développer des matériaux fonctionnels innovants et adaptés à des besoins spécifiques.

Partie 4

Protéines

et assemblage protéines



© Gabriel Capson Tojo - Enrichissements photoautotrophes de bactéries pourpres non-sulfureuses

Divers processus chimiques et enzymatiques déstructurent la matière première. Nous étudions la production de protéines par voie microbienne basée sur la récupération du carbone et de l'hydrogène dérivés des déchets et aussi l'expression par biologie moléculaire de protéines à haute valeur pharmaceutique. L'actualité est aux mixes de protéines animales et végétales, que ce soit pour des matériaux destinés à l'encapsulation ou des gels alimentaires hyperprotéinés. L'assemblage des protéines est également regardé au niveau du grain de blé où les protéines de réserve s'assemblent en corpuscules essentiels pour la germination. Enfin, l'agrégation des protéines peut modifier l'action de la pepsine, enzyme de l'estomac qui confèrent de nouvelles propriétés de texture. Etudier ces processus permet de déterminer l'aptitude des matières premières à la transformation et de contrôler la texture des produits.

Conversion photosynthétique de H₂ pour la production de sources de protéines propres



En savoir plus

Del Rosario Rodero M. *et al.*

Potential of enriched phototrophic purple bacteria for H₂ bioconversion into single cell protein

Science of The Total Environment . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168471>

Partenariat

- Institute of Sustainable Processes,
Université de Valladolid, Espagne



Contacts

Gabriel Capson Tojo, Jean-Philippe Steyer
et Renaud Escudie

UR LBE

gabriel.capson-tojo@inrae.fr

jean-philippe.steyer@inrae.fr

renaud.escudie@inrae.fr



Contexte

Les Protéines Microbiennes (PM) sont une source prometteuse de protéines, qui peuvent être produites de manière plus durable et plus efficace que nombre de produits alimentaires actuels. En effet, associer la production de PM à la récupération des ressources peut renforcer les avantages environnementaux et économiques du procédé. L'utilisation de substrats gazeux dérivés de flux de déchets présente l'avantage d'être facilement stérilisée et contrôlée, permettant ainsi de générer un produit propre et très peu variable. Grâce à leurs rendements élevés, à leur teneur en protéines et à leur métabolisme flexible, les Bactéries Pourpres Non Sulfureuses (PNSB) peuvent être utilisées pour valoriser efficacement H₂ et CO₂ en les transformant en PM. Ce travail a évalué l'impact de différentes conditions environnementales sur les cinétiques de croissance microbienne et les caractéristiques de la biomasse d'une culture autotrophe de PNSB hautement enrichie.

Résultats

Les rendements en biomasse et en protéines obtenus (~ 1 g DCO_{biomasse}·g DCO_{H₂consommé}⁻¹ et 3,9-4,4 g_{protéine}·g_{H₂}⁻¹) étaient extrêmement élevés, quelles que soient les conditions environnementales testées, se classant parmi les valeurs les plus élevées jamais rapportées pour la valorisation biologique d'un flux gazeux. Les taux de consommation de H₂ variaient

considérablement en fonction des conditions expérimentales, avec des valeurs allant jusqu'à 2,00 ± 0,14 g DCO·g DCO⁻¹·j⁻¹ dans des conditions optimales de croissance (pH 7, 25 °C et intensités lumineuses supérieures à 30 W·m⁻²). Ces taux étaient plus élevés que prévu et ont été estimés à l'aide d'un modèle mécanistique dédié. La biomasse présentait une teneur élevée en protéines (>50 % p/p) et des profils d'acides aminés adéquats, montrant son aptitude comme PM pour l'alimentation animale. Les PNSB étaient les bactéries dominantes dans les tests (l'abondance relative des copies du gène de l'ARNr 16S était majoritairement supérieure à 80 %), avec une population stable dominée par *Rhodobacter* sp. et *Rhodospirillum rubrum* sp. Cette étude a démontré le potentiel des cultures enrichies de PNSB pour la bioconversion efficace de H₂ en PM.

Perspectives

Nous sommes actuellement en train de mettre en place un photobioréacteur colonne à bulles qui nous permettra de : (i) optimiser les taux de production en continu ; (ii) évaluer la qualité des protéines générées et leur innocuité ; (iii) développer et valider un modèle mécanistique pour simuler des scénarios et optimiser davantage le processus. Concernant ce dernier point, nous collaborons avec l'IATE (Montpellier) pour développer un modèle CFD-mécanistique afin de représenter le photobioréacteur mentionné.



© Corine Enard
- Graines de
cameline dans la
main du serriste

Biotechnologie de la gouttelette lipidique de plantes pour la production de protéines virales membranaires



En savoir plus

Gissot L. *et al.*

E and M SARS-CoV-2 membrane protein expression and enrichment with plant lipid droplets

Biotechnology journal . 2024

<https://doi.org/10.1002/biot.202300512>

Partenariat

- Virologie et Immunologie Moléculaires (VIM)

- Synchrotron Soleil, Gif-sur-Yvette



Valorisation

- 2 contrats de collaboration de recherche avec la société Core Biogenesis

- 1 thèse CIFRE

- 1 convention de collaboration de recherche avec SOLEIL

- Demi bourse de thèse SOLEIL

Contacts

Marine Froissard, Jean-Denis Faure et Chouaib Meziadi

UMR IJPB

marine.froissard@inrae.fr

jean-denis.faure@agroparistech.fr

chouaib.meziadi@epicsbiotech.com



Contexte

Les plantes sont utilisées comme plateformes pour l'expression de protéines recombinantes. Ces plateformes végétales ont été utilisées pour la production de protéines destinées à la recherche fondamentale, ainsi qu'à la production de produits biopharmaceutiques de grande valeur. Les gouttelettes lipidiques (GL), contenant l'huile dans les graines, ont ainsi été utilisées comme plateforme biotechnologique pour ancrer et purifier des protéines recombinantes. Par ailleurs, les graines sont capables d'assurer le stockage des protéines recombinantes pendant des années à température ambiante, grâce à leur accumulation naturelle de protéines en grande quantité, leur faible activité protéasique et leur faible teneur en eau. Jusqu'à présent, seules des protéines solubles avaient été produites grâce à un ancrage aux GL via les oléosines, les protéines structurales des GL. Le caractère hautement hydrophobe des GL nous a conduit à faire l'hypothèse que les GL pourraient également être utilisées pour stabiliser et accumuler des protéines membranaires, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une fusion avec les oléosines. Cette hypothèse a donc été testée avec E et M, deux protéines membranaires intégrales du SARS-CoV-2, génétiquement plus stables que la protéine S, et donc présentant un intérêt dans des stratégies d'immunisation.

Résultats

Nous avons développé un ensemble d'outils de biologie de synthèse pour permettre l'association combinatoire rapide de différentes parties codantes (protéines cibles, étiquettes de marquage, ancres de ciblage, liens) avec des promoteurs et des terminateurs chez les plantes. Ces constructions moléculaires ont été exprimées dans deux types de chassis biologiques : des feuilles de *Nicotiana benthamiana* et des graines de *Camelina sativa*. Nous avons montré que la nature des étiquettes, des liens et leurs positions relatives dans la protéine recombinante pouvaient modifier la distribution subcellulaire de la protéine et sa stabilité. L'association à l'oléosine AtOLE1 améliore le ciblage des protéines E et M aux GL. Nos résultats démontrent que l'oléosine végétale peut être utilisée pour adresser et stabiliser efficacement des protéines membranaires virales sur des GL.

Perspectives

Le laboratoire s'engage dans l'optimisation d'un ensemble de plateformes de production de protéines hydrophobes recombinantes associées aux GL afin de répondre aux enjeux de recherche et de production pour des applications pharmaceutiques comme par exemple la vectorisation transcutanée ou par voie orale. Un focus particulier est mis sur les antigènes viraux hydrophobes de maladies et zoonoses émergentes dans le cadre d'une collaboration avec l'unité Virologie et Immunologie Moléculaires (VIM) et le synchrotron SOLEIL.



© INRAE - Lupin pois

De l'utilité des mixes protéine animale – protéine végétale pour la microencapsulation



En savoir plus

Sridhar K. *et al.*

Plant and animal protein mixed systems as wall material for microencapsulation of mānuka essential oil: characterization and in vitro release

Food Research International . 2024

<https://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114419>

Partenariat

Projet support :

Projet MicroEncapsulation Legume prOteiNs (MELON) financé par le programme de recherche Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention Marie Skłodowska-Curie n° 899546



Contacts

Saïd Bouhallab, Denis Renard et Valérie Lechevalier

UMR STLO et UR BIA

said.bouhallab@inrae.fr

denis.renard@inrae.fr

valerie.lichevalier@agrocampus-ouest.fr



Contexte

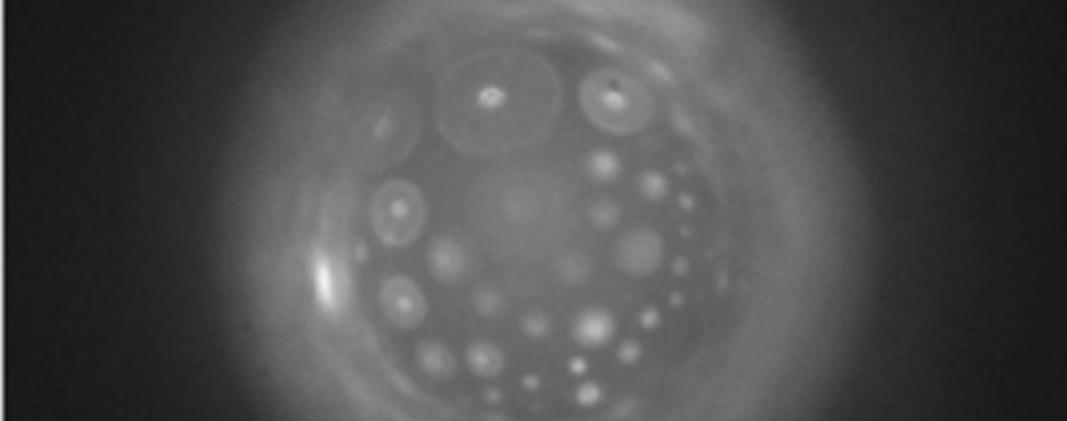
L'utilisation des protéines végétales et animales pour des applications alimentaires et nutraceutiques prend de l'importance, notamment en raison de la demande croissante pour des produits plus sains et durables. Les protéines végétales, comme celles de pois et de lupin, sont reconnues pour leurs avantages nutritionnels et leur faible impact environnemental, mais elles présentent des limites en termes de solubilité et de fonctionnalité. D'autre part, les protéines animales, telles que les protéines de lactosérum, possèdent de bonnes propriétés fonctionnelles mais sont de plus en plus remises en question sur le plan éthique et environnemental. Ainsi, le développement et la conception de mixes protéiques animal/végétal permettraient de réduire l'empreinte environnementale des aliments tout en offrant un profil nutritionnel et des propriétés organoleptiques et gustatives intéressantes pour le consommateur. L'objectif de cette étude est d'explorer des systèmes mixtes de protéines végétales et animales comme matériau pour l'encapsulation, afin de combiner les avantages des deux types de protéines. L'huile essentielle de mānuka, connue pour ses propriétés antimicrobiennes et antioxydantes, est prise comme exemple de bioactif à encapsuler. L'encapsulation vise à améliorer la stabilité de l'huile encapsulée, optimiser sa libération et répondre à la demande croissante de solutions alimentaires fonctionnelles et durables.

Résultats

L'étude a démontré que les systèmes mixtes de protéines végétales (pois et lupin) et animales (lactosérum) sont efficaces pour la microencapsulation de l'huile essentielle de mānuka. Les microcapsules obtenues ont une faible teneur en humidité et une faible activité hydrique, ce qui favorise leur stabilité. L'efficacité d'encapsulation atteint 90 % pour les systèmes mixtes de protéines, avec une bonne solubilité. Les microcapsules montrent également une activité antioxydante et une stabilité oxydative élevée de l'huile essentielle. La libération contrôlée de l'huile, ajustée par le modèle de Korsmeyer–Peppas, dépend du type et de la concentration en protéines utilisées. Les microcapsules à base de mixes de protéines permettent ainsi de protéger et de libérer efficacement l'huile essentielle, ce qui présage de bonnes propriétés applicatives futures.

Perspectives

Les perspectives de cette étude incluent l'exploration de la stabilité des microcapsules sur le long terme sous diverses conditions de stockage (température, humidité, exposition à la lumière). Il serait également pertinent d'étudier la libération in vivo de l'huile essentielle encapsulée et d'envisager le passage à une production à l'échelle industrielle. Ces recherches pourraient aboutir à des applications commerciales dans les secteurs des aliments fonctionnels et des nutraceutiques.



© Adeline Boire, Rémy Cochereau, Hugo Voisin - Corpuscules de gliadine adsorbés sur une gouttelette d'huile - image de microscopie d'autofluorescence obtenue sur la ligne de lumière DISCO

Dynamique d'assemblage des γ -gliadines : vers une compréhension de la formation des corpuscules protéiques



En savoir plus

Cochereau R. *et al.*

Influence of pH and lipid membrane on the liquid-liquid phase separation of wheat γ -gliadin in aqueous conditions

Journal of Colloid and Interface Science . 2024

<https://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2024.04.136>

Partenariat

- Synchrotron Soleil, Ligne DISCO, Gif-sur-Yvette

Contacts

Adeline Boire et Denis Renard

UR BIA

adeline.boire@inrae.fr

denis.renard@inrae.fr



Contexte

Lors du développement des grains de blé, les protéines de réserve, comme la γ -gliadine, s'assemblent en structures denses appelées corpuscules protéiques. Ces corpuscules jouent un rôle crucial en tant que réserve d'acides aminés pour la germination des plantes. Cependant, les mécanismes à l'origine de leur formation restent mal compris. L'hypothèse initiale était que ces structures se forment par précipitation spontanée des protéines, mais des études récentes suggèrent que la séparation de phases liquide-liquide pourrait intervenir dans ce processus. Pour mieux comprendre ces mécanismes, l'unité BIA a mené une étude *in vitro* en couplant la microfluidique à différentes techniques de microscopie, dont la ligne DISCO du synchrotron SOLEIL, pour explorer la dynamique d'assemblage des protéines dans des conditions proches du milieu physiologique.

Résultats

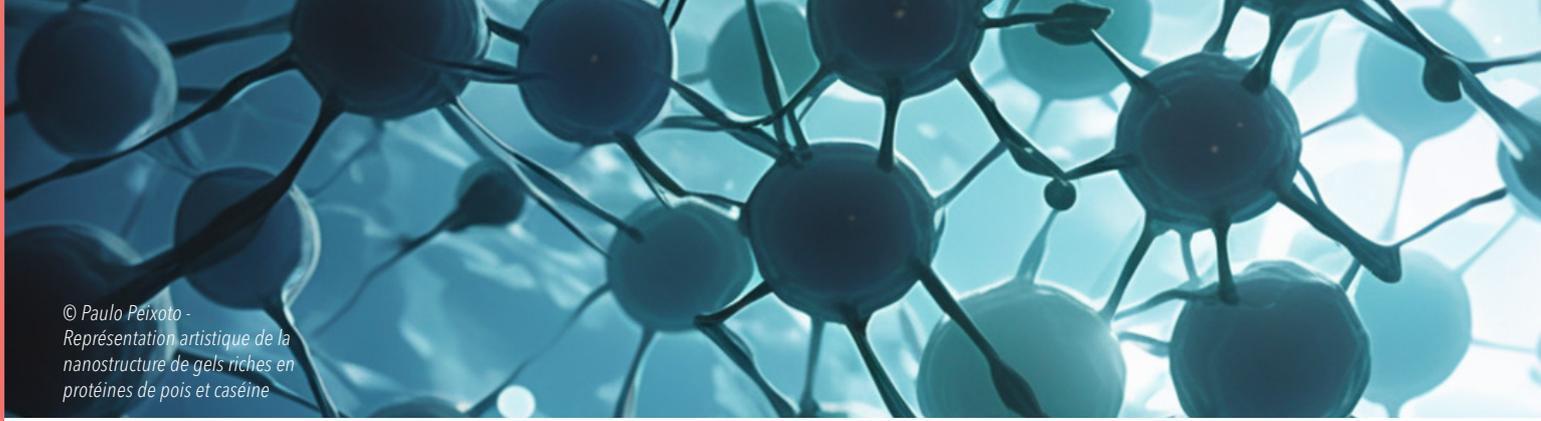
Dans cette étude, des vésicules semi-perméables micrométriques ont été produites afin de contrôler précisément les conditions physico-chimiques et d'étudier les cinétiques d'assemblage de la γ -gliadine en fonction du pH, de la concentration et de la composition en phospholipides. Les résultats montrent que, à faible concentration, les γ -gliadines se séparent via un processus de nucléation et croissance, alors qu'à des concentrations plus élevées, elles forment une phase bicontinue,

suggérant une décomposition spinodale.

