

N°346

JUIN 2017

REVUE DES

enil



© ENILBIO

LES CAPTEURS



© ENILBIO



© ENILBIO



© ENILBIO



© ENILBIO

Notre Revue s'installe dans son nouveau format puisque vous êtes en possession du 2^{ème} dossier thématique, celui-ci étant consacré aux capteurs en Industrie Laitière, sujet vaste et en perpétuelle évolution.

Sujet vaste car il concerne de nombreux outils, certains en place depuis longtemps (mesure de température, poids, débit, conductivité, pH,...). Mais aussi sujet en évolution constante pour intégrer les mutations techniques que nous vivons tant par les technologies mises en œuvre (électronique embarquée, réseaux informatiques, ...) que par l'objet de la mesure (optique, texture, composé chimique, couple redox, ...).

Le sujet est si vaste que nous pourrions être amené à le compléter par un futur dossier, mais il y a bien d'autres sujets qui peuvent vous intéresser.

Le 1^{er} dossier thématique paru en décembre 2016 a reçu un bon accueil et vous avez été nombreux à nous témoigner vos encouragements. Nous espérons que ce 2^{ème} dossier recevra autant d'intérêt de votre part et vous apportera des informations utiles.

Nous restons bien entendu à votre écoute pour améliorer notre publication et la rendre encore plus intéressante par sa forme et les sujets abordés.

Bonne lecture à tous.

Didier JOUBERT
Président ANFOPEIL

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION :

Didier JOUBERT
Président ANFOPEIL

MISE EN PAGE :

Camille BARBIER

N° ISSN: 0395-6865

IMPRIMERIE Seigle-Ferrand
39800 POLIGNY
Dépot légal Juin 2017

ANFOPEIL

BP10025
39800 POLIGNY

accueil@anfopeil-enil.fr
03 84 37 27 24

SOMMAIRE



- **INTRODUCTION**.....1
 - Bruno VOLLE : Chargé d'application R&D, Système analytique et biotechnologie, ENIL Mamirolle

- **LA MESURE EN LIGNE DANS LES PROCÉDÉS AGROALIMENTAIRES**.....3
 - Jean-Louis BERNER : Enseignant, ENIL Mamirolle

- **INTÉGRATION EN IAA**.....6
 - Eric HOUSELLE : Enseignant, ENIL Mamirolle

- **QUELLES ÉVOLUTIONS, INNOVATIONS, PERSPECTIVES**.....8
 - Laurence MARIBE : Chef de marché agroalimentaire, Endress +Hauser SAS

- **UNITÉ MIXTE TECHNOLOGIQUE FROM'CAPT**.....11
 - Stéphane GAVOYE : Chef de projet de l'UMT FROM'CAPT , ACTALIA

- **SUIVI ET INTÉRÊT DE LA MESURE DU POTENTIEL D'OXYDO-RÉDUCTION EN TRANSFORMATION LAITIÈRE**.....14
 - Eric BEUVIER : URTAL, INRA, Poligny
 - Benoit PAYSANT : ACTALIA Produits laitiers, Poligny

- **LES BIOCAPTEURS**.....19
 - Bruno VOLLE : Chargé d'application R&D, Système analytique et biotechnologie, ENIL Mamirolle

- **STAGES ANFOPEIL**.....23
 - Thierry MICHELET : Coordinateur, Responsable pédagogique , ANFOPEIL

INTRODUCTION Bruno VOLLE, Chargé d'application R&D, Système analytique et biotechnologie, ENIL Mamirolle

VERS UNE INDUSTRIE « INTÉGRÉE »

L'industrie alimentaire est aujourd'hui confrontée à des changements significatifs pour faire face, non seulement, aux demandes et besoins des consommateurs, mais aussi à l'évolution des contraintes législatives. En dépit des préoccupations en matière de santé et de sécurité alimentaire, exacerbé par les crises traversées entre la fin du XX^{ème} et le début du XXI^{ème} siècle, le consommateur aspire à une diversité toujours plus grande de produits alimentaires avec des exigences de qualité affirmées [1].

De plus, face à une demande croissante de traçabilité des produits alimentaires, les exigences légales accroissent la pression pour développer des systèmes de traçabilité standardisés. De la matière première à la distribution, de plus en plus d'informa-

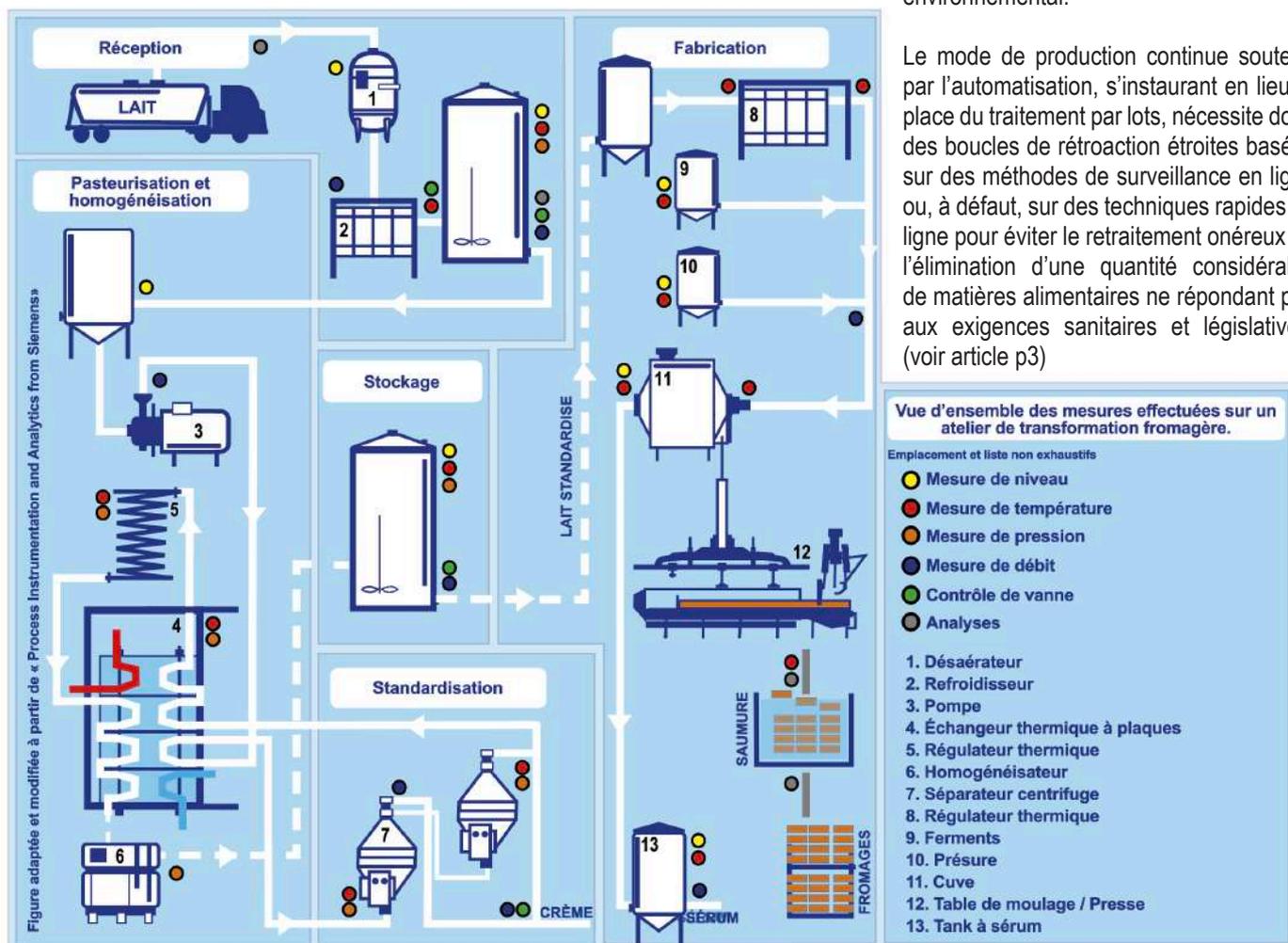
tions doivent être rassemblées et mises à disposition du public, instituant ainsi un système de traçabilité à chaque étape de la durée de vie du produit, « de la ferme à la fourchette » [2,3].

Soumis à divers risques pendant la production, le transport et le stockage, la qualité d'une matière première ou d'un produit transformé évolue. La maîtrise des étapes du cycle de vie, des matières premières, des produits en cours de transformation et des produits finis, constitue, en terme d'assurance de la qualité, un atout significatif pour satisfaire les demandes des clients, assurer la rentabilité et la pérennité de l'entreprise et créer un point de différenciation concurrentiel.

La mise en adéquation de ces objectifs « technico-commerciaux » suppose souvent un contrôle automatisé et efficace de toutes ces opérations. Ce suivi devrait

permettre l'acquisition de données sur tout élément susceptible d'avoir un impact significatif sur la transformation (voir articles p11 et 14), la stabilité du produit final ou son altération via un développement microbien ou une oxydation biochimique (rancissement). Un contrôle étroit est nécessaire pour la surveillance de ces paramètres qu'ils soient quantitatifs (débit, volume, pesée...) pour l'organisation des flux de matières et les calculs de rendement ou qualitatifs (composition, activité de l'eau, température, pH...) pour la détermination des qualités nutritionnelles et sanitaires. Il en découle une meilleure connaissance du déroulé technologique comme de l'état du produit aux différentes étapes du procédé. Cette démarche doit également permettre la détection de faiblesse et l'optimisation de l'ensemble. Bien évidemment, elle s'étend également au contrôle des procédures de nettoyage en place, voire à la surveillance des effluents, et permet de qualifier l'hygiène des installations et l'impact environnemental.

Le mode de production continue soutenu par l'automatisation, s'instaurant en lieu et place du traitement par lots, nécessite donc des boucles de rétroaction étroites basées sur des méthodes de surveillance en ligne ou, à défaut, sur des techniques rapides en ligne pour éviter le retraitement onéreux ou l'élimination d'une quantité considérable de matières alimentaires ne répondant pas aux exigences sanitaires et législatives. (voir article p3)



DES CONDITIONS D'UTILISATION DIFFICILES

Cependant, l'utilisation de capteurs en industrie alimentaire est confrontée à des difficultés liées à la complexité et la variabilité des matrices alimentaires et des procédés ainsi qu'aux normes d'hygiène strictes associées à des procédures de nettoyage en place « hostiles » pour les instruments de mesure. (voir article p6)

La complexité des matières alimentaires s'exprime tant dans leur composition chimique que dans leur structure physique. En effet, les phases gazeuses, liquides et solides peuvent coexister, chaque phase incorporant de nombreux composés chimiques différents. Les mélanges en résultant peuvent être homogènes avec une phase finement dispersée dans une autre, ou hétérogènes et constitués de phases bien séparées.

De plus, des facteurs tels que la saison, le terroir, l'espèce animale ou végétale, la présence d'enzymes actives et de flores microbiennes endogènes, les conditions de collecte et de stockage influenceront la composition et les propriétés des matières premières.

Les sondes de mesure en ligne, en contact avec la matrice alimentaire, ne doivent pas présenter d'anfractuosités susceptibles de permettre une colonisation microbienne. La surface du capteur doit également être résistante aux procédures de nettoyage en place. De plus, tout risque de contamination des aliments qu'elle soit de nature chimique par des réactifs du capteur ou physique par des corps étrangers (des fragments de verre ou de métal) doit être écartée.

FIABILITÉ ET SÉCURITÉ

Ainsi, les caractéristiques du capteur « idéal », doivent répondre à un certain nombre de besoins, du point de vue du responsable d'atelier. Il doit, en premier lieu, être précis, fiable et peu coûteux. Il doit se conformer aux fondamentaux de sécurité sanitaire instaurés en industrie agroalimentaire. Les opérations de maintenance à réaliser sur l'instrument (étalonnage, remplacement,...) doivent être simples. De plus, il doit résister aux conditions drastiques (température, humidité, pH, détergence...) des procédés de fabrication et du nettoyage en place.

Ainsi, de nombreux capteurs et instruments ont été développés pour l'industrie alimentaire.

Les efforts des fournisseurs se sont portés sur le développement d'une gamme d'instruments de mesure souvent issus du transfert de technologie d'autres secteurs industriels ou du secteur médical. Ainsi, ces capteurs, devenus plus polyvalents, peuvent être utilisés, de manière fiable, à une large gamme d'aliments et de situations industrielles.

DES PERSPECTIVES INNOVANTES

Les développements futurs (voir articles p8 et 19) sont en synergie avec l'évolution des technologies de l'instrumentation de mesure (biocapteurs [4,5], capteur en proche infra rouge NIR [6]), des technologies de transfert d'informations (capteurs sans fil, identification de radio fréquence RFID [7]), des technologies de stockage ou de traitement des données, et des biotechnologies (biologie de synthèse [8]). Les nouvelles méthodes de suivi qui pourraient voir le jour dans le domaine de l'industrie alimentaire devraient également s'appuyer sur le développement de modèles mathématiques ou informatiques (Artificial Neural Network ANN [9,11]) issus de l'étude de phénomènes biologiques ou métaboliques impliqués dans une étape de transformation (ex : production d'acide lactique et acidification). La modélisation de ces phénomènes microbiologiques, biochimiques et physico-chimiques en découlant devrait donc permettre d'optimiser une étape de transformation débouchant sur des prises de décision à visée technologique : la prédiction du temps d'acidification en production fromagère [9], la modélisation des phénomènes de transfert de masse dans le cadre du salage des fromages [10], la modélisation de la phase d'affinage [11], l'estimation de la durée de conservation [12]...

Les applications nombreuses et variées ne devraient pas manquer. A l'heure où un nouveau modèle technico-économique émerge [13], soutenu par une réorganisation industrielle basée sur le concept de l'industrie 4.0 (smart industry) [14] avec l'intégration des procédés par le biais des applications des technologies d'information et de communication, et des objets connectés (Internet of Things IoT [15]), l'industrie agroalimentaire sera sans doute amenée

à adapter le pilotage des procédés et de l'assurance qualité pour profiter pleinement de ce potentiel technologique.

BIBLIOGRAPHIE

- 1. Les Français toujours très attachés à la qualité.** G. Tavoularis - P. Hébel - M. Billmann - C. Lelarge, Consommation et mode de vie. 2016, N° 283
- 2. La sécurité alimentaire** - Nora Hahnkamper-Vandenbulcke. Fiches techniques sur l'Union européenne. 2017
- 3. A Review on Agri-food Supply Chain Traceability by Means of RFID Technology.** Costa C., Antonucci F., Pallottino F., Food and Bioprocess Technology, 2013, 6-2 : 353-366
- 4. Biosensor-based engineering of biosynthetic pathways.** Jameson K Rogers, Noah D Taylor, George M Church. Current Opinion in Biotechnology. 2016, 42 : 84-91
- 5. Biosensors: sense and sensibility.** Anthony P. F. Turner Chemical Society Reviews 2013, 42 : 3184-3196
- 6. Evaluation of on-line optical sensing techniques for monitoring curd moisture content and solids in whey during syneresis.** Maria J. Mateo, Donal J. O'Callaghan, Colm D. Everard, Manuel Castillo, Fred A. Payne, Colm P. O'Donnell. Food Research International. 43-1 : 2010,177-182
- 7. Application of RFID in agri-food sector.** Leena Kumari, K. Narsaiah, M.K. Grewal, R.K. Anurag. Trends in Food Science & Technology. 43-2, 2015, 144-161
- 8. Synthetic biology and the art of biosensor design.** French CE, de Mora K, Joshi N, et al. The Science and Applications of Synthetic and Systems Biology. National Academies Press (US); 2011.
- 9. Artificial Neural Network Model with a culture database for prediction of acidification step in cheese production..** Horiuchi, J., Shimada, T., Funahashi, H., Tada, K., Kobayashi, M. and Kanno, T. Journal of Food Engineering. 2004, 63 : 459-465.
- 10. Modeling of Camembert-type cheese mass loss in a ripening chamber: Main biological and physical phenomena.** Hélias A., Mirade P.S. and Corrieu G. Journal of Dairy Science. 2009, 90: 5324-5333.
- 11. Prediction of the type of milk and degree of ripening in cheeses by means of artificial neural networks with data concerning fatty acids and near infrared spectroscopy.** Soto-Barajas MC, González-Martín MI, Salvador-Esteban J, Hernández-Hierro JM, Moreno-Rodilla V, Vivar-Quintana AM, Revilla I, Ortega IL, Morón-Sancho R, Curto-Diego B. Talanta, 2013, 116 : 50-55.
- 12. Artificial Neural Network Simulated Elman models for predicting shelf life of processed cheese.** Gyanendra Kumar Goyal, International Journal of Applied Metaheuristic Computing. 2012, 3-3 : 20-32.
- 13. Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment.** Jay Lee, Hung-An Kao, Shanhu Yang. Procedia CIRP. 2014, 16 : 3-8
- 14. Internet of Things: Technology and Value Added.** Wortmann Felix, Flüchter Kristina, Business & Information Systems Engineering. 2015 : 221-224.
- 15. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios.** M. Hermann ; T. Pentek ; B. Otto. International Conference on System Sciences. 2016 : 3928-3937.