De plus, il a été observé que les assemblages de γ -gliadines se localisent souvent à la surface de la membrane des vésicules et forment des couches denses, persistantes même après un retour à des conditions de pH acide. Des expériences complémentaires de microscopie d'autofluorescence UV sur la ligne DISCO ont confirmé l'affinité des γ -gliadines pour les membranes. Ces résultats mettent en évidence une interaction forte entre les phases denses des protéines et les interfaces lipidiques.

Perspectives

Cette étude apporte de nouvelles perspectives sur la formation des corpuscules protéiques dans le grain de blé, notamment le diagramme de phase obtenu montre qu'une faible concentration locale de γ -gliadine peut suffire à déclencher une séparation de phases dans des conditions biologiques. Ces résultats suggèrent que la séparation de phases pourrait jouer un rôle clé dans l'assemblage des protéines au cours des premières étapes de la synthèse des protéines. Aussi, cette étude souligne l'importance des interactions entre les protéines et les membranes cellulaires. Bien que la complexité biologique de la graine en développement ne soit pas encore atteinte avec ce dispositif expérimental, la séparation de phases induite reste une piste prometteuse pour comprendre la formation des corpuscules protéiques.



© Paulo Peixoto -
Représentation artistique de la
nanostructure de gels riches en
protéines de pois et caséine

Mécanisme de formation et propriétés des gels hyperprotéinés à base de protéines animales et végétales



En savoir plus

Nascimento L.G.L. *et al.*

Acid gelation of high-concentrated casein micelles and pea proteins mixed systems

Food Research International . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114982>

Partenariat

- Universidade federal de Viçosa, Brésil, collaboration réalisée dans le cadre du LIA SAMBA

- Food Production Engineering, DTU Food, Technical University of Denmark

Projet support :

LAI Samba - https://samba-laboratory.univ-lille.fr/fr_FR/accueil

Contacts

Paulo Peixoto et Guillaume Delaplace

UMR UMET

paulo.peres-de-sa-peixoto-junior@inrae.fr

guillaume.delaplace@inrae.fr



Contexte

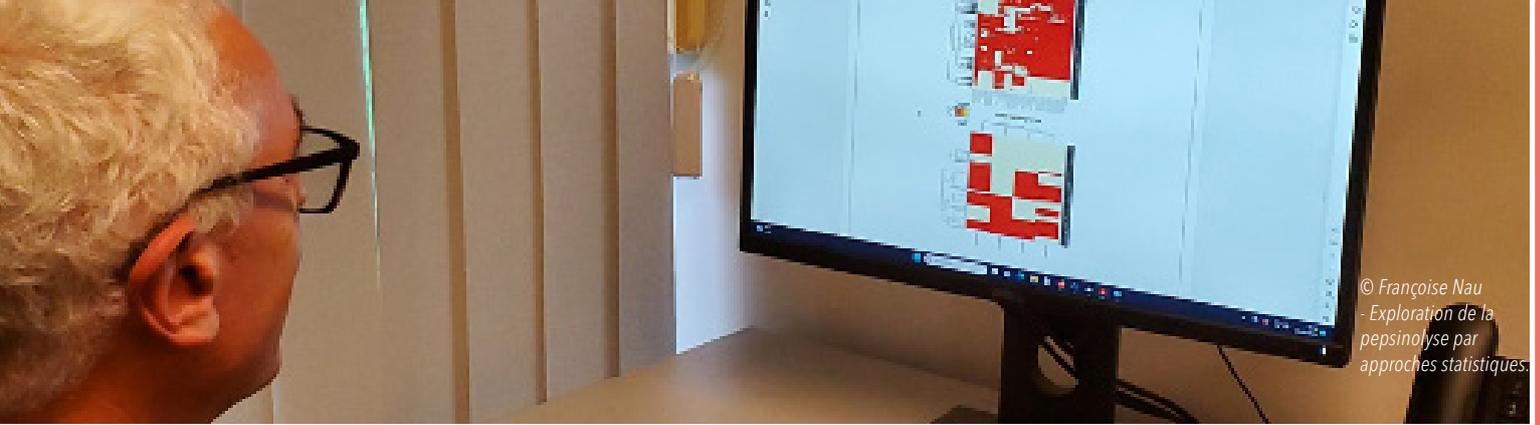
Les produits hyperprotéinés répondent aux besoins des sportifs et des populations seniors ou malades. Une réponse à la transition écologique consiste à formuler des produits dérivés de protéines végétales. Cependant, ces dernières présentent certains inconvénients, tels que de mauvaises propriétés techno-fonctionnelles et un goût amer qui limite leur spectre d'utilisation, contrairement aux produits laitiers. Une stratégie intéressante serait de combiner dans un même produit final des protéines végétales et des protéines du lait pour conserver les propriétés techno-fonctionnelles positives des protéines animales et incorporer davantage de protéines végétales dans le produit. Le challenge à relever consiste à maîtriser les propriétés techno-fonctionnelles à macro-échelle, comme les propriétés rhéologiques, dérivant des structures nano- à micro-échelle du mélange. Ces propriétés vont varier de façon importante selon les quantités relatives (le ratio pois/caséines) des protéines utilisées. Ainsi, il est nécessaire de réaliser une étude poussée pour maîtriser les nano-échelles et pour comprendre les mécanismes de formation des réseaux de protéines, afin d'identifier précisément les conditions optimales à réunir pour formuler un produit riche en protéines végétales.

Résultats

La différence de « porosité » entre les gels a pu être évaluée, par la mesure de la mobilité et la dynamique de l'eau en Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) et la mesure de la fluorescence en confocale. Les structures formées par ces deux protéines sont très sensibles au rapport pois/caséine utilisé, ainsi qu'aux conditions physico-chimiques telles que la température et le pH. En effet, les propriétés rhéologiques des gels formés présentent une variation non monotone selon la proportion de protéines de pois : dans certaines conditions les gels constitués par seulement des protéines de pois ont une viscosité plus grande que les gels formés seulement par des caséines, mais la présence de 20 % de caséines dans un gel riche en protéines de pois (à 80 %) augmente la viscosité apparente de presque 50 % par rapport au gel de protéines de pois.

Perspectives

Ces données ont permis de mettre en évidence les conditions optimales dans lesquelles les deux protéines forment des réseaux plus ou moins indépendants au sein du gel et comment ces structures affectent la rhéologie du produit final de façon quantitative en fonction du ratio pois/caséines, au pH et à la température. La suite de ces travaux comprendra l'évolution de ces structures en fonction du temps et en fonction de la présence de molécules bioactives.



© Françoise Nau
- Exploration de la
pepsinolyse par
approches statistiques.

Explorer la dynamique de protéolyse par la pepsine grâce aux approches statistiques



En savoir plus

Suwareh O. *et al.*

Peptide bonds cleaved by pepsin are affected by the morphology of heat-induced ovalbumin aggregates

Food Chemistry . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140260>

Partenariat

- UMR IRMAR CNRS-Institut Agro



Contact

Françoise Nau

UMR STLO

francoise.nau@inrae.fr



Contexte

La phase gastrique, à l'origine des premières étapes de déconstruction des aliments, est d'une importance primordiale pour la digestion des protéines, grâce essentiellement à l'action de la pepsine. La nature des peptides libérés dans le compartiment intestinal conditionne à son tour l'action des protéases pancréatiques. Cette interdépendance entre les différentes phases de la digestion, ainsi que le caractère dynamique de l'action des enzymes contribuent à la complexité des phénomènes en jeu. En particulier, les règles mécanistiques qui déterminent que telle liaison peptidique soit hydrolysée par la pepsine avant telle autre n'ont été que rarement et partiellement explorées. C'est dans ce contexte qu'une approche originale et transdisciplinaire a été développée pour identifier les paramètres influant sur la pepsinolyse, par la mise en œuvre d'outils et de démarches statistiques innovantes, appliquées à des jeux de données peptidomiques.

Résultats

A partir des données de peptidomiques issues de l'hydrolyse *in vitro* par la pepsine de six protéines en conditions gastriques simulées, la densité moléculaire et la présence de ponts disulfures ou de motifs de glycosylation sont apparues défavorables à l'action de la pepsine. Par des approches statistiques originales, la spécificité d'action de la pepsine a pu être réinterrogée, les

modèles de prédiction développés soulignant l'influence de la nature des acides aminés de part et d'autre de la liaison peptidique hydrolysée, et ce jusqu'au 7^{ème} résidu de chaque côté. L'environnement physicochimique des liaisons peptidiques a également un effet sur leur sensibilité à la pepsine, qu'il s'agisse de la structure secondaire (effet positif des « coils »), l'hydrophobie (effet négatif) ou la charge (effet négatif des charges positives). La multiplicité des paramètres impliqués pourrait expliquer que la pepsine est souvent présentée comme une protéase dont la spécificité est relativement « fluctuante ». De plus, dans le cas de l'ovalbumine, l'agrégation a pu modifier l'action de la pepsine, en termes de cinétique mais également en termes de nature des liaisons peptidiques hydrolysées, certaines pouvant même être spécifiques de modalités d'agrégation particulières (particulaire vs fibrillaire).

Perspectives

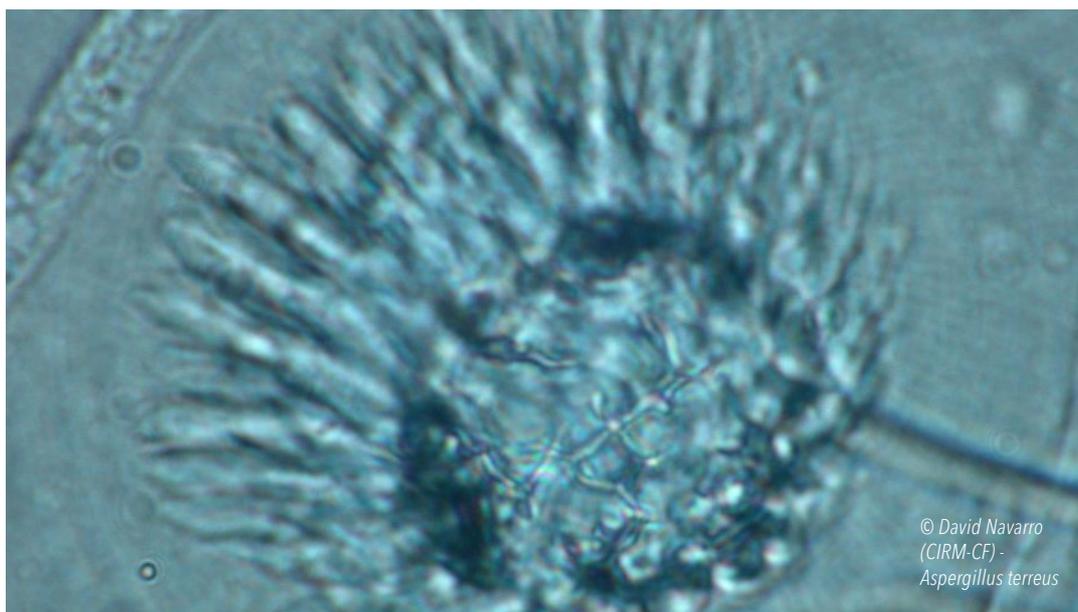
La compréhension de plus en plus fine des règles d'action de la pepsine laisse entrevoir la possibilité de contrôler précisément la nature des peptides libérés en phase gastrique, et donc potentiellement dans la suite du processus digestif. En particulier, les procédés susceptibles de modifier les caractéristiques physicochimiques des protéines, dont l'agrégation, pourraient être à terme des leviers permettant d'orienter le déroulement de la digestion.

Partie 5

Connaître et caractériser

La matière première

et la biomasse



Nos chercheurs développent des méthodes pour des actions aussi diverses que quantifier le furane dans les aliments infantiles, suivre l'oxydation des lipides dans les aliments, l'air ou l'eau, quantifier la déconstruction du bois, cibler la valorisation de l'os ou contrôler la texture de produits à base de tomate. Les études visent également à améliorer l'action des enzymes : les xylanases dans les produits céréaliers, les enzymes oxydatives dans les tissus végétaux ou les pectines fongiques sur les tourteaux de soja.



© AdobeStock-
Monkey Business

Des solutions fiables pour pister le furane et ses dérivés dans les aliments infantiles



En savoir plus

Sandjong Sayon R.S. *et al.*

Targeted quantification and untargeted exploration of furan and derivatives in infant food by headspace extraction-gas chromatography-Q Exactive Orbitrap mass spectrometry

Food Research International . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114614>

Partenariat

- HiPP GmbH & Co. Vertrieb KG, Pfaffenhofen, Allemagne

- Yiotis Anonimos Emporiki & Viomixaniki Etaireia, Athènes, Grèce

Projet support :

Projet H2020 SAFFI (SAFe Food for Infants in the EU and China, 2020-2024) coordonné par l'UR QuaPA (E. Engel).

Contacts

Erwan Engel et Jérémy Ratel

UR QuaPA

erwan.engel@inrae.fr

jeremy.ratel@inrae.fr



Contexte

Présents dans les aliments infantiles, le furane et deux de ses dérivés, le 2-méthylfurane (2-MF) et le 3-méthylfurane (3-MF), représentent un risque pour les enfants de moins de 3 ans en raison de leur possible cancérogénéicité. Devant l'absence de méthode fiable et robuste pour quantifier ces composés furaniques, il était urgent de fournir une solution analytique pour répondre aux demandes des instances de sécurité sanitaire et des industriels.

Résultats

Le travail a consisté à comparer les performances de deux méthodes couplant en amont d'une analyse séparative par chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse haute résolution (GC-HRMS), la micro-extraction en phase solide (SPME) ou l'extraction par espace de tête statique (SHS). Les deux options analytiques ont été validées par l'approche du profil d'exactitude sur les purées de fruits et les poudres de laits infantiles.

Le couplage SHS-GC-HRMS s'est révélé plus performant pour la quantification ciblée de composés furaniques. Cette méthode a permis de déterminer les concentrations en furane, 2-MF et 3-MF dans une large gamme de produits infantiles, incluant des petits pots à base de légumes, des purées de fruits, des céréales et des poudres de lait. Les petits pots à base de légumes,

mélangés ou non avec du poisson ou de la viande, se sont avérés être les produits les plus contaminés en ces trois composés et des contributeurs majeurs au risque lié au furane pour les enfants de plus de six mois.

En revanche, le couplage SPME- GC- HRMS s'est révélé plus pertinent pour l'exploration des autres composés furaniques susceptibles d'être cogénérés en même temps que le furane, le 2-MF et le 3-MF. Utilisée en analyse non ciblée, cette méthode a permis d'identifier 13 autres composés furaniques dans les aliments analysés, dont 5 n'avaient jamais été rapportés dans ce type de produits.

Perspectives

Les concentrations élevées révélées dans les petits pots à base de légumes montrent qu'il est urgent de trouver des stratégies de remédiation réalistes et faciles à mettre en œuvre pour diminuer le risque significatif lié aux composés furaniques dans ces produits. D'autre part, même si les teneurs détectées dans les poudres de lait infantiles semblent plus modérées, le changement récent de réglementation, qui préconise un enrichissement de ces produits en acides gras polyinsaturés qui sont des précurseurs des composés furaniques, incite à étudier l'impact de la formulation et des conditions de stockage de ces aliments infantiles sur la génération potentielle du furane et de ses dérivés.



© AdobeStock - Best

Un capteur pour le suivi des composés carbonylés générés par l'oxydation des lipides



En savoir plus

Carballido L. *et al.*

A new sol-gel fluorescent sensor to track carbonyl compounds

Talanta . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.126569>

Valorisation

Brevet : « Polymère pour la détection des aldéhydes et des cétones » n° FR 2113403, le 13/12/2021, PCT n° PCT/EP2022/085460, déposée le 12/12/2022, délivrée le 22/06/2023 n° WO2023110783

Elias Bou-Maroun, Laura Carballido, Philippe Cayot, Nicolas Sok, Thomas Karbowski

Projet support:

- Projet ISITE-BFC (contrat ANR-15-IDEX-0003), projet région dispositif ICE, projet Carnot Qualiment CAPTIV



Contacts

Laura Carballido, Elias Bou-Maroun et Thomas Karbowski

UMR PAM

laura.carballido@agrosupdijon.fr

elias.bou-maroun@institut-agro.fr

thomas.karbowski@institut-agro.fr



Contexte

L'objectif est de développer des capteurs pour déterminer rapidement et simplement la qualité des produits alimentaires et cosmétiques afin de réduire le gaspillage. En particulier, il s'intéresse au suivi du niveau d'oxydation des lipides, phénomène de dégradation inévitable impliquant une perte de qualité nutritionnelle, organoleptique et s'il n'est pas contrôlé, des risques pour la santé humaine. Les techniques classiques utilisées dans l'industrie pour évaluer la qualité des produits sont souvent longues et complexes à mettre en œuvre. Elles nécessitent de plus un laboratoire d'analyse, des équipements généralement coûteux et l'utilisation de produits chimiques toxiques pour l'homme et pour l'environnement.

Résultats

Un nouveau capteur fluorescent pour le suivi de l'oxydation des lipides a été développé. Ce capteur est basé sur un matériau à base de silice, non toxique et poreux, synthétisé par voie solution-gélification selon les principes de la chimie verte. Ce capteur permet de détecter en moins d'une minute des composés carbonylés dans un milieu par une diminution de la fluorescence du matériau. Il peut détecter des concentrations très faibles de ces

composés, comme l'hexanal, et fonctionne sur une large gamme de concentrations.

La réponse du capteur a été corrélée avec les résultats obtenus par des méthodes traditionnelles, validant la possibilité d'utiliser ce nouveau capteur en remplacement des méthodes classiques pour la détermination rapide, simple et sensible du niveau d'oxydation des lipides des produits alimentaires et cosmétiques, avec peu de préparation de l'échantillon et sans manipulation de réactifs toxiques, contrairement aux techniques habituelles.

Perspectives

La performance du capteur breveté a été testée avec succès dans des milieux simulés et des milieux réels tels que les huiles alimentaires, prouvant son potentiel d'application dans de nombreux domaines tels que l'agroalimentaire, l'environnement ou la médecine. Nous travaillons à une version portable de ce nouveau capteur rapide, simple, non toxique pour une analyse directement sur-site.



Les propriétés optiques d'os bovin comme indicateur de transformabilité



En savoir plus

Wahaia F. *et al.*

Effect of bone age and anatomy on the variability of the bovine bone by-product by Terahertz time-domain spectroscopy and energy-dispersive X-ray microanalysis
Food Bioscience . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103978>

Partenariat

- Institute of Physics, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile
- ANID - Millennium Science Initiative Program, Millennium Institute for Research in Optics (MIRO), Chile
- FTMC - Terahertz Photonics Laboratory, Centre for Physical Sciences and Technology, Lithuania

Contact

Vincenza Ferraro

UR QuaPA

vincenza.ferraro@inrae.fr



Contexte

L'os est le sous-produit animal le plus abondant. En Europe, ca. 7.2 Mt/an d'os bovin (filiale viande et lait) sont générés, et s'élèvent à ca. 63 Mt/an au niveau mondial. Actuellement, des valorisations à faible valeur ajoutée (pet-food) ou palliatives (export, incinération) sont mises en œuvre. Néanmoins, des valorisations innovantes, pour des produits biosourcés, sont possibles grâce aux propriétés mécaniques, thermiques, électriques et biologiques de l'os. Pour exploiter ce potentiel, une compréhension de la variabilité de l'os est indispensable, car, si sa composition chimique reste presque invariée, sa structure, articulée sur cinq niveaux, peut évoluer avec certains facteurs biologiques et en particulier avec l'âge de l'animal et l'anatomie de l'os. La spectroscopie térahertz dans le domaine temporel (THz-TDS), a été utilisée pour déterminer certaines propriétés optiques de l'os, à savoir l'indice de réfraction (n) et le coefficient d'absorption (k). Des os de différents âges et anatomies (fémur/tibia) ont été considérés. Ces propriétés optiques ont été mises en lien avec l'extractibilité de la phase organique et minérale de l'os.

Résultats

Fémur et tibia représentent deux clusters différents ; le cluster des tibias est plus homogène que celui des fémurs. L'âge représente ca. 27 % de la variabilité totale tandis que l'anatomie en représente ca. 68 %. L'indice de

réfraction augmente avec l'âge tandis que le coefficient d'absorption diminue avec ce facteur. Les variations sont plus évidentes pour le fémur. L'indice de réfraction corrèle positivement avec l'extractibilité de la phase minérale de l'os, signifiant que, à travers le même procédé, un meilleur rendement sera obtenu d'un fémur plus âgé par rapport au plus jeune, et encore plus par rapport au tibia du même âge. Au contraire, le coefficient d'absorption corrèle positivement avec l'extractibilité de la matière organique, et en particulier du collagène, principalement à partir des tibias, pour lesquels ce paramètre est inférieur par rapport aux fémurs.

Perspectives

La variabilité des biomasses, considérée comme un frein à la valorisation à haute valeur ajoutée, a été très peu étudiée. Ce travail représente la toute première recherche permettant d'identifier des marqueurs de transformabilité d'os bovin pour des applications plus ciblées. Entre autres, il s'agit de la toute première application de la spectroscopie THz à l'étude des propriétés optiques de l'os. Cette spectroscopie, qui est la plus récente parmi toutes (découverte en 1990), a l'avantage de permettre l'acquisition d'informations qui ne sont pas accessibles à la radiation infrarouge, et la mesure directe de plusieurs propriétés optiques.

© Loïc Foucat - Epi de blé et fractions de grain : farine blanche, farine complète et son.



L'efficacité des xylanases confirmée en milieu peu hydraté



En savoir plus

Rakha A. *et al.*

Behavior of endo-xylanases on wheat milling products in relation with variable loading conditions

Carbohydrate Polymers . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122029>

Contact

Estelle Bonnin

UR BIA

estelle.bonnin@inrae.fr



Contexte

L'eau est essentielle dans les processus enzymatiques car elle fournit le milieu solvant pour la réaction, contrôle les conditions physicochimiques de la réaction (telles que le pH, la force ionique...), assure le transfert de masse des produits insolubles et solubles, et est un réactif de la réaction d'hydrolyse. Pourtant, les teneurs en eau rencontrées dans les procédés industriels de transformation des céréales sont assez faibles, 30 % en production d'aliments pour animaux, 55-60 % en panification. Nous avons donc voulu connaître l'impact de ces faibles teneurs en eau sur l'activité et la spécificité des enzymes utilisées dans ces procédés. Nous avons donc étudié l'effet d'une charge en solide faible (18 %) à élevée (72 %) sur le comportement de xylanases bactérienne et fongique vis-à-vis de fractions de grains de blé, c'est-à-dire farine blanche, farine complète (grains entiers broyés) et son.

Résultats

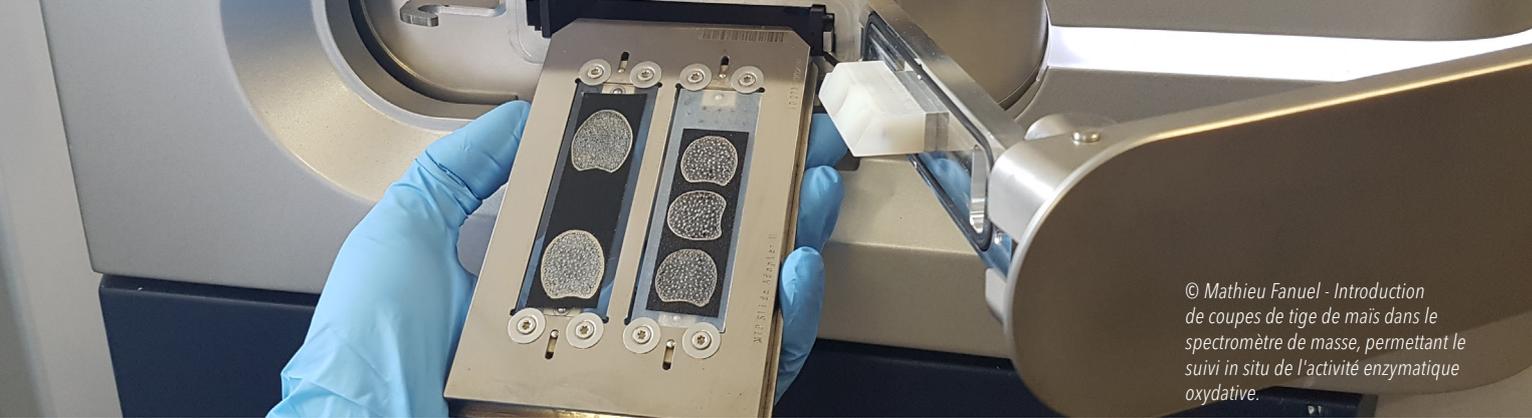
L'efficacité des deux enzymes est négativement affectée lorsque la teneur en eau est inférieure à 50 %. Toutefois, elles conservent leur activité sur les fractions de blé à des teneurs en eau aussi faibles que 30 %. Le son, la farine complète et la farine blanche présentent des distributions d'eau très différentes pour une teneur en eau similaire, et cette distribution de l'eau

dans les fractions de blé a des effets importants sur l'action des xylanases. Une faible disponibilité de l'eau impacte également la spécificité des xylanases. Ainsi, à faible teneur en eau, la xylanase bactérienne accepte mieux que la xylanase fongique la présence de substitutions par l'arabinose de la chaîne principale de xylose des arabinoxylanes (AX).

Le potentiel de solubilisation des AX par les xylanases en milieu peu hydraté offre des perspectives prometteuses pour des applications dans les procédés à faible hydratation. Nos résultats ouvrent la voie à l'optimisation des étapes de dégradation enzymatique dans ces processus et s'alignent également sur des pratiques respectueuses de l'environnement en réduisant la consommation d'eau.

Perspectives

Les résultats obtenus au cours de cette étude montrent que des recherches ultérieures sont nécessaires pour explorer l'impact de la structure des polymères et de leurs interactions sur leur mobilité et celle de l'eau, et comment ces phénomènes affectent l'action des enzymes dans des matrices aux propriétés rhéologiques variables et aux caractéristiques structurales diverses.



© Mathieu Fanuel - Introduction de coupes de tige de maïs dans le spectromètre de masse, permettant le suivi in situ de l'activité enzymatique oxydative.

L'action des enzymes oxydatives dans les tissus végétaux étudiée par imagerie



En savoir plus

Leroy A. *et al.*

In situ imaging of LPMO action on plant tissues

Carbohydrate Polymers . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122465>

Partenariat



Contacts

Gabriel Paës, Jean-Guy Berrin et Hélène Rogniaux

UMR FARE, UMR BBF et UR BIA

gabriel.paes@inrae.fr

jean-guy.berrin@inrae.fr

helene.rogniaux@inrae.fr



Contexte

La transformation de la biomasse végétale en produits d'intérêt nécessite l'action synergique de nombreuses enzymes. Celles-ci agissent sur les polymères comme les polysaccharides (cellulose, hémicelluloses) et les polyphénols (lignine) qui constituent les parois cellulaires des végétaux. L'action enzymatique peut être de deux natures complémentaires : hydrolytique (rupture de liaisons dans ou entre des polymères) ou oxydative (libération de composés oxydés). Bien que ces mécanismes soient relativement bien compris au niveau des polymères individuels, ils demeurent complexes à appréhender à l'échelle tissulaire, surtout pour les enzymes oxydatives appelées les lytic polysaccharide monooxygenases (LPMO). En effet, les enzymes oxydatives, dont le rôle est pourtant essentiel dans les processus de dégradation enzymatique, libèrent des petites molécules, appelées oligosaccharides oxydés, difficiles à détecter et à quantifier.

Résultats

Pour étudier l'action des LPMO, les chercheurs ont adapté une approche d'imagerie par spectrométrie de masse basée sur la désorption-ionisation laser assistée par matrice (MALDI-MS) capable de détecter les oligosaccharides oxydés libérés en faibles quantités par les LPMO au cours de l'oxydation de la cellulose, avec une résolution spatiale de 20 μm . Cette approche permet ainsi de cartographier les modifications chimiques des polysaccharides au sein des parois cellulaires, sans aucun

marquage, ni sonde spécifique. Cette étude a été menée sur des coupes fines de tiges de maïs, une céréale importante en France pour la nutrition animale, dont les tiges sont des co-produits à fort potentiel de valorisation. L'imagerie par spectrométrie de masse a révélé l'action ciblée des LPMO au sein des parois cellulaires des tiges de maïs. Les résultats obtenus ont permis de démontrer une variabilité chimique et spatiale des oligosaccharides oxydés et non oxydés produits par l'action des LPMO sur les parois. En effet, les produits oxydés ont été principalement détectés dans les régions peu lignifiées des parois cellulaires. Cette observation suggère que la composition et l'organisation structurale des polymères influencent l'efficacité des LPMO.

Les scientifiques ont également pu étudier par cette méthode d'imagerie les interactions synergiques entre une LPMO oxydant la cellulose et un cocktail de cellulases commerciales connues pour hydrolyser la cellulose en glucose.

Perspectives

Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour l'utilisation des enzymes dans des cocktails enzymatiques, et plus particulièrement les LPMO, dans des applications biotechnologiques centrées sur la déconstruction des parois cellulaires végétales. Ces avancées sont prometteuses tant pour la valorisation de la biomasse végétale en bioproduits que pour la protection des plantes contre les ravageurs afin de mettre en place des protections adaptées.

Rôle clé des pectinases fongiques pour améliorer la digestibilité du tourteau de soja



En savoir plus

Plouhinec L. *et al.*

A time-course analysis of *Aspergillus terreus* secretomes reveals the importance of pectin-degrading enzymes to increase the digestibility of soybean meal

Applied and Environmental Microbiology . 2024

<https://doi.org/10.1128/aem.02153-23>

Partenariat

- Adisseo France S.A.S, CINAbio, INSA Toulouse

- INRAE, Biopolymères Interactions Assemblage, Nantes

- CEA, INRAE, Département Médicaments et Technologies pour la Santé (DMTS), Université Paris-Saclay, Bagnols sur Cèze



Contacts

Mickaël Lafond et Jean-Guy Berrin

UMR BBF

michael.lafond@univ-amu.fr

jean-guy.berrin@inrae.fr



Contexte

Valoriser l'intégralité des déchets et co-produits de la filière agricole est un enjeu majeur pour le développement de la bioéconomie. Pour répondre à ce défi, l'industrie de l'alimentation animale utilise depuis plusieurs années les co-produits agricoles tels que les tourteaux de soja, comme source alternative de protéines. Cependant, la richesse de ce type de co-produit en polysaccharides non amylacés, notamment en pectines, constitue un obstacle à l'assimilation des nutriments pour les animaux monogastriques. Les enzymes produites par les champignons filamenteux représentent une solution prometteuse pour améliorer la digestibilité du tourteau de soja en dégradant efficacement ces polysaccharides complexes.