LA MESURE EN LIGNE DANS LES PROCÉDÉS AGROALIMENTAIRES

Jean-Louis BERNER, Enseignant, ENIL Mamirolle

UNE ÉVOLUTION VERS LA QUALITÉ DES PRODUITS.

Fabriquer des produits de qualité régulière à partir de matières premières biologiques, par définition variables dans leurs caractéristiques, demande une grande maîtrise des procédés. La mesure par les capteurs a été dans un premier temps dévolue à la conduite de procédés, par le contrôle de paramètres technologiques (température, débit, pH, pression ...). La mesure s'est orientée ensuite progressivement vers la caractérisation de la matière, et la qualité des produits. Les analyses qui se faisaient au laboratoire tendent à se déplacer vers les procédés, avec des outils en ligne ou en temps réel. Cette évolution répondant à des enjeux fondamentaux, est permise par un important progrès technologique. Les contraintes sont également de plus en plus fortes face à l'évolution de la réglementation et à la demande des consommateurs.

DES ENJEUX MAJEURS

La mesure en ligne vise principalement à accroître la productivité, tout en réduisant les pertes matières. Face à l'évolution de la réglementation, il convient également de réduire les risques sanitaires et contribuer à la traçabilité.

Les grandeurs mesurées ont été dans un premier temps des grandeurs telles que la température, le débit, la pression, le niveau... Ces mesures, qui peuvent être intégrées dans une ou plusieurs boucles de régulation, servent le plus souvent au contrôle des paramètres technologiques dans le fonctionnement des équipements ou des opérations unitaires.

La mesure la plus répandue dans l'industrie, en particulier en agroalimentaire, est sans conteste la mesure de température. Les points de mesure par site peuvent être très nombreux. Bien que basées sur des principes simples et parfaitement maîtrisés, il existe une multitude de solutions techniques.

Une attention particulière est portée au choix de la sonde en fonction de la mesure à effectuer, de son environnement et des enjeux réglementaires ou technologiques. C'est ainsi que s'est généralisée l'utilisation de sondes thermorésistantes de type Pt100 dans les procédés de pasteurisation, pour lesquels la maîtrise de la température nécessite un contrôle continu et précis, afin de garantir l'innocuité des produits et leur bonne conservation.

VERS LA MAÎTRISE DE LA MATIÈRE

L'évolution de la mesure en ligne s'est orientée plus particulièrement vers la caractérisation de la matière ou des produits telles que la mesure de la densité, de la viscosité, ou de la teneur en eau. Ceci répond à un enjeu majeur de l'agroalimentaire : élaborer des produits constants à partir de matières premières qui ne le sont pas dans leurs caractéristiques biochimiques.

La mesure de la viscosité est un exemple concret de cette évolution de la mesure en ligne. Développée depuis de nombreuses années avec des appareils de laboratoire performants et sophistiqués, son transfert au niveau des procédés s'est faite en deux phases.

Ce transfert de la technologie de laboratoire vers les procédés n'a pas dans un premier temps été performant en raison des principes de mesure des méthodes de référence peu adaptés à la mesure en ligne.

Mais la demande croissante des industriels pour un contrôle précis de ce paramètre directement sur le produit au sein du procédé, et pour des applications très variées a conduit au développement de solutions techniques très spécifiques.

Le nombre de fabricants s'est multiplié avec autant de principe de mesure.

La mesure de viscosité en ligne permet désormais de contrôler en temps réel un paramètre qui a une réelle influence sur la transformation de la matière, en particulier dans les procédés mettant en jeu des transferts de chaleur (pasteurisation, cuisson), et bien sûr de s'assurer de la qualité du produit fini.

Cette mesure s'est même combinée avec d'autres mesures comme dans le cas du combiné débitmètre-viscosimètre Proline Promass I100 commercialisé par Endress-Hauser.



Illustration 1. : Combiné débitmètre-viscosimètre Proline Promass I100 - Endress+Hauser (source Endress+Hauser)

Un autre exemple très caractéristique du développement de la mesure en ligne est illustré par les analyseurs dédiés à la standardisation des laits. Ainsi la société Krohne a mis sur le marché un analyseur optique, l'Optiquad, basé sur la technologie du spectrophotomètre, et permettant de déterminer les teneurs respectives en matière grasse, en matière protéique, en lactose, et en matière sèche du lait ou de ses dérivés.



Illustration 2. : Unité d'analyse OPTIQUAD-M. (Source Krohne)

L'appareil utilise une technologie basée sur une gamme de plusieurs longueurs d'onde (de l'ultraviolet à l'infra-rouge, en passant par le visible et le proche infra-rouge), et plusieurs modes de transmission du signal lumineux. La mesure est réalisée directement sur le flux de matière grâce à un hublot optique. Contrairement à la démarche qui consiste à analyser au laboratoire un échantillon prélevé sur la matière, cette nouvelle technologie permet une mesure en temps réel et une correction immédiate par une ou plusieurs boucles de régulation, sans nécessiter de stockage tampon.

Dans la mesure en ligne par spectrophotométrie, celle dans le domaine de l'infra-rouge reste la plus répandue, avec diverses options selon la longueur d'onde (IR-Infrared ou NIR-Near Infrared) d'une part, et selon l'utilisation d'un interféromètre d'autre part.

Cette dernière technologie est un développement plus récent de la spectrophotométrie infra-rouge, qui devient plus performante mais également plus coûteuse. Cette évolution technologique est permise en partie grâce à la modélisation des procédés et à la constitution de bases de données collectées sur les procédés. L'utilisation de cette technologie nécessite cependant une mise au point et des étalonnages plus importants, ainsi qu'un certain niveau d'expertise tant pour l'utilisation que pour la maintenance.

Parfois les capteurs en ligne ne sont tout simplement pas disponibles pour certaines mesures très spécifiques. Une alternative peut être offerte par la mesure extractive avec des appareils by-pass automatisés. Ce qui correspond à un réel transfert d'une chaîne de mesure du laboratoire vers la ligne de procédé, incluant l'échantillonnage, et le prétraitement de très petits volumes d'échantillon.

Les analyseurs colorimétriques de la gamme Liquiline System CA80 de Endress-Hauser qui permettent de mesurer dans l'eau des éléments tels que l'ammonium, le fer, les phosphates sur les eaux en sortie de traitement des eaux usées, mais également les nitrites sur les eaux de process assurent ainsi un contrôle en continu des éléments indésirables.



Illustration 3. Analyseur d'ammonium Liquiline system CA80 AM (Source Endress+Hauser)

Les outils de mesure en ligne se développent également en sortie des procédés, comme par exemple le turbidimètre Ciptec-M de la société TTS-Ciptec, destiné au tri des eaux blanches, en mesurant la concentration de l'eau dans le lait, assurant une meilleure gestion des pousses à l'eau.