Résultats

Cette étude en collaboration avec la société Adisseo a pour objectif d'identifier des CAZymes fongiques capables d'améliorer la digestibilité du tourteau de soja. Après avoir sélectionné le champignon *Aspergillus terreus* pour sa capacité à produire un large panel de CAZymes, des essais fonctionnels et une étude cinétique sur des substrats de culture riches en pectine ont été réalisés. Ainsi, les résultats ont mis en évidence des profils de sécrétion d'enzymes variables en fonction des conditions testées et ont démontré que la libération des protéines du soja et la dégradation

des pectines sont étroitement liées. En effet, les enzymes secrétées par le champignon *Aspergillus terreus* améliorent la digestibilité du tourteau de soja en déconstruisant la pectine, permettant de ce fait la solubilisation de protéines et d'acides aminés essentiels. Une analyse de corrélation a permis d'identifier plusieurs enzymes fongiques impliquées dans la dégradation des pectines. Globalement, ces résultats montrent que la dégradation de la pectine, en particulier du squelette de la pectine et des chaînes latérales du rhamnogalacturonane de type I, favorise la libération de peptides et d'acides aminés directement assimilables par l'animal.

Perspectives

Ces travaux mettent en lumière des perspectives prometteuses quant à l'utilisation de sécrétomes d'*Aspergillus terreus* pour améliorer l'hydrolyse de co-produits agricoles. Bien que la structure exacte de la pectine de soja reste à établir précisément, cette étude démontre que la possibilité de lever les verrous liés à la récalcitrance de ces substrats repose sur la dégradation enzymatique. Par conséquent, les pectinases fongiques pourraient non seulement améliorer la digestibilité des aliments, mais également libérer des oligosaccharides prébiotiques, offrant ainsi des bénéfices potentiels pour la santé intestinale des animaux.

Un petit pas pour les parois végétales, un grand pas pour les échelles !



En savoir plus

Refahi Y. *et al.*

Plant cell wall enzymatic deconstruction:
Bridging the gap between micro and
nano scales

Bioresource Technology . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131551>

Valorisation

Logiciel open-source développé
et accessible sur le dépôt GitLab
du laboratoire FARE, avec un wiki
fournissant la documentation et les
instructions nécessaires pour installer les
dépendances et analyser les images.



Contacts

Yassin Refahi et Gabriel Paës

UMR FARE

yassin.refahi@inrae.fr

gabriel.paes@inrae.fr



Contexte

Le dérèglement climatique et l'épuisement des ressources fossiles rendent cruciales les solutions énergétiques durables. La biomasse lignocellulosique, constituée par les parties non alimentaires des plantes et par les résidus de l'industrie du bois, est diverse et renouvelable : elle apparaît comme une alternative pertinente au carbone fossile. Cependant, sa complexité chimique et structurale rend sa transformation par voie biotechnologique en produits d'intérêt coûteuse : c'est pour cela qu'on la qualifie de matière première récalcitrante. Il est donc primordial de développer des stratégies innovantes pour la déconstruire efficacement. Bien que de nombreux travaux de recherche aient identifié des facteurs de la récalcitrance à l'échelle nanométrique, tels que la teneur en lignine, la porosité et la cristallinité de la cellulose, l'étude de la récalcitrance à l'échelle des cellules et des tissus végétaux reste peu explorée.

Résultats

Nous avons surmonté les défis expérimentaux et mathématiques liés à la segmentation et au suivi de la déconstruction des parois en développant une méthode d'imagerie 4D (espace + temps). Celle-ci est basée sur l'imagerie par microscopie confocale de fluorescence combinée à un traitement automatisé des images pour quantifier l'évolution de la morphologie des cellules. Grâce à cette approche, qui surmonte les limitations des méthodes classiques

sujettes aux biais et aux erreurs de délimitation des cellules, nous avons été capables d'acquérir des images 3D d'échantillons de bois de peuplier au cours de l'hydrolyse enzymatique. Au-delà de ce développement technique conséquent, notre étude a conduit à plusieurs résultats et découvertes majeurs. Tout d'abord, la déconstruction enzymatique à l'échelle cellulaire entraîne principalement une réduction du volume des parois cellulaires, plutôt que des modifications de la surface accessible. De plus, la compacité 3D des parois cellulaires avant hydrolyse est corrélée à la déconstruction volumétrique. Enfin, nous avons établi une corrélation positive entre la déconstruction volumétrique des parois cellulaires et la conversion de la cellulose, reliant ainsi pour la première fois des mécanismes aux échelles nano- et micro-métriques.

Perspectives

Cette étude souligne l'impact et l'importance d'étudier la déconstruction enzymatique à l'échelle des cellules et des tissus, ouvrant la voie à de futures études sur la déconstruction des parois cellulaires végétales à ces échelles spécifiques. Compte tenu des avancées méthodologiques et des implications sous-jacents de la déconstruction enzymatique de la biomasse lignocellulosique, nous pensons que notre travail suscitera un intérêt généralisé dans des domaines tels que la biotechnologie végétale, la biochimie enzymatique et la biotechnologie computationnelle.

© Miarka Sinkora - Particules fines de purée de tomate intermelant de résidus de parois (colorés en bleu par un marquage au Calcofluor), et des particules riches en lycopes (autofluorescence verte).

La texture des produits à base de tomate



En savoir plus

Sinkora M. *et al.*

Variety, growing conditions and processing method act on different structural and biochemical traits to modify viscosity in tomato puree

Food Research International . 2024

<https://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114495>

Partenariat

- UR PSH, INRAE, Avignon
- SONITO interprofession de la tomate d'industrie
- CTCPA Centre technique de la conservation des produits issus de l'agriculture

Projets supports :

Projet CASDAR Tom'ability



Contacts

David Page, Agnes Rolland-Sabate et Alexandre Leca

UMR SQPOV

david.page@inrae.fr

agnes.rolland-sabate@inrae.fr

alexandre.leca@inrae.fr



Contexte

La texture des produits à base de tomates est le critère classé en tête de leurs attributs de qualité. La filière cherche à la contrôler par le choix de variétés appropriées ou par l'utilisation de procédés s'appuyant sur la réactivité enzymatique du fruit (procédés hot ou cold break HB/CB).

Les mécanismes subjacents restent peu décrits : les théories basées sur les tailles respectives et les formes des particules issues d'éléments préexistants dans les cellules du fruit sont peu vérifiées en tomates. Le choix des meilleurs paramètres de procédés reste donc très empirique, et les arbitrages sur la qualité des produits restent basés sur des attributs peu indicatifs (principalement la teneur en matières sèches solubles (°Brix)). D'autre part, il n'existe pas de critères précis pour la sélection variétale vers plus de viscosité.

L'étude menée propose une analyse de quatre classes d'échantillons combinant des effets variétaux et de procédés pour mettre en lumière des mécanismes inhérents à chacun.

Résultats

Une étude hédonique par la méthode de napping montre que les consommateurs font la différence entre les deux sources d'augmentation de la viscosité (variété ou process) là où les instruments de mesures physiques et les compositions en éléments constitutifs peinent à voir une différence.

La variété H1311, qui permet d'obtenir

des produits systématiquement plus visqueux quelque soit le procédé choisi, possède une plus forte teneur en carbohydrates insolubles, et ses pectines affichent des poids moléculaires plus élevés. Ces deux traits sont des critères de sélection potentiels pour la tomate d'industrie. Une analyse structurale des pectines solubles HB montre qu'elles ont certes des masses molaires plus fortes, mais qu'à masse molaire égale, elles présentent des indices de conformations typiques de structure linéaires et semi-flexibles là où ceux de CB prédisent des structures regroupées « en pelote ». Une analyse en microscopie fluorescente avec marquage des résidus de paroi et autofluorescence du lycopène, met en évidence des particules où ces deux éléments, pourtant d'hydrophobicité opposée, sont intimement intermélés. Ces particules néoconstituées sont de tailles généralement supérieures à la taille moyenne d'une cellule et sont plus nombreuses chez HB.

Perspectives

Comprendre les mécanismes d'interactions qui génèrent des éléments constitutifs susceptibles d'agir sur la texture répond aux enjeux de la filière, mais va bien au-delà. Les maîtriser permettrait de proposer des stratégies de stabilisation de particules hydrophobes dans un environnement aqueux. Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus sur la bioaccessibilité du lycopène de ces mêmes produits, qui est drastiquement plus élevée pour les particules fines des produits HB.

Partie 6

Aliments et régimes



Nous considérons de nouvelles matières premières résilientes au réchauffement climatique et contribuant à des pratiques agricoles durables pour concevoir des aliments et régimes alimentaires nutritionnellement riches. Cela nous amène à prendre en compte de plus en plus le repas, tant au point de vue de ses qualités nutritionnelles que de sa digestion. Ce qui se passe en bouche est également étudié, notamment le rôle du microbiote oral. Cette session est aussi l'opportunité de dépaysement avec le chocolat et les mangues.



© Adilson Locali
Pereira, Vania Regina
Nicoletti



Exploration des ingrédients issus d'une légumineuse tropicale pérenne : le pois d'Angole



En savoir plus

Locali-Pereira A.R. *et al.*

Pre-treatment effects on the composition and functionalities of pigeon pea seed ingredients

Food Hydrocolloids . 2024

<https://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109923>

Partenariat

- UNESP

Contacts

Adeline Boire et Claire Berton-Carabin

UR BIA

adeline.boire@inrae.fr

claire.berton-carabin@inrae.fr



Contexte

L'exploration de la biodiversité végétale est cruciale pour identifier de nouvelles sources alimentaires répondant aux enjeux de sécurité alimentaire, de durabilité et de résilience face au changement climatique. Le pois d'Angole (*Cajanus cajan*), légumineuse pérenne cultivée principalement au Brésil et en Asie, est une plante à fort potentiel nutritionnel et agronomique, encore largement sous-exploitée malgré ses teneurs élevées en protéines, vitamines, minéraux et sa capacité de fixation de l'azote. Ce projet, faisant l'objet d'une thèse en co-tutelle avec l'Université de São Paulo (UNESP), avait pour objectif de caractériser les farines de pois d'Angole et d'explorer les procédés de transformation des graines en farine et concentrés. Notre unité a adapté ses méthodes analytiques pour évaluer les effets des différentes étapes de transformation sur la composition et les propriétés techno-fonctionnelles du pois d'Angole.

Résultats

Deux prétraitements ont été mis en œuvre sur les graines de pois d'Angole avant la transformation : le trempage et la cuisson. Les analyses ont révélé que ces prétraitements et le processus de fractionnement influencent fortement la composition des farines et des concentrés protéiques obtenus. Le fractionnement des farines non traitées favorise une accumulation lipidique

significative dans les concentrés protéiques, avec une concentration en lipides atteignant 12,6 g/100 g. La cuisson en amont du fractionnement réduit significativement la teneur en lipides (4.0 g/100 g), notamment en phospholipides, comparée au trempage (9.5 g/100 g) qui entraîne une accumulation lipidique plus marquée. En termes de fonctionnalités, la cuisson des graines améliore la capacité de rétention d'eau des concentrés de pois d'Angole et la stabilité des émulsions préparées avec ces concentrés, les rendant adaptés aux formulations nécessitant des textures stables et hydratées. Toutefois, le trempage entraîne une légère diminution des propriétés moussantes, possiblement due à la perte de composés moussants comme les saponines. Enfin, les prétraitements ont permis de réduire les teneurs en facteurs antinutritionnels, tels que les inhibiteurs de trypsine et les oligosaccharides, améliorant le potentiel nutritionnel des ingrédients.

Perspectives

Ces résultats ouvrent la voie à de nouvelles applications pour le pois d'Angole dans le développement d'ingrédients végétaux fonctionnels, en particulier pour des produits répondant aux demandes croissantes en protéines végétales.

© P. Pinel (UMR IATE, Montpellier)
- Pâtes équilibrées nutritionnellement à base de matières premières africaines « climate smart »

Des pâtes pour une alimentation saine et durable



En savoir plus

Pinel P. et al.

Nutritional optimization through linear programming of climate-smart and gluten free pasta

LWT . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115899>

Partenariat

- UMR MOISA, Montpellier

- UMR STLO, Rennes



Projets supports :

Projet Européen H2020 InnoFoodAfrica [2020-2024]: "Locally-driven co-development of plant-based value chains towards more sustainable african food system with healthier diets and export potential" (Coordination: VTT Helsinki Finlande)



Contacts

Valérie Micard et Claire Bourlieu-Lacanal

UMR IATE

valerie.micard@supagro.fr

claire.bourlieu-lacanal@inrae.fr



Contexte

La malnutrition très forte à l'échelle mondiale, qu'elle soit due à des carences, excès ou déséquilibres nutritionnels, ainsi que les pressions posées par le changement climatique sur les systèmes agricoles, rend nécessaire l'adoption urgente d'une consommation alimentaire adaptée aux besoins humains mais plus durable. Une approche consiste à optimiser la composition nutritionnelle d'aliments de grande consommation en utilisant des matières premières résilientes face au changement climatique. Ce projet s'inscrit dans le cadre du programme européen H2020 InnoFoodAfrica, qui visait à développer des cultures adaptées aux conditions climatiques extrêmes, et à les intégrer dans une alimentation saine et durable. L'objectif de notre étude était : i) de concevoir des pâtes alimentaires respectueuses de l'environnement, répondant aux besoins nutritionnels des adultes notamment des femmes, contenant des teneurs réduites en facteurs antinutritionnels et sans gluten pour limiter les intolérances ; ii) d'analyser l'impact de leur formulation originale réalisée par programmation linéaire sur la digestibilité in vitro des protéines et glucides.

Résultats

Partis de huit matières premières africaines, résilientes face au climat et riches en fibres, amarante (graine et feuille), teff, millet, fèvesoles, niébé, pois Bambara, patate douce,

quatre formules de pâtes alimentaires originales ont été développées par programmation linéaire. Ces pâtes contiennent du niébé en mélange ou non avec du teff et/ou des feuilles d'amarante. Elles permettent de couvrir l'ensemble des recommandations nutritionnelles de la FAO pour un repas en protéines, fibres, fer, zinc, vitamine B9 (et bêta-carotène pour celles aux feuilles d'amarante), tout en ayant une teneur minimum en facteurs antinutritionnels. Leurs propriétés culinaires sont satisfaisantes et ce, bien que leur teneur en fibres soit très élevée, les matières premières africaines étant peu raffinées. Leur composition nutritionnelle est bien supérieure et leur Indice Glycémique in vitro plus faible que celui d'une pâte classique au blé et ceci avec une qualité protéique deux fois supérieure.

Perspectives

Une analyse sensorielle des quatre formulations de pâtes à base de niébé et d'un témoin au blé a été réalisée fin 2024. Le peptidome et l'allergénicité potentielle de ces nouvelles formulations ont été évalués en collaboration avec l'UMR STLO et sont en cours de publication. L'introduction théorique des pâtes contenant du niébé et des feuilles d'amarante effectuée par l'UMR MOISA dans la diète des pays d'Afrique partenaires du projet (Afrique du Sud, Ouganda, Kenya) a démontré qu'elles amélioreraient la couverture des besoins nutritionnels des femmes et des enfants.



© AdobeStock - Anna

Booster la qualité nutritionnelle des céréales avec la germination



En savoir plus

Abdelbost L. *et al.*

Investigating sorghum protein solubility and in vitro digestibility during seed germination

Food Chemistry . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138084>

Partenariat

- Laboratory of Bioactives, Food and Nutrition Graduate Program, Federal University of State of Rio de Janeiro, UNIRIO, Brazil

- UMR AGAP (CIRAD-Montpellier)

Projets supports :

- Soutien financier du métaprogramme Glofoods et du département INRAE TRANSFORM

- ANS SoProDige



Contact

Hamza Mameri

UMR IATE

Hamza.Mameri@inrae.fr



Contexte

Le sorgho est la 5^e céréale la plus produite au monde. Elle est aujourd'hui cultivée sur les 5 continents, où elle est utilisée pour l'alimentation humaine et animale. Avec sa résilience face aux stress hydriques et thermiques, le sorgho pourrait devenir un élément essentiel de la sécurité alimentaire du globe. Le sorgho ne contient pas de gluten et est riche en nutriments (minéraux, polyphénols, etc). Cependant, les protéines de réserves du grain de sorgho, les kafirines, sont moins digestes que leurs homologues du blé et maïs. Les kafirines appartiennent à la superfamille des prolamines et forment des agrégats insolubles, une propension encore exacerbée après cuisson et par leur complexation avec les tanins. Pour d'autres espèces végétales, la germination a été proposée comme un processus biologique capable d'améliorer la digestibilité des protéines. Dans ce contexte, nous avons entrepris d'évaluer pour deux génotypes de sorgho, avec et sans tanins (T+ et T-) l'impact de la germination sur la solubilité et la digestibilité in vitro des kafirines.

Résultats

La germination a été rationalisée de manière à échantillonner des lots de graines à différents stades de germination, de l'état sec à l'émergence de la radicule.

A l'exception de la cystéine qui augmente de manière significative, la composition en acides aminés n'est que très modestement impactée par le processus de germination. L'analyse de la distribution en taille des kafirines révèle une légère diminution de leur réticulation sans changement notable de solubilité. A l'échelle microscopique, la germination entraîne l'apparition de tunnels dans les granules d'amidon et un relâchement de la matrice protéique. Ces modifications sont imputables à des protéases et des amylases nouvellement synthétisées, comme l'a révélé notre précédente étude (Abdelbost *et al.*, 2023). L'induction de ces enzymes coïncide avec la dégradation des kafirines. En conséquence, on observe une augmentation significative de la digestibilité des kafirines in vitro et ce même pour le génotype T+. Une meilleure bioaccessibilité des composés phénoliques est également obtenue après la germination.

Perspectives

La germination est un moyen d'amélioration, simple et peu coûteux de la valeur nutritionnelle du sorgho, même riche en tanins. Elle pourrait être déployée sur d'autres grains et graines aussi bien pour l'alimentation humaine qu'animale.

© Coline Schiell - Cartographie d'une coupe d'aliment mixte avec la partie végétale (lentille) à gauche et la partie animale (foie) à droite obtenue par fluorescence X. Fer en rouge ; phosphore en vert.

Un aliment mixte pour lutter contre l'anémie : le fer passé aux rayons X



En savoir plus

Schiell C. *et al.*

Iron distribution and speciation in a 3D-printed hybrid food using synchrotron X-ray fluorescence and X-ray absorption spectroscopies

Food Chemistry . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141058>

Partenariat

- Synchrotron SOLEIL, ligne LUCIA, Gif-sur-Yvette

- ADIV (<https://www.adiv.fr/>)

Contact

Thierry Astruc

UR QuaPA

thierry.astruc@inrae.fr



Contexte

La carence en fer est la principale cause d'anémie, qui touche environ 25 % de la population mondiale. Au-delà de la quantité de fer ingérée, la spéciation du fer, c'est-à-dire son état d'oxydation et sa liaison à d'autres éléments, joue un rôle déterminant dans son absorption par l'organisme. Dans les aliments, le fer le plus assimilable se trouve essentiellement dans les tissus animaux, en raison de sa forme peu sensible aux facteurs alimentaires. Néanmoins, dans le contexte de transition alimentaire actuel, les consommateurs se tournent davantage vers des produits végétaux qui peuvent contenir du fer, mais sous une forme moins assimilable. De récents travaux ont démontré que l'absorption du fer d'origine végétale pouvait être améliorée lorsque celui-ci était consommé avec des tissus animaux notamment des abats. Un aliment mixte multicouche à base de foie et de lentille a donc été conçu par impression 3D et conservé pendant 3 semaines sous atmosphère modifiée avec et sans oxygène. Pour évaluer l'effet du mode et de la durée de conservation sur le devenir du fer, une analyse cinétique de la distribution du fer et de sa forme a été conduite par analyse X sur la ligne LUCIA du synchrotron SOLEIL.

Résultats

Les analyses par fluorescence X synchrotron ont mis en évidence une concentration du fer dans les

amyloplastes des lentilles en présence d'oxygène ainsi que sa colocalisation avec le soufre et le phosphore. Ces données suggèrent que le fer pourrait interagir avec la ferritine, les phytates, ou encore les acides aminés soufrés, avec une possible conséquence sur son absorption. Les formes de fer propres aux matrices animales et végétales ont également pu être identifiées et différenciées. Enfin, les résultats montrent un changement de spéciation du fer végétal au cours de la conservation de l'aliment mixte vers une forme plus réduite proche du fer d'origine animale, ce qui pourrait expliquer sa meilleure assimilation par l'organisme.

Perspectives

Ces travaux illustrent l'impact du choix des ingrédients ainsi que des conditions de conservation sur les formes du fer dans un aliment et apportent de nouveaux éléments sur les mécanismes d'interaction entre le fer et les autres constituants, à prendre en compte lors de la conception d'aliments innovants riches en fer. Cette étude montre également l'intérêt des aliments mixtes, associant matières premières animales, notamment issues de coproduits, et matières premières végétales, comme moyen pour lutter contre les carences en fer.



© AdobeStock -
WavebreakMediaMicro

Le DIDGI au service de stratégies nutritionnelles pour limiter la dénutrition chez la personne âgée



En savoir plus

Duval A. *et al.*

Utilizing the influence of protein enrichment of meal components as a strategy to possibly prevent undernutrition in the elderly: an in vitro approach

Food & Function . 2024

<https://doi.org/10.1039/D3F003659F>

Partenariat

Projet support :

- Projet FUI AGINOV

Contact

Veronique Santé-Lhoutellier

UR QuaPA

veronique.sante-lhoutellier@inrae.fr



Contexte

Le défi à relever dans les années à venir est de faire en sorte que les personnes âgées puissent bien vieillir, rester en bonne santé et autonomes le plus longtemps possible afin d'accomplir au moins une partie ou la totalité des activités de la vie quotidienne et d'avoir une bonne qualité de vie en général. L'objectif de cette recherche est d'enrichir chaque composante d'un repas par une préparation gastronomique de haute qualité nutritionnelle et d'étudier son devenir digestif afin de mieux comprendre la cinétique de la disponibilité des micro et macronutriments et les interactions possibles. La supplémentation en protéines a été choisie en fonction de critères nutritionnels sensoriels et techno-fonctionnels rapportés par Duval et al 2021. L'objectif de l'étude est d'augmenter l'apport en protéines d'un repas complet grâce à un supplément introduit directement lors de la préparation de chaque plat, afin d'apporter un maximum de protéines facilement assimilables et de bonne qualité au cours d'un repas, avec une approche in vitro, jusque-là inédite.

Résultats

Comme attendu, le repas supplémenté a fourni plus de protéines que le repas témoin, mais la digestibilité des protéines était plus élevée, comme le montre la libération de peptides plus

importants et d'acides aminés libres. La diversification de la source des suppléments de protéines (animales, laitières et légumineuses) a favorisé un profil équilibré d'acides aminés essentiels pour chaque plat. De plus, il est à noter la forte augmentation de leucine libérée, comparable à la fourchette préconisée chez les personnes âgées pour favoriser l'anabolisme protéique. Ce résultat est tout à fait original, car il prend en compte la complexité du repas et les interactions impliquées dans le tube digestif, même avec une approche in vitro. Enfin, il souligne l'intérêt d'utiliser des formulations de plats pour répondre aux besoins nutritionnels des personnes âgées.

Perspectives

Ce travail a été complété par une étude clinique dans 10 maisons de retraite (EHPAD). Il est important de noter que ces menus enrichis ont aussi conduit à une prise alimentaire augmentée par les résidents. D'autres expériences à plus long terme pourraient être envisagées en évaluant d'autres effets bénéfiques de la leucine tels que l'amélioration des fonctions cognitives et la diminution des symptômes de dépression, améliorant ainsi la qualité de vie des personnes âgées.



© Mélanie Munch. UMR STLO- Pâtes et Pains confectionnés au fournil expérimental de l'UR BIA, dans le cadre d'une démonstration de la diversité des types de pains et de leurs caractéristiques.

Évaluation multicritère de la qualité du blé à partir de données sensorielles



En savoir plus

Munch M. *et al.*

Diagnosis based on sensory data:
Application to wheat grading quality
Innovative Food Science & Emerging
Technologies . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103771>

Partenariat

- ARVALIS - Institut du Végétal - Direction Recherche & Développement
- LIMAGRAIN Ingrédients - R&D sélection variétale
- AXIANE MEUNERIE - R & D
- UMR IATE Montpellier
- SPECTRALYS
- UMR SAYFOOD Paris-Saclay

Projet support :

ANR EVAGRAIN <https://anr.fr/Projet-ANR-20-CE21-0008>



Contacts

Mélanie Munch, Kamal Kansou et Cédric Baudrit

UMR STLO, UR BIA et UMR I2M

melanie.munch@inrae.fr

kamal.kansou@inrae.fr

cedric.baudrit@inrae.fr



Contexte

Avec 30-35 MT de grains de blé collectés chaque année, la France est un acteur majeur sur le marché international. La teneur en protéines est le critère majoritaire qui détermine la qualité et le prix. Mais s'appuyer sur un unique critère est devenu aujourd'hui insuffisant pour définir la qualité du blé. Il est nécessaire de trouver des solutions pour agréger un ensemble de critères sous la forme d'indicateurs simples de façon à faciliter l'aide à la décision pour tous les acteurs de la filière. Cela concerne en particulier l'essai de panification (NF V03-716), largement employé en France pour évaluer la qualité d'une farine de blé. Cet essai comprend l'évaluation sensorielle de 27 descripteurs de l'état de la pâte et du pain. Pourtant, la majorité des données de l'essai sont peu exploitées, puisque c'est une note globale, la valeur boulangère, qui est utilisée par l'ensemble de la filière. La difficulté principale pour agréger ces données est leur dépendance à l'évaluateur. Notre problématique était donc de développer une méthode d'agrégation des critères sensoriels qui prend en compte les pratiques de l'évaluateur. Nous avons bénéficié pour ce travail d'une base de données de plus de 10 000 essais de panification réalisés par l'institut Arvalis.

Résultats

Nous avons développé une méthode d'agrégation de données

sensorielles consistant à reconnaître des défauts de pâtes concomitants afin de les associer à la signature d'un profil de qualité. Les défauts sont regroupés en fonction de leur probabilité d'être observés ensemble, décrivant ainsi des schémas caractéristiques du comportement du produit. Ces regroupements vont aider les experts à identifier des profils qualité. Trois profils de qualité farine sont mis en évidence, le profil « sans défaut », le profil « relâchant » pour lequel le réseau de gluten de la pâte est lâche et le profil « résistant » dont le réseau de gluten est trop élastique. Ces deux derniers profils ont été déclinés en sept sous-profils qualité de façon à prendre en compte les niveaux d'intensité des défauts. Un logiciel a été développé pour permettre à n'importe quel utilisateur de la norme NF V03-716 de calculer le profil de la farine testée.

Notre analyse montre que la classification des blés selon les profils qualité est cohérente avec des mesures technologiques.

Perspectives

Pour limiter le recours systématique à l'essai de panification, énergivore et consommateur en matière, un modèle d'apprentissage automatique a été implémenté pour prédire des profils de farine à partir de mesures technologiques.

Le microbiote oral diffère chez des individus ayant des sensibilités gustatives différentes



En savoir plus

Licandro H. *et al.*

The bacterial species profiles of the lingual and salivary microbiota differ with basic tastes sensitivity in human

Scientific Reports . 2023

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-47636-1>

Partenariat

- MétaGénoPolis

Projets supports :

- ISITE-BFC TOM

- Carnot Qualiment MORGOM



Contacts

Éric Neyraud, Hélène Licandro et Hervé Blottière

UMR CSGA et UMR PAM

eric.neyraud@inrae.fr

helene.licandro@agrosupdijon.fr

herve.blottiere@inrae.fr



Contexte

La gustation joue un rôle clé dans la perception de l'aliment et par conséquent, elle influence les comportements alimentaires par l'évitement de substances potentiellement toxiques, qui ont souvent un goût amer, ou par l'attraction vers des aliments riches au goût sucré. La sensibilité gustative varie d'un individu à l'autre et cette variabilité est multifactorielle puisqu'elle inclue le polymorphisme génétique des récepteurs gustatifs mais aussi d'autres facteurs liés à l'environnement oral comme la composition de la salive. Néanmoins, l'ensemble des facteurs impliqués dans la variabilité de la sensibilité gustative ne sont pas connus et nous avons émis l'hypothèse de l'implication d'un nouveau candidat : le microbiote oral. Le microbiote oral est constitué de l'ensemble des microorganismes, et notamment des bactéries, qu'on retrouve dans la sphère orale et chaque individu compte environ 400 espèces bactériennes différentes mais dont la nature et les proportions varient d'un individu à l'autre.

L'objectif de cette étude était de déterminer si la variabilité dans la sensibilité aux 5 principales saveurs (sucré, salé, acide, amère, umami) était corrélée à la composition du microbiote oral et si certaines espèces bactériennes jouaient un rôle dans cette perception.

Résultats

Pour réaliser cette étude, la salive et le mucus recouvrant la langue ont été collectés sur 100 sujets pour lesquels les sensibilités aux 5 saveurs ont également été déterminées. La composition du microbiote oral a été déterminée par métagénomique shotgun ce qui a permis de déterminer des profils bactériens au niveau de l'espèce. En particulier, l'étude a montré que 109 espèces étaient corrélées avec au moins un goût. Lorsqu'une espèce était corrélée à au moins 2 goûts différents, les corrélations allaient dans la même direction. Plusieurs espèces de *Streptococcus*, SR1 et *Rickenellaceae* étaient corrélées aux 5 goûts. La comparaison entre écosystèmes a montré que le microbiote salivaire était un meilleur prédicteur de la sensibilité gustative que celui du mucus recouvrant la langue.

Perspectives

Ces résultats montrent que le microbiote oral est corrélé à la sensibilité gustative ce qui révèle un nouveau rôle des bactéries qui nous composent aux côtés du microbiote intestinal. Néanmoins, les mécanismes de son implication dans la gustation restent à déterminer via l'exploration des fonctions biologiques de ces espèces. Ces travaux ouvrent également de nombreuses perspectives sur les effets de la modulation de ce microbiote oral sur le comportement alimentaire.



© AdobeStock - dmnkandsk

La consommation d'aliments fermentés modifie le microbiote oral



En savoir plus

Ibarlucea-Jerez M. *et al.*

Fermented food consumption modulates the oral microbiota

npj Science of Food . 2024

<https://doi.org/10.1038/s41538-024-00298-3>

Partenariat

- Institut MICALIS,
- PFEMcp INRAE QuaPA

Projets supports :

- Métaprogramme INRAE Holoflux MOMIE
- ISITE-BFC TOM
- Carnot Qualiment MORGOM



Contacts

Éric Neyraud, Hélène Licandro et Philippe Gérard

UMR CSGA, UMR PAM et UMR MICALIS

eric.neyraud@inrae.fr

helene.licandro@agrosupdijon.fr

philippe.gerard@inrae.fr



Contexte

Les aliments fermentés sont produits par l'action de ferments (bactéries ou levures) permettant la transformation de la matière première et apportant des propriétés de conservation, organoleptiques ou encore nutritives. En conséquence, ils sont une source importante de consommation de microorganismes vivants. Un faisceau d'indices montre que leur consommation régulière, en particulier ceux qui contiennent des bactéries lactiques (BL), est associée à la préservation de l'équilibre microbiologique intestinal contribuant ainsi au maintien de la santé humaine. Si l'effet de la consommation des aliments fermentés est largement étudié au niveau intestinal, l'effet de leur consommation au niveau oral n'est pas connu. Pourtant, la consommation d'une portion de fromage ou de yaourt conduit à ingérer 10^{10} BL vivantes, soit autant que le microbiote oral, c'est-à-dire l'ensemble des bactéries présentes en permanence dans la cavité orale. L'ingestion régulière et massive des BL présentes dans les aliments fermentés pourrait donc moduler le microbiote oral de l'hôte.

L'objectif de cette étude était de déterminer si la consommation régulière d'un aliment fermenté entraînait une persistance en bouche des BL et une modulation du microbiote oral.