Illustration 4. : Sonde de concentration CIPTEC-M (Source TTS-CIP-TEC)

Les capteurs en ligne participent désormais à de nouvelles fonctions telles que le nettoyage en permettant la mesure de l'encrassement des installations tels que les tuyauteries, les échangeurs de chaleur, développant de nouvelles perspectives dans le domaine du nettoyage et de l'optimisation des systèmes NEP (nettoyage en place).

L'HYGIÈNE, UNE CONTRAINTE MAJEURE DANS LA CONCEPTION DES CAPTEURS

Les solutions de mesure en ligne dans l'agroalimentaire ne résistent pas à la contrainte de l'hygiène. Face au risque hygiène, la qualité alimentaire des matériaux utilisés doit être respectée, et la conception à partir d'inox 316L est devenue un standard. La conception hygiénique repose également de plus en plus souvent sur une normalisation ou une certification telle que celle de l'EHEDG (European Hygienic Engineering & Design Group) (GAVOYE & ROSSI, 2017).

De plus les solutions affleurantes, voire même à travers un hublot pour les solutions optiques, sont privilégiées, facilitant le nettoyage des installations, et limitant le risque de dégradation de l'outil de mesure.

L'ÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE SE POURSUIT

La réduction de la taille des capteurs est une tendance générale, d'une part sous l'effet de la demande des industriels, et d'autre part grâce à la miniaturisation des systèmes électroniques. La compacité des systèmes de mesure en ligne est également recherchée, principalement en associant les parties de détection et celles de traitement et transmission du signal au sein d'un même ensemble.

Enfin des fonctions intelligentes sont développées au sein même des capteurs, qui présentent des fonctions d'autodiagnostic, de détection des dérives d'étalonnage, et de communication avec les systèmes de commande. La fonction de communication est tout particulièrement importante car elle améliore considérablement l'intégration des systèmes de mesure dans l'architecture des systèmes automatisés.

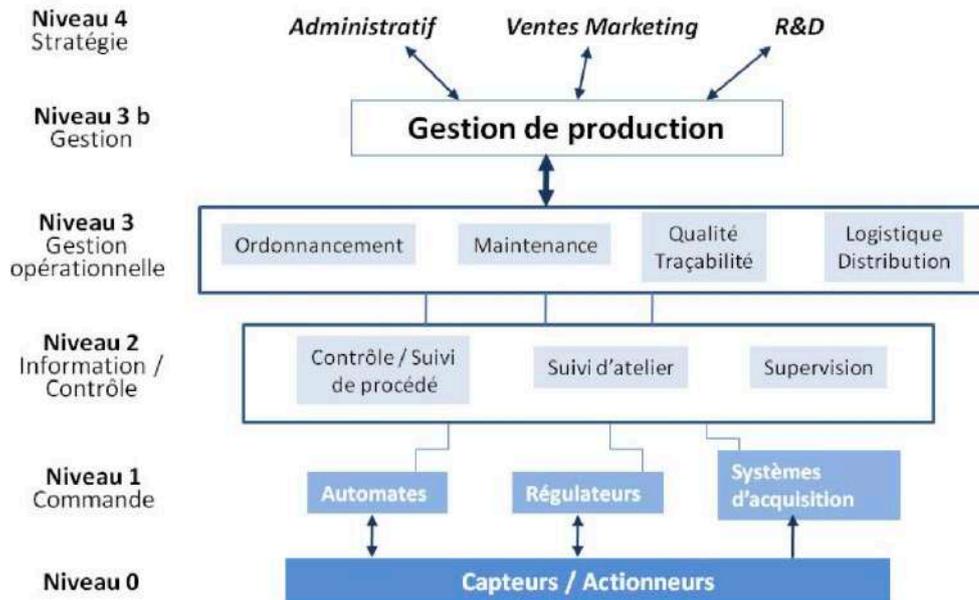


Illustration 5. : Le Computer-integrated manufacturing en automatisation des procédés

BIBLIOGRAPHIE

GAVOYE S. & ROSSI N. Matériels et capteurs : outils de mesure émergents, hygiène des capteurs, les capteurs en industrie laitière. - Industries Alimentaires et Agricoles. Janvier-Février 2017.

GUILLON M. Les capteurs nouvelle génération. (2012). - Process, n°1232.

La viscosité en ligne garante de la qualité des produits (2014). - Mesure, n°687.

IR, NIR, FT-IR, CG, SM ..., l'exploitation décide. (2004). - Mesure, n°761.



POUR CONCEVOIR ET DEVELOPPER VOS FABRICATIONS

Ingrédients laitiers	Matériel	Equipement de la personne	Hygiène	Conditionnement
----------------------	----------	---------------------------	---------	-----------------

ZI La Bergaderie - 01370 – SAINT ETIENNE DU BOIS Mail: contact@fourniture-laitiere.com
 Tel : 04.74.30.50.37 – Fax : 04.74.25.87.37 Site : www.fourniture-laitiere.com

INTÉGRATION EN IAA

Eric HOUSELLE, Enseignant, ENIL Mamirolle

Le secteur de l'industrie alimentaire représente un domaine particulièrement exigeant pour ses acteurs et équipements. Régi par des normes sévères, il est très demandeur de capteurs aptes à satisfaire ses besoins en termes de nettoyabilité, protection, sécurité et automatisation toujours plus poussée.

Les capteurs doivent être adaptés à des exigences qui peuvent être très différentes selon les secteurs. Dans l'embouteillage, par exemple, on mettra en avant les aspects cadences et positionnement. D'autres critères prédominent dans les sandwicheries, les chocolateries, les fromageries, la fabrication de yaourts, la découpe de la viande ou du poisson (découpe au jet d'eau sous pression), les silos (exigence de l'ATEX), les malteries (environnement sévère, produits corrosifs).

ADAPTATION AUX CONTRAINTES D'HYGIÈNE ET DE SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

Les capteurs entrant en contact avec les produits doivent éviter tout risque de contamination bactériologique et permettre un nettoyage performant. On parlera de principe de nettoyabilité dont les caractéristiques dépendent des matériaux utilisés. Les critères pris en compte sont :

- Leur résistance mécanique, chimique et thermique afin d'éviter fissures, ébréchantures, trous.
- Leur nature non absorbante.
- Leur compatibilité au contact alimentaire

Il faut également privilégier les surfaces ayant des formes qui ne retiennent pas les souillures et qui favorisent l'écoulement des eaux résiduelles.

Dans le cas des sondes de température (type Pt100) par exemple, les doigts de gant sont en acier inoxydable AISI 316L avec une rugosité $Ra \leq 0,8 \mu m$.

Une autre solution est d'empêcher le contact entre le produit et l'élément sensible du capteur par l'utilisation d'une membrane de séparation, dans le cas d'une mesure de pression.



Séparateur à membrane avec raccord fileté pour manomètre (source internet)



Transmetteur de pression à membrane (source internet)

Le choix du type de raccord permet également d'apporter une innocuité à la présence du capteur.

Quatre standards alimentaires en inox : le CLAMP, le SMS, le DIN et le MACON, dédiés à l'industrie alimentaire.



Capteur de conductivité avec raccord clamp (source internet)

ADAPTATION AUX MILIEUX

L'environnement des process agroalimentaires est souvent sévère en terme d'humidité, de température (vapeur, froid), d'agression chimique liée aux produits de nettoyage, de pression, de vibrations.

- L'utilisation de l'inox est bien sûr évidente pour supporter ces conditions sur le long terme.
- L'indice de protection (IP) doit être choisi en tenant compte des conditions de nettoyage. Un IP 69 peut être nécessaire dans le cas de nettoyage haute pression. Cet indice concerne le boîtier du capteur mais également son connecteur électrique dont la norme prescrite est de type M12.

Rappel : L'indice de protection d'un matériel, plus généralement connu sous le sigle « IP », permet de connaître le niveau de protection d'un matériel face à des intrusions de corps solides et liquides. Dans le cas d'un indice IP 67 par exemple, le premier chiffre représente le pouvoir de protection contre la poussière et le second le pouvoir de protection contre l'eau.