Résultats

Pour réaliser cette étude, un fromage modèle contenant des BL

vivantes ou mortes a été donné pendant 3 semaines à des rats pour lesquels la salive a été collectée avant et après le régime, et également 2 semaines après l'arrêt de celui-ci. L'analyse du microbiote oral (séquençage de l'ARNr 16S) a montré que la composition de ce dernier différait entre les animaux ayant consommé les fromages contenant les BL vivantes ou mortes et ceux qui avaient poursuivi un régime sans fromage. Deux semaines après l'arrêt du régime, les animaux ayant consommé du fromage avec les BL vivantes présentaient encore un microbiote différent. Les résultats ont également montré que les BL persistaient dans la cavité orale des animaux ayant consommé le fromage contenant les BL vivantes. Une analyse du protéome (ensemble des protéines) salivaire a permis de montrer qu'une moindre persistance orale des BL étaient associée à une salive contenant plus de protéines impliquées dans la réponse à un stress oxydant.

Perspectives

Ces résultats montrent que la consommation d'aliments fermentés peut entraîner des modifications du microbiote oral chez le rat. Ils doivent désormais être confirmés chez l'humain afin de déterminer l'impact des habitudes alimentaires (régimes pro ou anti-oxydant) dans ces modifications physiologiques et en particulier sur la perception sensorielle.



© AdobeStock - Dusan Zidar

Quand les phénols et la salive révèlent les arômes de l'huile d'olive vierge



En savoir plus

Díaz-Montaña E. *et al.*

Phenols and saliva effect on virgin olive oil aroma release: A chemical and sensory approach

Food Chemistry . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137855>

Partenariat

- Plateforme ChemoSens

ChemoSens

- Department of Analytical Chemistry,
Faculty of Pharmacy, University of Seville,
Spain

Projets supports :

- Programme Erasmus+



Contact

Thierry Thomas-Danguin

UMR CSGA

thierry.thomas-danguin@inrae.fr



Contexte

La perception sensorielle des huiles d'olive vierges est cruciale pour évaluer leur qualité et leur acceptabilité par les consommateurs. Les composés volatils, responsables de la perception de l'arôme des huiles d'olive, interagissent avec les composés non-volatils présents naturellement dans l'huile tels que les phénols, mais ces interactions sont totalement bouleversées lors du passage de l'huile en bouche lors de la consommation. En effet, en bouche, la salive va interagir avec les composés volatils mais aussi les composés non-volatils, influençant ainsi la libération des arômes et la perception sensorielle des huiles. Comprendre ces mécanismes est essentiel pour améliorer l'expérience sensorielle et optimiser les processus de production, en particulier dans le cadre des pratiques alimentaires et des préférences de consommation en constante évolution.

Résultats

Les résultats de cette étude ont montré que les phénols non volatils présents naturellement dans l'huile d'olive vierge, en présence de salive, modulent la libération des composés d'arôme en fonction de leurs caractéristiques chimiques. Ainsi, les molécules volatiles présentant une ou plusieurs insaturations sont plus libérées dans l'espace de tête que les molécules saturées. Cette étude révèle ainsi que des facteurs physiologiques, comme la salive, jouent

un rôle essentiel dans la perception sensorielle de l'huile d'olive vierge. En effet, la salive modifie l'équilibre air-aliment, probablement via des interactions hydrophobes, ce qui favorise la libération des composés volatils responsables de l'arôme selon leur nature chimique. De plus, la combinaison de la salive et des phénols non volatils présents dans l'huile d'olive entraîne un effet "salting out", augmentant la concentration de volatils dans l'espace de tête. Les phénols apparaissent donc comme des acteurs clés dans la libération et la perception des arômes, mais leur action est largement modulée par l'action de la salive en bouche lors de la dégustation.

Perspectives

Pour approfondir ce travail, plusieurs perspectives peuvent être envisagées. Tout d'abord, l'exploration des interactions entre les phénols et d'autres composés bioactifs présents dans les huiles d'olive pourrait offrir une compréhension plus fine de la libération d'arômes. De plus, étudier l'impact de différentes compositions salivaires, liées à des facteurs physiologiques ou pathologiques, permettrait de mieux cerner les variations individuelles dans la perception sensorielle. Enfin, il serait intéressant d'étendre ces recherches à d'autres matrices alimentaires, notamment riches en phénols, pour évaluer la généralisation des résultats obtenus dans le cadre de l'huile d'olive vierge.



© Nicolas Sommerer - Piura (Pérou),
préparation du « cut test » de contrôle de
la qualité de la texture et de la couleur
interne des fèves de cacao marchandes,
avant expédition vers l'Europe

L'obscur clarté du chocolat noir : les polyphénols discriminant la couleur pré-existante dans la fève de cacao



En savoir plus

Dias A.L.S. *et al.*

Cocoa bean metabolomics reveals polyphenols as potential markers relating to fine dark chocolate color shades

Frontiers in Nutrition - Nutrition and Food Science Technology . 2024

<https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1467282>

Partenariat

- Valrhona S.A., Tain l'Hermitage

- PROBE

- CALiS

- PFP (plateforme d'analyse des Polyphénols)

 PFP Plateforme
d'analyse
des polyphénols

Projets supports :

- PRRI PhénoVal (FEDER, Region Occitanie Pyrénées-Méditerranée, Valrhona)

Contact

Nicolas Sommerer

UMR SPO

nicolas.sommerer@inrae.fr



Contexte

Le marché du chocolat noir haut de gamme est en développement, malgré l'augmentation et la volatilité du prix de la fève de cacao. Certains chocolats de dégustation sont très clairs et d'autres sont très sombres, alors qu'ils contiennent le même pourcentage de cacao (70 %) et qu'ils ont été fabriqués avec la même recette. Ces nuances de couleurs sont cependant recherchées par les amateurs. La couleur des chocolats de dégustation est un facteur de différenciation avec des couleurs non conventionnelles : chocolat « ruby », chocolats très foncés ou a contrario très clairs. Pour remonter dans la compréhension de la formation de la couleur des chocolats, une analyse des fèves de cacao marchandes (fèves fermentées et séchées) a été réalisée.

Résultats

Les analyses des fèves de cacao par spectrométrie de masse à haute résolution (HRMS) ont été comparées par un traitement statistique uni- et multivarié. L'identification des composés discriminant la couleur des chocolats clairs ou foncés a été facilitée par la construction de réseaux de similarité spectrale et la comparaison avec notre banque de données spectrales de polyphénols.

Les résultats indiquent que la différence de couleur entre les chocolats préexiste dans les fèves, qui sont elles-mêmes plus claires ou plus foncées, et que les composés discriminant détectés dans les chocolats

sont aussi, pour la plupart d'entre eux, détectés et discriminants dans les fèves de cacao fermentées et séchées.

Comme dans les chocolats, les composés des fèves claires semblent plus préservés des phénomènes d'oxydation (pas de glycosylation) ou de dégradation (composés de plus haut poids moléculaire).

Ces résultats mettent en évidence que les composés des deux types de fèves sont aussi préservés lors de la transformation en chocolat malgré les étapes potentiellement oxydantes avec des apports d'énergie thermique (torréfaction des fèves, conchage...), et que leur présence est due à une étape antérieure du procédé ou provient du métabolisme ou de la génétique du cacaoyer.

Perspectives

Trois axes complémentaires se dessinent :

- i) augmenter la finesse de caractérisation de ces marqueurs, polyphénols évolués complexes, pour mieux identifier les déterminants de formation de la qualité du produit fini,
- ii) remonter plus en amont dans le procédé de fabrication en étudiant l'impact des conditions de fermentation des fèves fraîches sur la formation des déterminants de la couleur,
- iii) caractériser un lien avec les données génétiques et les effets géographiques (terroirs) connus pour les cacaoyers ayant produit ces fèves.



© AdobeStock
Alexander Raths

Impact des conditions de transport aérien des fruits tropicaux sur la température et la qualité



En savoir plus

Chaomuang N. *et al.*

Experimental study of air cargo temperature variations and its impact on mango quality

International Journal of Refrigeration . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.02.009>

Contacts

Onrawee Laguerre, Steven Duret, Fatou-Toutie Ndoye

UR FRISE

onrawee.laguerre@inrae.fr

steven.duret@inrae.fr

fatou-toutie.ndoye@inrae.fr



Contexte

La demande en fruits et légumes frais est en constante augmentation et concerne de plus en plus de produits tropicaux. Cependant, certains fruits et légumes se dégradent très vite et sont très sensibles à la température et l'humidité. Ainsi, le transport aérien de produits tropicaux est nécessaire pour garantir la qualité des produits à destination. Néanmoins, selon l'Association de transport aérien international, 20 % de produits périssables sont endommagés lors d'un circuit logistique aérien. A ce jour, il n'existe pas de connaissances sur l'évolution de température, d'humidité relative et de la qualité du produit dans un conteneur aérien. Ainsi, cette étude permet de suivre dans des conditions logistiques réelles les températures et humidité du chargement et leur influence sur la qualité du produit. Ce travail s'inscrit dans le cadre du LIA REWACT INRAE entre Frise et KMITL (Bangkok, Thaïlande).

Résultats

La chaîne logistique aérienne des mangues suit les étapes suivantes : Après la récolte les mangues sont immergées quelques minutes dans l'eau chaude à 65 °C, conditionnées, transportées en camion réfrigéré à l'aéroport de Bangkok, chargées dans un conteneur, stockées sur le tarmac, chargées dans l'avion en direction de la France et finalement livrées à INRAE Frise. Au cours de ces étapes,

les températures des mangues ont varié de 16.6 °C à 30.5 °C. Pendant 12 heures du vol direct, il y avait peu de fluctuations de température de mangues en haut du conteneur avec une température moyenne variant de 25 °C à 28 °C, alors que celle du bas diminuait progressivement de 26.1 °C à 18.1 °C. La durée de vol a peu d'impact sur la qualité du produit par rapport à la température et la durée de conservation après l'arrivée à la destination. En effet, la durée de vie de produit pouvait atteindre 12 jours à 16 °C, alors elle était de moins de 9 jours à 21 °C. Une relation linéaire entre la perte de poids et la note de flétrissement a été observée. En se basant sur une valeur seuil de perte de poids de 10 %, des modèles de prédiction de la perte de poids en fonction des conditions temps-température dans un circuit logistique a permis d'estimer la durée de vie de produit avec une bonne précision (RMSE < 1.8 % mass loss).

Perspectives

Un Data Paper est en cours pour présenter les données de température et d'humidité relative au cours du circuit logistique aérien. Ces données en Open Access seront utilisées pour valider des modèles de transfert de chaleur et de matière pour tenir compte de l'évaporation et de la condensation qui ont lieu quand le conteneur est exposé à des fluctuations de la température externe.

Partie 7

Impact environmental **et valorisation**



Au-delà des analyses de cycle de vie, nous estimons et prenons en compte les impacts environnementaux. Cela est illustré ici pour concevoir un circuit de consigne bouteilles ou répartir les impacts entre coproduits des processus industriels alimentaires.

Nous étudions la dégradation de micropolluants, le plastique et les antibiotiques, par des enzymes ciblées, notamment des enzymes fongiques. La valorisation des déchets n'est pas en reste : les digestats issus de digestion anaérobie utilisés sans risque biologique comme engrais biologique, les déchets industriels de tomate pour des matériaux à haute valeur ajoutée, la résine des pins maritimes autrefois plantés pour leur bois.



© Nadine Leconte (photo principale) - Eric Beaumont (insert) - Installation de séparation membranaire du lait (bandeau) et ses produits : perméat et rétentat (insert)

Répartir les impacts environnementaux entre coproduits : enjeux d'un consensus méthodologique



En savoir plus

Guyomarc'h F. *et al.*

Life cycle assessment to quantify the environmental performance of multi-products food processing systems such as milk fractionation: Importance of subdivision and allocation

Journal of Food Engineering . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112147>

Partenariat



Contacts

Geneviève Gésan-Guiziou, Fanny Guyomarc'h et Caroline Pénicaud

UMR STLO et UMR SayFood

genevieve.gesan-guiziou@inrae.fr

fanny.guyomarc-h@inrae.fr

caroline.penicaud@inrae.fr



Contexte

La production alimentaire est actuellement responsable d'environ 30 % des émissions de gaz à effet de serre (GES), de 70 % des prélèvements d'eau douce et de 40 % de l'occupation des sols. Dans ce système, la transformation consomme de grandes quantités d'énergie et d'eau, qui sont toutes deux des ressources critiques. Cependant, elle permet d'éviter l'altération et le gaspillage des aliments grâce à la stabilisation des produits et la valorisation des coproduits. Enfin, elle est l'étape où l'impact environnemental de la denrée agricole, telle que le lait, sera partagé entre les coproduits, tels que la crème, le fromage, le lactose et les protéines du lactosérum. Un consensus méthodologique sur les choix de répartition des impacts environnementaux entre coproduits est donc un enjeu majeur pour la mise en œuvre de l'analyse du cycle de vie sur des systèmes alimentaires complexes, souvent inscrits dans des filières interconnectées.

Résultats

L'analyse du cycle de vie d'un système industriel de transformation du lait en 5 coproduits, a été réalisée en appliquant ou non une subdivision du système, puis en éprouvant la sensibilité du résultat à différents choix méthodologiques (allocations, agrégations). Une connaissance fine des itinéraires technologiques impliqués permet d'attribuer les impacts environnementaux de chaque

opération unitaire aux seuls coproduits qui en sont issus, au contraire d'une analyse en « boîte noire » qui distribue les impacts de toutes les opérations à tous les coproduits. L'efficacité du travail d'inventaire du cycle de vie doit donc préférentiellement miser sur la mobilisation des sciences de l'ingénieur et sur une ouverture des données plutôt que sur une simplification excessive du système évalué. En faisant varier les choix d'allocation ou d'agrégation, on constate que l'impact environnemental estimé de chaque coproduit peut varier, mais que certaines opérations ou intrants ont systématiquement un poids important dans cet impact. Cette analyse comparative permet donc de les repérer et d'y investir prioritairement les efforts de réduction des impacts environnementaux des procédés.

Perspectives

L'étude contribue à la réflexion actuelle visant un consensus sur des règles méthodologiques d'application de l'analyse du cycle de vie à des produits alimentaires transformés. La mise à disposition de l'étude et des données d'inventaire par le biais d'un datapaper et de Recherche Data Gouv permettront également aux praticiens de trouver des données représentatives de l'industrie laitière. Enfin, l'étude confirme l'efficacité énergétique, la substitution des énergies fossiles et la dépollution des eaux de nettoyage comme des priorités pour l'industrie laitière.



SEAMPL – un logiciel d'évaluation des impacts environnementaux pour la conception de systèmes de réemploi des emballages



En savoir plus

Le Féon S. *et al.*

Life cycle assessment based optimization of scenarios of reusable glass bottles using context-specific key parameters

Cleaner Environmental Systems . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100225>

Partenariat

- Plateforme MEANS

Projet support :

Projet Européen H2020 FAIRCHAIN

(<https://www.fairchain-h2020.eu/>)

Ce projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation H2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention 101000723.



Contacts

Geneviève Gésan-Guiziou, Caroline Malnoë et Caroline Pénicaud

UMR STLO, UMR SAS et UMR SayFood

genevieve.gesan-guiziou@inrae.fr

caroline.malnoe@inrae.fr

caroline.penicaud@inrae.fr



Contexte

L'analyse du cycle de vie (ACV) est jugée, selon les acteurs socio-économiques, coûteuse, chronophage, méthodologiquement complexe et ses résultats sont parfois difficiles à interpréter. Par conséquent, elle est rarement utilisée pour aider à la conception d'une innovation (en phase exploratoire) et parfois seulement en fin de projet, pour évaluer les impacts de l'innovation, avec une marge réduite pour l'influencer. En outre, les acteurs vont privilégier des données environnementales génériques dans leur communication, malgré une possible variabilité inter-systèmes. Un cas d'étude du projet FAIRCHAIN visait à développer une boisson fermentée intégrant du lactosérum peu ou pas valorisé jusqu'alors et à la distribuer en bouteilles réemployées. Afin d'intégrer dans les propositions de scénarios de réemploi, le logiciel d'ACV simplifiée SEAMPL a été développé.