Indice IP	IP69 (K)	IP66
Durée du test	30 secondes dans chacun des 4 coins (0°, 30°, 60° et 90°)	3 minutes de chaque direction
Volume d'eau	14-16 litres /minute	100 litres/minute via une lance de ø 12,5 mm
Pression	8000-1kPa	100 kPa
Distance	10-15 cm	2,5-3 mètres
Température de l'eau	+ (80+ -5)°C	-



Connecteurs type M12 (source internet)

ADAPTATION AUX ENJEUX DE PRODUCTIVITÉ

Les process de l'industrie agroalimentaire ont de hautes exigences de qualité et de performance économique. La concurrence exige un accroissement permanent de l'efficacité de la production et les capteurs y jouent un rôle important.

Pour atteindre ces objectifs, le choix des capteurs retiendra une attention particulière à des caractéristiques telles que :

- **La précision** : elle intervient directement sur la qualité des produits finis mais elle peut également améliorer l'estimation des bilans matières (pour les débitmètres par exemple). Une précision de 0.1 % de l'étendue de mesure est devenue un standard.

- **La rapidité** : le temps de réaction du capteur doit être le plus court possible pour suivre les variations des grandeurs physiques sans générer de temps de retard dans les systèmes régulés.

- **La fiabilité** : certains constructeurs garantissent 10 ans la précision de leur matériel en proposant une technologie de mesure numérique qui supprime l'usure et les dérives dans le temps. D'autres intègrent un système d'autodiagnostic et alertent en cas de dérives.

- **Les frais d'entretien** : On recherche la performance pour limiter les actions de maintenance ou d'étalonnage. Les suivis des variations ou des dérives sont des indicateurs importants pour les actions de maintenance. Il existe des solutions qui permettent de pré-étalonner en laboratoire et en temps masqué des capteurs comme des sondes de pH ou de conductivité par exemple.

Forum AgroVIP

Votre Instrumentation de Process



Le premier forum d'experts
entièrement dédié aux professionnels et étudiants de l'agroalimentaire

www.agro-vip.fr

Endress+Hauser **EH**
People for Process Automation

QUELLES ÉVOLUTIONS, INNOVATIONS ET PERSPECTIVES ?

Laurence MARIBE, Chef de marché agroalimentaire, Endress+Hauser SAS

Les industriels de l'agroalimentaire sont de plus en plus challengés en termes de rendements et productivité. Mais produire plus ne doit pas se faire au détriment de la qualité des produits.

Comment les capteurs en ligne peuvent-ils les aider à réduire les coûts et augmenter la disponibilité des installations tout en garantissant une sécurité de process ?

COMMENT CONTRÔLER LA QUALITÉ DES PRODUITS EN LIGNE ?

Il est nécessaire de surveiller certains paramètres-clés afin de contrôler la qualité des produits en cours de production. Il peut s'agir de mesure de viscosité, de degré Brix, pH, couleur ou densité. Ces analyses sont, en général, réalisées en laboratoire et il faut souvent attendre des heures pour avoir les résultats. Par ailleurs, elle nécessite parfois l'arrêt du process pour prélever des échantillons. Une alternative à cette méthode contraignante et chronophage est de réaliser une mesure en ligne.

A titre d'exemple, il est possible de mesurer le pH en ligne. On peut trouver deux types de technologie sur le marché : électrode en céramique sans verre ou électrode verre rétractable.

Il existe également des technologies multi-paramètre notamment sur les débitmètres Coriolis massiques. Ces débitmètres peuvent à la fois mesurer le **débit massique, la température, la concentration en degré Brix ou la viscosité**. Cela permet de connaître et vérifier en temps réel les valeurs attendues et, si besoin, de mettre en œuvre des actions correctives pour éviter de perdre un batch entier. Les valeurs sont moins précises qu'en laboratoire mais c'est souvent la reproductibilité des mesures qui importe le plus pour les industriels.

Dans un process contrôlé, la mesure de couleur ou de turbidité dans des liquides est critique pour garantir la qualité du produit fini. Pour ces mesures, ce sont des technologies optiques qui sont utilisées.

Le changement de couleur révèle des variations dans le process de fabrication : mélange non conforme, surchauffe, dilution non adaptée, présence d'impuretés (distillation).

La turbidité est une mesure de solides en suspension, d'émulsions et de produits non miscibles dans les fluides à faibles concentrations (0 à 200 FTU).

La **surveillance de la turbidité** d'un produit en cours de fabrication permet d'en contrôler la pureté, d'identifier le dysfonctionnement d'un filtre ou une fuite sur un échangeur. Les capteurs optiques, par l'utilisation du principe de l'absorbance, permettent également un gain de productivité important.

Cette mesure est typiquement utilisée pour les applications de pertes matières.

En effet, pour les faibles concentrations, cette technologie est beaucoup plus précise que la conductivité

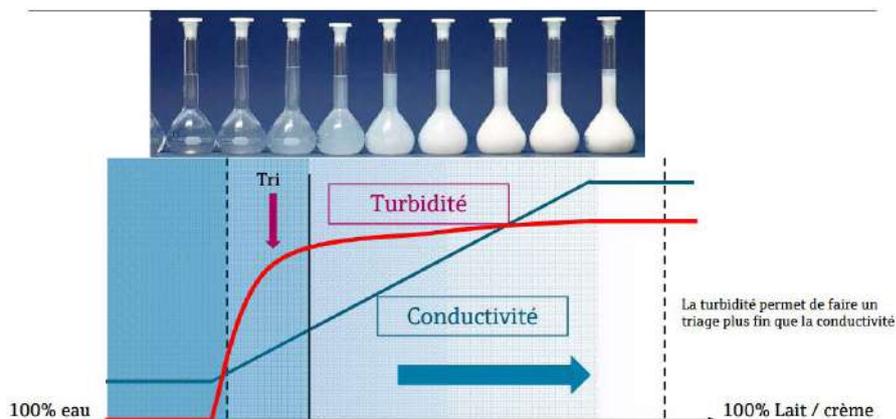


Figure 1 : Optimisation pousse à l'eau - Séparation eau / crème ou lait (Source: Endress+Hauser)

Cette mesure permet de détecter le départ de lait ou crème dans les égouts. Certains débitmètres électromagnétiques disposent d'une **mesure de conductivité intégrée**. En plaçant le débitmètre en fin de ligne de production, on s'assure que la NEP est bien passée partout.

C'est une méthode de validation économiquement intéressante car on s'affranchit d'ajouter un point de mesure supplémentaire.

LE SANS FIL POUR UN GAIN DE TEMPS LORS DE LA CONFIGURATION DES INSTRUMENTS

Lors de l'installation des capteurs, il est souvent fastidieux de les configurer. Les opérateurs sont confrontés à différentes problématiques. Cela peut être lié à la complexité du menu, à l'accessibilité aux capteurs difficiles voire impossibles ou au nombre important de capteurs à configurer. Les nouvelles technologies offrent à présent une solution qui permet de gagner du temps lors de cette phase. A l'instar des Smartphones qui ont révolutionné la téléphonie, les innovations mises en œuvre dans les capteurs de mesure permettent un véritable saut de génération. En effet, la configuration des appareils peut se faire désormais à distance via Bluetooth ou Wifi.



Figure 2



Figure 2 bis

Le principe du sans-fil se généralise de plus en plus dans le domaine. A ce jour, on retrouve cette fonctionnalité sur des capteurs de niveau radar et sur les débitmètres électromagnétiques et Coriolis.

Ces débitmètres sont équipés d'un serveur web, chaque appareil possède sa propre adresse IP. Les utilisateurs n'ont plus besoin d'outils spécifiques.

Plus de logiciel, plus de pockets...on se connecte en Wifi avec un PC, une tablette ou un Smartphone, on ouvre un navigateur internet, on tape l'adresse IP du débitmètre dans l'URL et on accède à tous les paramètres.

Pour les radars (Fig.3), ça fonctionne avec le Bluetooth en ouvrant une application sur le téléphone ou la tablette. Evidemment, tout est sécurisé.



Figure 3 : Radar FMR20 Endress+Hauser dédié à la mesure de niveau

L'USINE DU FUTUR AVEC DES CAPTEURS INTELLIGENTS QUI COMMUNIQUENT VIA L'ETHERNET INDUSTRIEL

Afin d'améliorer la sécurité de process et de faciliter la maintenance prédictive, il existe un système d'auto surveillance intégré dans les capteurs. Il s'agit de la technologie Heartbeat (Fig. 4 et 5) qu'on trouve sur les débitmètres Proline 300/500 et la plupart des radars chez Endress+Hauser SAS.



Figure 4



Figure 5

Cette technologie permet d'exploiter une installation de façon économique et sûre tout au long de son cycle de vie en combinant des fonctions de diagnostic, de vérification et de surveillance :

- Des messages de diagnostic explicites et normalisés avec des instructions opératoires claires facilitent une maintenance économiquement rentable et orientée vers l'état.
- L'autodiagnostic permanent de l'appareil simplifie le fonctionnement sûr avec des cycles de vérification étendus.
- Le point de mesure peut être vérifié et documenté in-situ à tout moment.
- La vérification se fait sans démonter l'appareil ni interrompre le process. (Fig. 6)



Figure 6 : Vérification Heartbeat sur un Promass F 100.

- Le rapport de vérification généré automatiquement apporte les preuves requises par les audits.
- La fourniture des données de process et d'appareil facilite la reconnaissance des tendances pour la maintenance prédictive. La technologie Heartbeat permet de simplifier et d'améliorer le contrôle de votre point de mesure. De cette manière, les industriels peuvent être assurés que leur process se déroule de façon fiable et sûre. Les efforts de vérification sont considérablement réduits.

AUTRE AVANCÉE TECHNOLOGIQUE

De plus en plus de capteurs sont dotés du bus de terrain Ethernet industriel avec au choix soit le **protocole Ethernet IP** si on possède des automates Schneider ou Rockwell soit le **protocole Profinet** pour les versions de chez Siemens.

Avec l'utilisation de l'Ethernet industriel, l'intégration est simplifiée. Les responsables de maintenance peuvent accéder facilement aux données de process, de sécurité et de maintenance. L'architecture du réseau est simplifiée, les appareils de terrain sont directement raccordés aux automates via de simples switches avec un câble Ethernet sans passer par des passerelles.

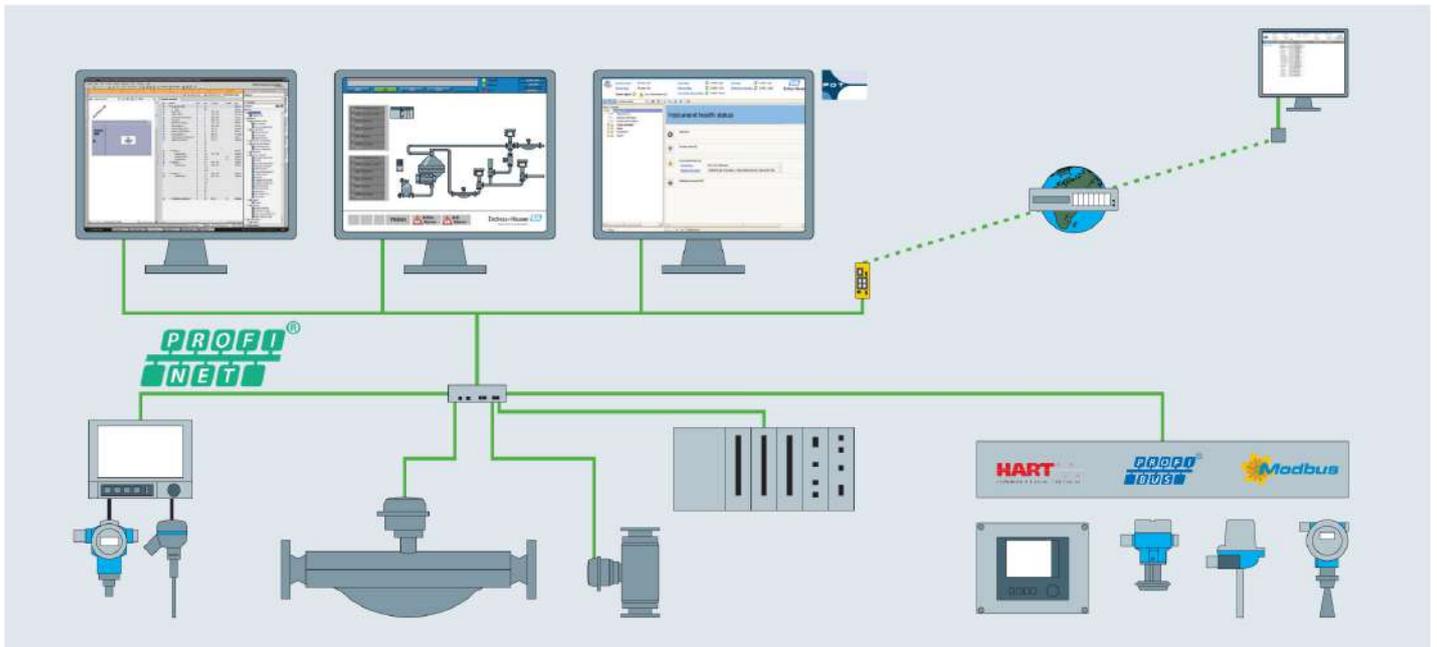


Figure 7 : Exemple d'architecture avec PROFINET

Les avantages sont multiples : vitesse de transmission des données plus rapide, mise en œuvre simple, plus de programmation nécessaire, coûts de câblage réduits, volume de données plus important, paramétrage depuis l'automate et possibilités de gérer les fonctionnalités avancées d'un instrument. Par exemple, avec Heartbeat, il suffit de lancer la routine en un clic avec le serveur web de l'appareil depuis la salle de contrôle.

DE NOUVELLES PERSPECTIVES EN MÉTROLOGIE

Pour des raisons de qualité de produits finis et de conformités réglementaire, il est nécessaire de contrôler périodiquement la performance de mesure des instruments critiques.

Il s'agit même d'une exigence du référentiel IFS version 6, dans lequel le paragraphe 5.4.2 mentionne que « Tous les appareils de mesure doivent être vérifiés, ajustés et étalonnés dans le cadre d'un système de surveillance, à des fréquences spécifiées, conformément à des normes/méthodes définies et reconnues. Les résultats de ces vérifications, ajustements et étalonnages doivent être documentés. ».

Le débit est un des paramètres les plus importants dans le process, notamment au niveau de la validation des pasteurisations. C'est également le paramètre le plus difficile à contrôler métrologiquement.

En effet, cela nécessite l'arrêt de la production, avec soit une méthode de mise en série d'un étalon soit le démontage et le retour du matériel sur banc au laboratoire d'étalonnage.

Les prestations habituelles sont très longues à mettre en œuvre et nécessitent l'intervention sur le process. D'autres s'affranchissent de l'interruption du process (comme une mesure contradictoire par ultrasons clamp-on) mais au détriment de la performance (incertitude de mesure 4 % vs 0,15 %).

Pour palier cette problématique, certains prestataires se sont dotés d'un banc mobile complètement autonome pour venir sur site. Ce banc (Fig. 8) est équipé d'un réservoir d'eau et des appareils étalon. L'appareil est posé sur le banc, étalonné et réinstallé aussitôt sur le process.

Avec ce type de banc, l'étalonnage sur site se fait en un minimum de temps et de contrainte. C'est un réel avantage pour les industries agroalimentaires qui fonctionnent toute l'année en continu.



Figure 8 : banc d'étalonnage mobile autonome Endress+Hauser

Référence bibliographique : IFS Version 6 Janvier 2012, référentiel d'audit de la qualité et de la sécurité des produits alimentaires

UNITÉ MIXTE TECHNOLOGIQUE FROM'CAPT

Stéphane GAVOYE, Chef de projet de l'UMT FROM'CAPT, ACTALIA

« OUTILS DE MESURE POUR CARACTÉRISER ET PILOTER LA TRANSFORMATION FROMAGÈRE »

L'Unité Mixte Technologique FROM'CAPT a été labellisée par la Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche dépendante du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt par lettre en date du 12 janvier 2017 pour la période du 1^{er} janvier 2017 au 31 décembre 2021.