Résultats

SEAMPL se base sur le principe des modèles ACV simplifiés paramétrés visant à réduire les données à mobiliser par les acteurs, par analyse globale de la variance (indices de Sobol). Le nombre d'inconnues des équations d'impacts environnementaux est réduit, en ne conservant que celles contribuant significativement à la variance des résultats. Ainsi, l'utilisateur peut

aisément et rapidement tester différents scénarios, en préservant la robustesse des résultats. Dans le cas de SEAMPL, ce nombre d'inconnues est réduit de 90 à moins de 10. Afin de proposer un domaine d'applicabilité large à l'outil, des modèles simplifiés paramétrés ont été développés pour de multiples archétypes d'une typologie de systèmes de réemploi construite avec les acteurs. Les acteurs impliqués dans FAIRCHAIN, ainsi que des acteurs de la région Bretagne ont été interviewés. Enfin, un outil en ligne a été développé par les ingénieurs de la plateforme INRAE-CIRAD MEANS, permettant à l'utilisateur de (1) se repérer dans la typologie en répondant à des questions simples (par exemple : le lavage est-il internalisé ou externalisé ?), (2) compléter le jeu restreint de données correspondant et (3) calculer et visualiser les résultats ACV d'un ou plusieurs scénarios.

Perspectives

Le logiciel a été testé avec les acteurs du projet FAIRCHAIN et pourrait être prochainement mobilisé pour aider au développement d'une filière territoriale réemploi en région Bourgogne-Franche-Comté. Les pistes de développement futures visent à (1) étendre le domaine d'applicabilité (types d'emballages, pays), (2) étendre aux aspects économique et social et (3) aider à la lecture et l'exploitation des résultats ACV produits.



Biodégradation contrôlée du PLA par incorporation d'une enzyme optimisée



En savoir plus

Guicherd M. *et al.*

An engineered enzyme embedded into PLA to make self-biodegradable plastic
Nature . 2024

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07709-1>

Valorisation

Brevets protégeant ce travail :

WO 2016/062695 ; WO 2016/198652 ;
WO 2018/109183 ; WO 2019/043145 ;
WO 2019/043134 ; WO 2019/122308 ;
WO 2021/148666

Partenariat

- Carbios, Société française de bioplasturgie

Projets supports :

Projet THANAPLAST, OSEO ISI Contract number I 1206040W



Contacts

Alain Marty et Isabelle André

Carbios et UMR TBI

alain.marty@carbios.com

isabelle.andre@insa-toulouse.fr



Contexte

Le polyactide (PLA) est un des bioplastiques les plus utilisés dans le monde, représentant environ 21 % (460 kt) du marché des bioplastiques en 2022, et devant atteindre 38 % d'ici 2027. L'avantage du PLA est de pouvoir être produit à partir de matières végétales. Néanmoins, bien que biosourcé, le PLA demeure peu biodégradable à température ambiante et nécessite les conditions particulières du compostage industriel pour être dégradé. Cette faiblesse demeure un frein à l'utilisation du PLA qui demeure un des plastiques les plus prisés dans l'emballage alimentaire et les plastiques à usage unique.

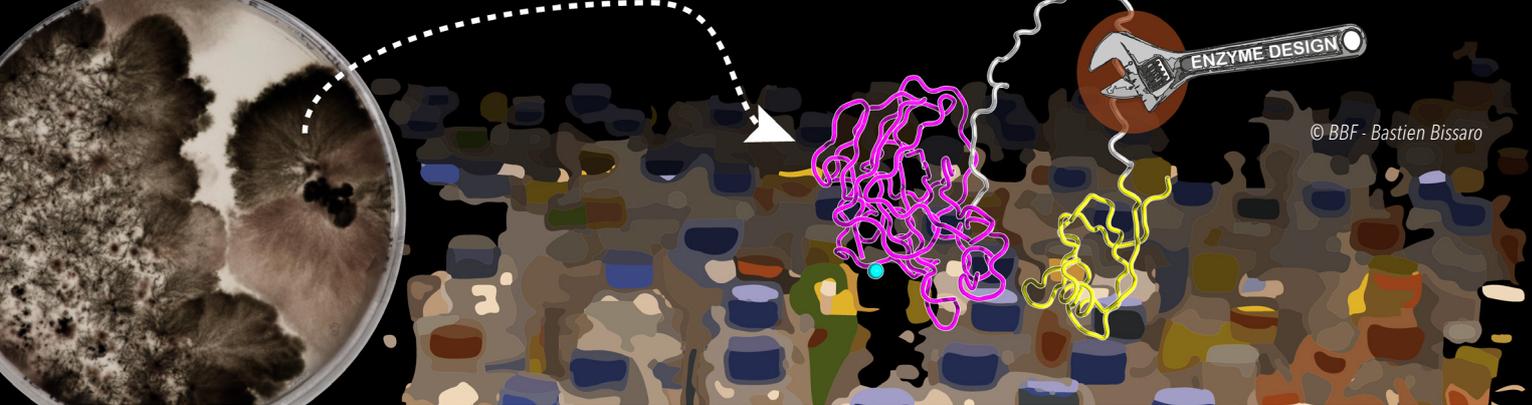
Résultats

Les recherches ont permis de rendre biodégradable le PLA par l'incorporation d'une enzyme optimisée (une PLA-dépolymérase), directement dans le polymère lors du procédé d'extrusion à très haute température (170 °C). Le développement de cette enzyme s'est appuyé sur des stratégies d'ingénierie pour améliorer les performances de l'enzyme en termes d'activité et de thermostabilité, et permettre la dépolymérisation par voie biologique des matériaux plastiques à base de PLA et ce, dans une large gamme de températures et de pH reflétant notamment les variations naturelles que l'on peut retrouver durant le cycle de vie d'un compost domestique. Cette étude décrit aussi les méthodologies et défis rencontrés afin d'obtenir une incorporation

homogène de l'enzyme au sein de films en PLA à haute température tout en conservant suffisamment d'activité afin de permettre au plastique produit de se dégrader complètement et rapidement dans des conditions de compostage domestique, compostage industriel mais aussi dans le cadre de digestion anaérobie (méthanisation). L'article met l'emphase sur le processus d'optimisation utilisé jusqu'à l'obtention d'une enzyme capable de résister aux 170 °C nécessaires pour l'introduire à l'état fondu dans le PLA par extrusion. Il est montré que le nouveau matériau enzymé se désintègre et se biodégrade à un rythme beaucoup plus rapide que les 26 semaines exigées pour l'obtention d'une certification à son utilisation dans le cadre de compostage domestique et qu'il contribue également à produire davantage de biométhane. Il a aussi été vérifié que le matériau enzymé restait intact lors d'un stockage à long terme et que sa dégradation ne sera activée que lors de son transfert dans des conditions de compostage ou de méthanisation, garantissant ainsi sa compatibilité avec des applications commerciales à base de PLA comme par exemple, les emballages souples ou les articles à courte durée de vie tels que les contenants alimentaires.

Perspectives

Cette étude présente une solution innovante au défi de la gestion des déchets plastiques, contribuant ainsi au développement de plastiques plus durables et d'économies circulaires basées sur le carbone renouvelable.



Reprogrammer des enzymes de champignons dégradant le bois pour le bio-recyclage du plastique



En savoir plus

Munzone A. *et al.*

Design of plastic binding lytic polysaccharide monoxygenases via modular engineering

ACS Chem&Bio Engineering . 2024

<https://doi.org/10.1021/cbe.4c00125>

Partenariat

- Université Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, Laboratoire de Chimie des Polymères Organiques

- INRAE, Aix Marseille University, 3PE platform

- Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, Institut de Recherche Dupuy de Lôme

- INRAE, UR1268 BIA Biopolymères Interactions Assemblages

Projet support :

Projet EVOFUN financé par le Post-AgreenSkills Fund (INRAE)



Contact

Bastien Bissaro

UMR BBF

bastien.bissaro@inrae.fr



Contexte

La pollution plastique est omniprésente dans l'environnement et la gestion des déchets plastiques est un problème à l'échelle mondiale. Outre le développement de modes de production et d'utilisation plus raisonnés, une des solutions à ce problème est de développer des voies de bio-recyclage. C'est un défi scientifique d'envergure car les plastiques sont constitués de polymères très récalcitrants à la dégradation, ils ont été fabriqués pour cela. Cette caractéristique les rapproche d'autres polymères récalcitrants naturels, comme la cellulose du bois, qui eux peuvent être dégradés par les champignons filamenteux. Leur secret est de sécréter tout un arsenal d'enzymes, des protéines spécifiques pour faciliter des réactions chimiques, et notamment des LPMO (« lytic polysaccharide monoxygenases ») qui peuvent dégrader la surface de la cellulose, la fragilisant pour faciliter ensuite sa dégradation par d'autres enzymes. Ces propriétés en font des candidates idéales pour les faire évoluer vers de nouvelles fonctions, à savoir la dégradation des plastiques.

Résultats

Les enzymes LPMO sont en général constituées de 2 modules : un module de liaison qui permet à l'enzyme de reconnaître et de s'arrimer à un polymère spécifique, par exemple à

la cellulose, et un module catalytique qui dégrade sa surface par oxydation. Nous nous sommes concentrés sur le module de liaison pour le remplacer par d'autres modules pour conférer aux enzymes la propriété de se lier à différents plastiques en utilisant une approche de design moléculaire. Des LPMO chimères capables de reconnaître et de se lier à différents types de plastiques ont été créées. Par ailleurs, la capacité de ces LPMO chimères à agir à la surface des plastiques a été évaluée en utilisant une approche multidisciplinaire combinant chromatographie, tests enzymatiques et microscopie électronique à transmission. Les résultats ont montré que certaines d'entre elles étaient également capables de faire des trous à la surface d'un plastique biosourcé, le PHA.

Perspectives

Dans la suite de ces travaux, nous allons évaluer la capacité de dégradation de ces enzymes-chimères sur différents types de plastiques afin de sélectionner les plus performantes et les associer à d'autres enzymes dans des cocktails enzymatiques pour dégrader les plastiques. Notre objectif est de contribuer à l'effort collectif international de création d'une boîte à outils enzymatique la plus complète possible pour le bio-recyclage des plastiques.

© BBF - Bastien Bissaro



© Patrice Tanchaud-
Porostereum spadiceum

Dégradation des antibiotiques par les champignons et leurs enzymes



En savoir plus

Ben Ayed A. *et al.*

Genome sequencing of *Porostereum spadiceum* to study the degradation of levofloxacin

Ecotoxicology and Environmental Safety . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115808>

Partenariat

- Laboratoire de Biochimie et de Génie Enzymatique des Lipases, Sfax, Tunisia

- UMR 7263, Station Marine d'Endoume, Marseille

- US Department of Energy Joint Genome Institute, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA

- Département Médicaments et Technologies pour la Santé, Bagnols-sur-Cèze

- Centre de Biotechnologie de Sfax, Laboratoire des Bioprocédés Environnementaux, Tunisia

- UMR1136, Interactions Arbres/Microorganismes, Champenoux

Projets supports :

PHC-Utique FUNZYBio, PHC-Maghreb AntiBioPol, PRIMA Europe FunZyBio



Contacts

Éric Record et Giuliano Sciarra

UMR BBF

eric.record@inrae.fr / giuliano.sciara@inrae.fr



Contexte

L'utilisation massive d'antibiotiques a entraîné des niveaux dangereux de pollution des eaux souterraines et des sols, provoquant des changements significatifs dans les écosystèmes aquatiques, et créant des conditions favorables à la prolifération de pathogènes résistants aux antibiotiques. Ces polluants représentent donc une menace, à la fois pour l'environnement et pour la santé animale et humaine.

Afin de lutter contre cette pollution, nous avons étudié depuis 2020 la dégradation de ces molécules par les champignons et leurs enzymes. Ces études sont basées sur une collaboration étroite avec l'École des Ingénieurs de Sfax avec qui un Laboratoire International Associé (LIA BioDeg) portant sur cette thématique a été mis en place et a démarré en janvier 2025.

Résultats

Des champignons tunisiens ainsi que des champignons de la collection du CIRM-CF (<https://www.cirm-fungi.fr/>) pour la dégradation d'antibiotiques de la famille des fluoroquinolones ont été criblés. Deux champignons s'avèrent être particulièrement efficaces, *Porostereum spadiceum* et *Bjerkandera adusta*. Le génome de *P. spadiceum* a été séquencé dans le cadre de ce programme de recherche en collaboration avec le Joint Genome Institute. Pour ces deux champignons, une étude de protéomique et une

analyse en spectrométrie de masse ont été effectuées afin d'identifier les enzymes potentiellement impliquées dans la biotransformation de ces antibiotiques, ainsi que les produits de dégradation. Pour la lévofloxacin par exemple, c'est le cycle pipérazine qui est attaqué par les enzymes fongiques. La biotransformation de diverses fluoroquinolones par les champignons et leurs enzymes a également été étudiée. Les différents mécanismes complémentaires aux enzymes comme la bioadsorption des antibiotiques à la paroi fongique ont été identifiés et également un système enzymatique intracellulaire faisant intervenir des complexes cytochrome P450.

Perspectives

Les prochaines étapes consisteront à conduire une biotransformation des antibiotiques en testant les enzymes seules ou en synergie sur des temps plus courts (10 min contre quelques jours avec les champignons), et de tester les champignons ou leurs enzymes en conditions réelles sur des eaux usées ou des résidus d'élevage.

Sur la base de ce LIA BioDeg, nous avons élargi nos collaborations au niveau du pourtour méditerranéen avec des projets pluripartenaires (PHC-Maghreb AntiBioPol et projet européen PRIMA FUNZYBio) regroupant les universités de Aix-Marseille, de Sfax (Tunisie), de Marrakech, de Ben Guérir et de Kénitra (Maroc), de Milan et de la Sapienza de Rome (Italie) et le CETIM en Espagne.



Une méta-analyse des données de réduction de pathogènes lors de la digestion anaérobie



En savoir plus

Álvarez-Fraga L. *et al.*

A meta-analysis of pathogen reduction data in anaerobic digestion

Renewable and Sustainable Energy Reviews . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114982>

Partenariat

- SUEZ, CIRSEE, Le Pecq, France

Projet support :

Biogaz RIO (FEDER - Région Occitanie)



Contacts

Gabriel Capson Tojo, Diana García-Bernet et Renaud Escudé

UR LBE

gabriel.capson-tojo@inrae.fr

diana.garcia-bernet@inrae.fr

renaud.escudie@inrae.fr



Contexte

La digestion anaérobie (DA) est une technologie largement appliquée pour le traitement simultané des déchets et la production d'énergie (biogaz). L'importance de la valorisation du produit non gazeux (c'est-à-dire, le digestat) a été de plus en plus reconnue au cours de la dernière décennie. L'application du digestat en agronomie offre un grand potentiel pour la récupération d'éléments clés tels que l'azote, le phosphore, le potassium ou le carbone. Cependant, cette pratique présente également des risques, notamment la propagation potentielle de pathogènes dans l'environnement. Cette étude visait à évaluer la capacité de réduction des pathogènes de la DA et à éclairer les conditions entraînant la réduction maximale des pathogènes.

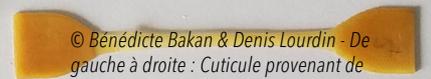
Résultats

Les résultats indiquent que l'ajout artificiel de pathogènes conduit à une surestimation de leur élimination, et que les indicateurs actuels des pathogènes représentent avec précision leurs groupes microbiens respectifs. Bien que la DA montre généralement une tendance claire à réduire les pathogènes, son efficacité varie considérablement en fonction du type de micro-organisme. Les bactéries à Gram négatif montrent les réductions les plus importantes, tandis que les Clostridiaceae sont largement insensibles à la DA et peuvent même se

développer sous certaines conditions. En ce qui concerne les paramètres opérationnels, la température est le facteur qui influence le plus la réduction des pathogènes, la DA thermophile entraînant une réduction accrue des pathogènes par rapport aux conditions psychrophiles et mésophiles. Le pH a également influencé l'élimination des pathogènes, avec des valeurs acides et basiques favorisant la réduction des pathogènes. Une durée de batch optimale a été identifiée, mais le temps de rétention hydraulique dans les systèmes continus n'a pas amélioré la réduction globale des pathogènes. Les post-traitements thermiques couplés à la DA thermophile ont abouti aux meilleures performances de réduction des pathogènes, répondant à la plupart des limites législatives.