QU'EST QU'UNE UNITÉ MIXTE TECHNOLOGIQUE ?

Les unités mixtes technologiques (UMT) sont des partenariats promus par le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt.

Ces partenariats visent à développer autour d'un thème de recherche des relations de travail approfondies entre des organismes de recherche publique ou des établissements d'enseignement supérieur et des instituts techniques agricoles ou agroindustriels, en cohérence avec les contrats d'objectifs du réseau des instituts techniques agricoles ou du réseau des instituts techniques agroindustriels sous la coordination de l'ACTA (Association de Coordination Technique Agricole) ou de l'ACTIA (Association de Coordination Technique pour l'Industrie Agro-alimentaire).

LE CONTEXTE DE L'UMT FROM'CAPT

En 2016, l'ANIA (Association Nationale des Industries Alimentaires) tenait sa conférence de presse économique annuelle. Les principaux messages de cette conférence sont les suivants :

- une érosion tendancielle de la compétitivité depuis plusieurs années dans un contexte de guerre des prix ;
- si la compétitivité des prix peine à se redresser, les actions doivent permettre d'améliorer la compétitivité hors prix. Cette dernière s'appuie sur l'innovation et la qualité des produits commercialisés.

L'industrie agroalimentaire fait preuve d'innovations. Toutefois, ces dernières dans le secteur alimentaire sont le plus souvent des innovations marketing et organisationnelles. Les innovations technologiques (produit ou procédé) sont minoritaires.

La transformation laitière est une des filières la plus en difficulté dans le secteur agroalimentaire. Les exportations de produits laitiers ont reculé de 139 millions d'euros entre 2014 et 2015 (Source : CNIEL, 2016). La transformation laitière est également le secteur qui consacre le moins de budget à l'innovation avec 2 % de son excédent brut d'exploitation contre 20 % pour l'industrie agroalimentaire hors artisanat commercial (Source : ANIA, 2016).

Dans ce contexte, les capteurs et les systèmes d'analyse sont identifiés comme une technologie clé par le ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique dans son document « TECHNOLOGIES CLÉS - Préparer l'industrie du futur 2020 ».

LA THÉMATIQUE DE L'UMT FROM'CAPT

L'évolution des analyses s'est dirigée, ces dernières années, vers des outils plus fins, plus rapides et plus fiables.

Plus fins, car dans une démarche d'amélioration continue et d'avancée des connaissances, les acteurs de la filière laitière ont besoin de connaître plus précisément la composition des différentes matrices laitières.

L'évolution des outils d'analyses permettent alors d'améliorer la compréhension des mécanismes d'élaboration de la qualité finale des fromages et donc de mieux maîtriser les procédés, de rechercher et d'identifier des contaminants, de communiquer sur des compositions en lien avec des aspects santé ou de valorisation.

Plus rapides pour une meilleure réactivité qui permettra de tendre vers une meilleure orientation des matières premières ou en cours de transformation, un meilleur pilotage des procédés, des délais plus courts dans la qualification et la libération des lots. L'obtention d'analyses plus rapides est également un pré-requis pour la migration des analyses du laboratoire vers la production. Enfin des analyses plus rapides ouvrent la possibilité d'augmenter la fréquence des analyses et de lever des verrous liés à la précision et à l'incertitude des résultats analytiques.

Plus fiables, car les enjeux qui reposent sur les résultats analytiques sont importants. Ils engagent la responsabilité du transformateur dans le cadre d'autocontrôles visant à valider la conformité des lots sortant de l'entreprise. Ils sont aussi la base des bilans « matières » tenus par les entreprises permettant de s'assurer de la rentabilité économique du process mais également d'être la base des paiements entre fournisseurs et clients.

Tirés par ces tendances, de nouveaux outils analytiques se développent et parallèlement de nouvelles applications peuvent être espérées par utilisation directe ou par étude des transferts possibles sur des besoins identifiés. Grâce au partenariat construit, l'UMT FROM'CAPT veut favoriser l'émergence de nouveaux outils de mesure pour caractériser et piloter la transformation fromagère. Les projets viseront trois champs d'application (Figure 1) :

- La qualité des laits;
- L'optimisation des procédés;
- La qualité des produits finis.

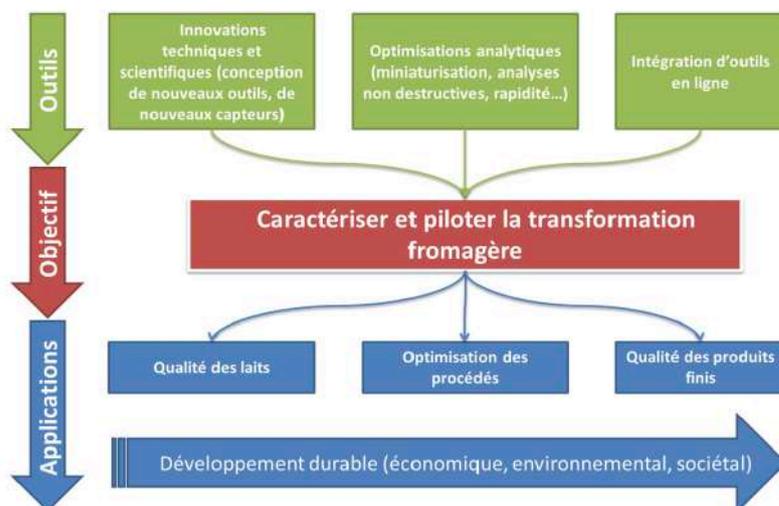


Figure 1 : Thématique et champs d'application de l'UMT FROM'CAPT

LE PARTENARIAT



Institut technique agro industriel issu de la fusion d'Actilait et de l'ADRIA Normandie avec pour cœur de métier les produits laitiers et la sécurité des aliments. L'UMT s'appuiera sur les pôles de compétences ACTALIA Produits laitiers et ACTALIA Cécailait présents à Poligny.



Unité de Recherche en Technologie et Analyses Laitières (URTAL). Les activités de l'unité ont pour finalité la maîtrise de la qualité des fromages, notamment au lait cru ou d'Appellation d'Origine Protégée.



ISBA, complexe d'enseignement agricole, fédérant les 2 Ecoles Nationales d'Industrie Laitière de Bourgogne Franche-Comté (ENIL de Besançon-Mamirolle et ENILBIO de Poligny).



L'institut de recherche FEMTO-ST (Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique – Sciences et Technologies, UMR CNRS 6174) est une unité mixte de recherche, née le 1er janvier 2004 de la fusion de 5 laboratoires francs-comtois.

Le partenariat s'organise autour de trois piliers :

- un lien étroit avec les acteurs de la filière laitière renforcé par des compétences en termes de recherche appliquée et de développement. Ce pilier s'appuie sur les équipes d'ACTALIA Produits laitiers, ACTALIA Cécailait et de l'ISBA (ENIL francomtoises) ;
- des compétences de recherches issues de l'INRA, dont la finalité est la production de connaissances scientifiques ;

• des compétences dans le domaine des micro-technologies et dans l'intégration de nouvelles technologies au sein de dispositifs de mesures et de suivi. Ces compétences sont apportées par l'association avec l'institut FEMTO-ST en tant que partenaire associé.

En outre, ce nouveau partenariat permet d'entrevoir la recherche de solutions innovantes dans les outils de mesure (Figure 2) :

- de façon ascendante (pull technology). Le lien étroit d'ACTALIA et de l'ISBA avec les professionnels de la filière permettra d'identifier des besoins qui seront approfondis et traduits en cahiers des charges afin d'étudier les possibilités de développer de nouveaux outils de mesure permettant de répondre directement au besoin identifié ou de donner les connaissances scientifiques nécessaires à une meilleure compréhension ;
- de façon descendante (push technology). FEMTO-ST et ses partenaires développent des technologies pour les secteurs du médical, de l'automobile, de l'aéronautique, de l'industrie chimique. Parmi l'ensemble des outils et méthodes développés, des transferts vers la transformation laitière pourront être envisagés.