Perspectives

Cette étude apporte des conclusions nouvelles et pertinentes pour la DA à l'échelle du laboratoire et de l'industrie, ouvrant plusieurs perspectives de R&D. Différents projets au LBE se concentrent sur l'évaluation de la qualité du digestat, en tenant compte également des résultats de cette étude sur la réduction des pathogènes. Un projet récent étend cette ligne de recherche en examinant également la réduction et les risques de dissémination des gènes de résistance aux antibiotiques et de virulence dans les pratiques de récupération des ressources, y compris l'application de digestat en agronomie.



© Bénédicte Bakan & Denis Lourdin - De gauche à droite : Cuticule provenant de drêches industrielles (tomates), monomères extraits et purifiés, matériaux polyesters.

Des matériaux à haute valeur ajoutée à partir de déchets industriels de la transformation de la tomate



En savoir plus

Marc M. *et al.*

From Tomato Pomaces Biorefinery to Biobased Shape-Memory Semicrystalline Polyester Networks

ACS Sustainable Chemistry & Engineering . 2024

<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c05713>

Valorisation

Elastomères à mémoire de forme à partir d'acides gras hydroxylés. Dépôt 23 nov 2021. FR2012018

Contacts

Denis Lourdin, Bénédicte Bakan et Éric Leroy

UR BIA et USC GEPEA

denis.lourdin@inrae.fr

benedicte.bakan@inrae.fr

eric.leroy@univ-nantes.fr



Contexte

Pour des raisons à la fois économiques et environnementales, il existe un grand intérêt pour les nouveaux matériaux basés sur des ressources de carbone renouvelables sans entrer en concurrence avec les utilisations alimentaires. Des efforts intensifs sont actuellement concentrés sur la valorisation des déchets agricoles et de transformation des aliments en tant que matières premières de bioraffinerie pour la production de monomères. La peau des tomates, ou cuticule, qui remplit des fonctions biologiques cruciales pour la plante (résistance à la déshydratation, adaptation aux stress climatiques et biologiques) est actuellement considérée comme un déchet par l'agro-industrie. Ce travail porte sur la valorisation des peaux de tomates issues de leur transformation industrielle.

Résultats

L'hydrolyse alcaline de la cutine permet de récupérer un mélange contenant des acides gras et des composés phénoliques coextraits. La quantité de ces composés phénoliques est ensuite réduite par purification pour atteindre environ 95 % d'acide (9/10)-16-dihydroxy hexadécanoïque et 5 % d'acides gras dicarboxyliques. Un simple traitement à 150 °C sans ajout de catalyseur conduit à la polymérisation de l'extrait purifié en donnant un réseau de polyester dont le niveau de réticulation dépend du

taux de purification. Les portions de chaînes linéaires entre chaque nœud s'organisent en une structure cristalline qui gouverne le comportement mécanique du matériau à température ambiante qui sont proches de celle d'un polyéthylène basse densité, utilisé couramment dans l'emballage. De plus, ce polyester biosourcé présente des propriétés de mémoire de forme avec la possibilité d'être programmé à chaud ou à froid. Ce travail met en évidence l'impact significatif de composés mineurs liés à l'hétérogénéité biochimique des déchets agro-industriels sur les propriétés du polyester et le potentiel du processus de bioraffinage pour moduler les propriétés des biopolymères.

Perspectives

La quantité de déchets de peaux de tomate disponible, estimée à 1.5 million de tonnes est insuffisante pour envisager la production d'objet dans des volumes élevés, de type emballage. En revanche les applications à forte valeur ajoutée, par exemple dans le domaine des biomatériaux où l'absence d'utilisation de catalyseurs ou de solvant est recherchée, sont des cibles intéressantes. Les performances des matériaux pourront être ajustées par le niveau de purification des molécules de départ afin d'atteindre le cahier des charges. La première étape pour développer la production des polyesters sera la recherche d'une voie de purification industrialisable.

© Peggy Rigou - Campagne de gemmage dans la forêt cévenole. La résine est récupérée dans des bag in box et on note une séparation par gravité de l'huile essentielle de térébenthine et de la colophane



Valorisation de la résine des pins maritimes des forêts Cévenoles



En savoir plus

Chalier P. *et al.*

Extraction of turpentine essential oil from *Pinus pinaster* ait: Comparison of yield and composition between conventional- or microwave assisted-hydro-distillation and vacuum distillation

Sustainable Chemistry and Pharmacy . 2024

<https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101702>

Partenariat

- ChemLab ENSCM
- Syndicat des Pays des Cévennes
- PETR Sud Lozère

Projet support :

Collaboration de recherche
Résit' Cévennes INRAE-Syndicat Mixte du
Pays des Cévennes



Contacts

Pascale Chalier et Peggy Rigou

UMR IATE et UMR SPO

pascale.chalier@umontpellier.fr

peggy.rigou@inrae.fr



Contexte

Sous l'impulsion des compagnies minières, les pins maritimes des Landes ont été semés massivement sur le territoire des Cévennes, pour la fabrication d'étais dans les galeries minières. L'arrêt définitif de l'exploitation minière en 1980 a entraîné une perte d'intérêt pour ces forêts et les propriétaires forestiers privés délaissent l'entretien de cette espèce invasive. Des coupes fortes de ces espèces augmenteraient le risque d'incendies en favorisant le développement de végétation broussailleuse et d'autres déconvenues écologiques et paysagères. Les politiques publiques souhaitent donc revaloriser ces forêts en trouvant de nouveaux débouchés à forte valeur ajoutée au pin maritime, et ainsi inciter à l'entretien des forêts. Au travers de l'activité de gemmage, la valorisation de la gemme pourrait apporter cette valeur ajoutée.

C'est dans ce contexte que nous avons travaillé sur la séparation et la caractérisation des sous-produits de la résine obtenue après gemmage des pins cévenols, et plus particulièrement l'huile essentielle de térébenthine (HE). Pour cela, nous avons mis en œuvre et comparé le procédé de séparation conventionnel d'hydro distillation avec des techniques d'hydro distillation assistées par micro-onde ou encore par distillation sous-vide, deux méthodes permettant de réduire voire d'éliminer l'utilisation d'eau.

Résultats

Nous avons pu estimer une teneur en HE de térébenthine de 0,24-0,3 kg/kg de résine de pin des Cévennes, valeur comparable à celle rapportée pour des résines collectées dans les Landes. La caractérisation du profil aromatique de l'HE a montré la présence de composés monoterpéniques et sesquiterpéniques à des concentrations identiques à celles trouvées dans l'HE des Landes. L' α - et β -pinène sont les composés les plus représentés puisqu'ils constituent 94 % de la concentration en composés d'arômes. Cependant, nous avons montré qu'en adaptant les procédés de distillation, il est possible d'obtenir des HE aux profils aromatiques différents et permettant des applications dans plusieurs domaines comme l'alimentaire (flaveur), les parfums et cosmétiques (arômes) ou dans le domaine médical (propriétés anti-oxydantes, analgésiques et anti-inflammatoires).

Perspectives

Cette première étude a permis de renseigner les acteurs publics du territoire et de confirmer la pertinence de développer une chaîne de valeur via l'implantation d'un biocluster de valorisation de la résine des pins maritimes dans les Cévennes. La mise en place de cette filière est d'ailleurs étudiée dans le cadre du projet TETRAE BICOOC (Bioclusters Circulaires en Occitanie) qui a pour objectif de proposer des outils pour estimer la viabilité économique et durable de clusters s'intéressant à la valorisation en cascade de biomasse.

Contactez nos unités



Auvergne - Rhône-Alpes

CENTRE DE RECHERCHE EN ODONTOLOGIE CLINIQUE (USC CROC)
UNIV CLERMONT AUVERGNE - FACULTE CHIRURGIE DENTAIRE
2 rue de Braga Faculté de Chirurgie Dentaire
63100 CLERMONT-FERRAND
emmanuel.nicolas@uca.fr

QUALITE DES PRODUITS ANIMAUX (UR QUAPA)

INRAE Site de Theix
63122 SAINT-GENÈS-CHAMPANELLE
+33 (0)4 73 62 41 90
quapa-ara@inrae.fr

REDUIRE, VALORISER, REUTILISER LES RESSOURCES DES EAUX RESIDUAIRES (UR REVERSAAL)

INRAE Site VILLEURBANNE - LA DOUA
5 rue de la Doua CS 20244
69625 VILLEURBANNE Cedex
+33 (0)4 72 20 89 04
jean-marc.choubert@inrae.fr



Bourgogne - Franche Comté

CENTRE DES SCIENCES DU GOUT ET DE L'ALIMENTATION (UMR CSGA)

AgroSup Dijon-CNRS-INRAE-Université de Bourgogne
21065 DIJON Cedex
+33 (0)3 80 68 16 23
dir.csga@inrae.fr



PROCÉDÉS ALIMENTAIRES ET MICROBIOLOGIQUES (UMR PAM)

AGROSUP DIJON - ERASME
1 ESPLANADE Erasme Epicure
21000 DIJON
+33 (0)3 83 77 40 23
direction-umrpam@agrosupdijon.fr

Bretagne - Normandie

OPTIMISATION DES PROCÉDES EN AGRICULTURE, AGROALIMENTAIRE ET ENVIRONNEMENT (UR OPAALE)

INRAE RENNES - BEAUREGARD
17 avenue de Cucillé CS 64427 35044 RENNES cedex
+33 (0)2 23 48 21 55
anne.tremier@inrae.fr

SCIENCE ET TECHNOLOGIE DU LAIT ET DE L'ŒUF (UMR STLO)

INRAE - AgroCampus Ouest
35042 RENNES Cedex
+33 (0)2 23 48 53 22
yves.le-loir@inrae.fr



Grand-Est

FRACTIONNEMENT DES AGRO-RESSOURCES ET ENVIRONNEMENT (UMR FARE)

INRAE - Université de Reims Champagne Ardenne - Centre de recherche en environnement et agronomie
51686 REIMS CEDEX 2
33 (0)3 26 77 35 92
gabriel.paes@inrae.fr



Hauts-de-France

UNITE MATERIAUX ET TRANSFORMATIONS (UMR UMET)

CNRS - Université de Lille 1 - Ecole nationale supérieure de Chimie - INRAE
59651 VILLENEUVE-D'ASCQ Cedex
33 (0)3 20 43 54 00
guillaume.delaplace@inrae.fr

Ile-de-France

INSTITUT JEAN-PIERRE BOURGIN (UMR IJPB)

INRAE - AgroParisTech
78026 VERSAILLES Cedex
+33 (0)1 30 83 30 00
ijpb@inrae.fr



FOOD AND BIOPRODUCT ENGINEERING (UMR SAYFOOD)

Campus Agro Paris-Saclay, bâtiment E, 22 place de l'agronomie
91120 PALAISEAU
+33 (0)1 89 10 11 32
catherine.bonazzi@inrae.fr



GENIE DES PROCÉDES FRIGORIFIQUES POUR LA SECURITE ALIMENTAIRE ET L'ENVIRONNEMENT (UR FRISE)

INRAE Site ANTONY
1 rue Pierre Gilles de Genes CS 10030 92761 ANTONY cedex
+33(0)1 40 96 60 21
anthony.delahaye@inrae.fr



PROCEDES BIOTECHNOLOGIQUES AU SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT (UR PROSE)

INRAE Site ANTONY
1 rue Pierre Gilles de Genes CS 10030 92761 ANTONY cedex
+33(0)1 40 96 60 40
theodore.bouchez@inrae.fr

Nouvelle Aquitaine

ŒNOLOGIE (UMR Œ)

INRAE - ISVV
Faculté d'Œnologie
33882 Villenave d'Ornon
+33 (0)5 57 57 58 58
patrick.lucas@u-bordeaux.fr



Contactez nos unités



INSTITUT DE MECANIQUE ET INGENIERIE DE BORDEAUX (USC I2M)

INRAE – CNRS – Université Bordeaux
Campus Talence, 33405 Talence
+33 (0)5 40 00 28 47
thierry.palin-luc@ensam.eu

Occitanie Pyrénées-Méditerranée

INGENIERIE DES AGROPOLYMERES ET TECHNOLOGIES EMERGENTES (UMR IATE)

INRAE– Montpellier SupAgro - CIRAD - Université Montpellier
34060 MONTPELLIER Cedex 1
+33 (0)4 99 61 35 43
jean-yves.delenne@inrae.fr



SCIENCES POUR L'AGROLOGIE (UMR SPO)

INRAE - Montpellier SupAgro - Université Montpellier
34060 MONTPELLIER Cedex 1
+33 (0)4 99 61 22 41
fabienne.remize@inrae.fr

LABORATOIRE DE BIOTECHNOLOGIES ET ENVIRONNEMENT (UR LBE)

INRAE
avenue des Étangs 11100 NARBONNE
+33 (0)4 68 42 51 51
eric.trably@inrae.fr



PECH ROUGE UNITE EXPERIMENTALE (UE PR)

INRAE – 11430 GRUISSAN
+33 (0)4 68 49 44 00
nicolas.saurin@inrae.fr

LABORATOIRE DE CHIMIE AGRO-INDUSTRIELLE (UMR LCA)

INRAE - INPT - ENSIACET
31030 TOULOUSE Cedex 04
+33 (0)5 34 32 35 00
direction.lca@ensiacet.fr

TOULOUSE BIOTECHNOLOGY INSTITUTE (UMR TBI)

INRAE - INSA - CNRS
31077 TOULOUSE CEDEX 4
+33 (0)5 61 55 94 01
direction_tbi@insa-toulouse.fr



TOULOUSE WHITE BIOTECHNOLOGY (UMS TWB)

Campus de l'INSA, Bâtiment 50
135, avenue de Rangueil
31077 TOULOUSE Cedex 4
+33 (0)5 61 28 57 80
twb@inrae.fr



Pays de la Loire

BIOPOLYMERES, INTERACTIONS ET ASSEMBLAGES (UR BIA)

INRAE - 44316 NANTES Cedex 03
+33 (0)2 40 67 50 31

Equipe PRP : INRAE - 35653 LE RHEU Cedex

+33 (0)2 23 48 52 16
bernard.cathala@inrae.fr

STATISTIQUES, SENSOMETRIE ET CHIMIOMETRIE (USC StatSC)

INRAE – Oniris
44322 NANTES Cedex 3
+33 (0)2 51 78 54 50
veronique.cariou@oniris-nantes.fr

GENIE DES PROCÉDÉS ENVIRONNEMENT - AGROALIMENTAIRE (USC GEPEA)

INRAE – Oniris - Université de Nantes
44322 NANTES Cedex 3
+33 (0)2 51 78 54 27
jeremy.pruvost@univ-nantes.fr

Provence - Alpes - Côte d'Azur

BIODIVERSITE ET BIOTECHNOLOGIE FONGIQUES (UMR BBF)

INRAE - Aix-Marseille Université - Faculté des Sciences
13288 MARSEILLE Cedex 09
+33 (0)4 91 82 86 00
marie-noelle.rosso@inrae.fr



SECURITE ET QUALITE DES PRODUITS D'ORIGINE VEGETALE (UMR SQPOV)

INRAE – Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse - Domaine Saint-Paul
84914 AVIGNON Cedex 9
+33 (0)4 32 72 25 00
isabelle.souchon@inrae.fr



ARCHITECTURE ET FONCTION DES MACROMOLECULES BIOLOGIQUES (USC AFMB)

INRAE - CNRS - Aix-Marseille Université
13288 MARSEILLE Cedex 09
+33 (0)4 91 82 55 60
secretariat@afmb.univ-mrs.fr





INRAE - Département TRANSFORM
3 impasse Yvette Cauchois
CS 71627
44316 Nantes Cedex 03
Tél. : +33 1 (0)2 40 67 51 45
transform@inrae.fr

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/departements/transform>

**Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**