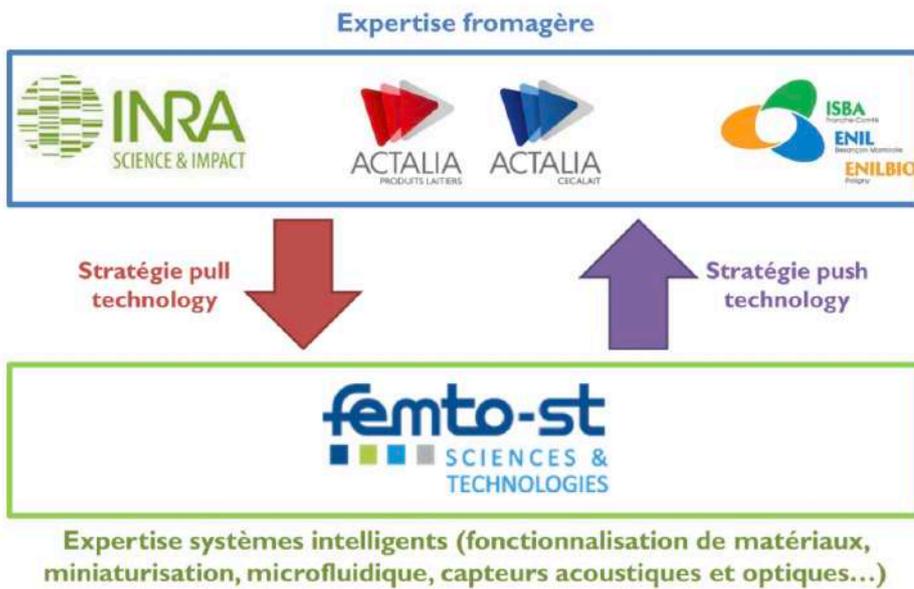


Figure 2 : Partenariat et fonctionnement de l'UMT FROM'CAPT

LES OBJECTIFS DE L'UMT FROM'CAPT

Les objectifs donnés à ce nouveau partenariat sont les suivants :

- identifier les besoins de la filière fromagère et les outils analytiques pertinents pour y répondre ;
- développer ou améliorer des outils analytiques permettant l'acquisition de nouvelles connaissances relatives aux mécanismes d'élaboration de la qualité des fromages ;
- développer ou améliorer des outils analytiques permettant d'envisager un transfert de ces derniers au sein des sites de transformations en vue de l'optimisation des procédés de transformation et d'amélioration de la qualité des fromages ;
- valoriser les résultats via le transfert des connaissances et des outils acquis, des publications scientifiques, de la vulgarisation technique, l'élaboration de nouveaux outils analytiques, le dépôt de brevets, voire la contractualisation de licences d'exploitation.

Analyseurs laitiers

- **Analyseurs pour le lait, les poudres, le beurre et bien plus**
- **Optimisez votre process en ligne et au laboratoire**
- **Un design qui s'adapte à votre environnement : IP 65 et résistant à l'eau**

www.perten.com/dairy

Delta INSTRUMENTS
a PerkinElmer company

Perten INSTRUMENTS
a PerkinElmer company

DELTA INSTRUMENTS IS NOW A PART OF PERTEN INSTRUMENTS

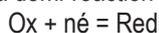
SUIVI ET INTÉRÊT DE LA MESURE DU POTENTIEL D'OXYDO-RÉDUCTION EN TRANSFORMATION LAITIÈRE

Eric BEUVIER¹, URTAL, INRA, Poligny & Benoit PAYSANT.² · ACTALIA Produits laitiers, Poligny
^{1,2} Partenaires de l'Unité Mixte Technologique « FROM'CAPT – Outils de mesure pour caractériser et piloter la transformation fromagère »

INTRODUCTION

Le potentiel d'oxydoréduction, ou Eh, est une grandeur thermodynamique qui peut être définie comme l'aptitude d'un système à capter ou à céder des électrons :

Soit la demi-réaction suivante :



Au même titre que le pH, le Eh est un paramètre intrinsèque à tous les milieux, dès lors qu'ils contiennent une molécule qui peut passer d'un état d'oxydation à un autre. Alors que le pH en détermine les caractéristiques acido-basiques, le Eh en détermine les propriétés oxydoréductrices (Aubert et al., 2002) :

- Un milieu oxydant est accepteur d'électrons : Eh positif
- Un milieu réducteur est donneur d'électrons : Eh négatif

Alors que le potentiel d'oxydoréduction peut affecter la croissance de microflores d'intérêt technologique, d'altération et potentiellement pathogènes (Beresford et al., 2001 ; Cachon et al., 2015), et la saveur des fromages (Kristoffersen, 1985), il existe peu d'études aujourd'hui qui prennent en compte ce paramètre.

MESURE ET SUIVI DU POTENTIEL REDOX DANS LES MATRICES LAITIÈRES

Mesure et outils/sondes

Le potentiel d'oxydoréduction exprimé en Volts (V) ou millivolts (mV), est donné par l'équation de Nernst associant un Eh à un couple redox (Ox/Red) :

$$Eh = E0 + 2,3 \frac{RT}{nF} \log \left(\frac{[Ox]}{[red]} \right)$$

E0 : Potentiel d'oxydoréduction du couple redox (mV) dans des conditions standards (P = 1 atm, T = 298 K, pH = 0, [Ox] = [Red] = mol.L⁻¹).

R : Constante des gaz parfaits (8.31 J.K⁻¹.mol⁻¹)

T : Température absolue (K)

n : Nombre d'électrons mis en jeu

F : Constante de Faraday (96500 C.mol⁻¹)

[Ox] et [Red] : Concentration des formes oxydées et réduites de l'espèce (mol.L⁻¹)

Le Eh est exprimé par rapport à une référence qui est l'électrode normale à hydrogène. La mesure met en œuvre deux demi-piles : l'une de ces piles doit mettre en œuvre le couple de référence H⁺/H₂ et l'autre le système dont on veut mesurer le potentiel. Les deux demi-piles sont en fait constituées chacune d'un soluté et d'une électrode ; les solutés sont reliés entre eux par un pont salin qui leur permet d'échanger des ions et les électrodes sont reliées entre elles par un circuit électrique sur lequel est placé un voltmètre.

L'électrode de référence à hydrogène est une électrode gaz ; pour des raisons pratiques et techniques, elle n'est pas utilisée. Cependant, la valeur du Eh doit toujours être exprimée par rapport à l'électrode à hydrogène. Dans le domaine alimentaire, les électrodes de référence utilisées pour la mesure du Eh sont identiques à celles utilisées comme référence dans la mesure du pH, il s'agit de l'électrode Argent/Chlorure et l'électrode au Calomel. Ces deux électrodes ont un demi-potentiel supérieur à celui de l'électrode à hydrogène.

Le Eh mesuré par ces électrodes (Em) devra donc toujours être corrigé pour le rapporter à l'électrode normale à hydrogène. Pour cela, on rajoute le potentiel standard de la référence utilisée dans la pratique (Er) au potentiel mesuré Em.

$$Eh = Em + Er$$

Eh : Potentiel redox par rapport à l'électrode à hydrogène ;

Em : Potentiel redox mesuré par rapport à l'électrode de référence ;

Er : Potentiel redox standard de l'électrode de référence.

Le potentiel Er est fonction de la température de mesure, du type d'électrode de référence utilisée, de la nature et de la concentration de la solution de remplissage (Galster 1991, 2000).

L'électrode de référence Ag/AgCl est la plus couramment utilisée car elle est dépourvue de métaux lourds. Son potentiel standard (Er) peut être calculé par l'équation suivante (pour Ag/AgCl (3M KCl)) :

$$Er \text{ (mV)} = 207 + 0.8 \times (25 - T)$$

t : température en °C

L'électrode de mesure agit comme un accepteur ou un donneur d'électrons. Le métal de l'électrode est constitué le plus souvent d'or ou de platine et peut être de formes différentes (pointe, disque, anneau). Ces deux métaux présentent des potentiels standards suffisamment élevés pour être inertes dans les milieux biologiques.

Dans les milieux biologiques, beaucoup de réactions d'oxydoréduction font intervenir des protons. Il est donc obligatoire de prendre en compte le pH pour exprimer le potentiel redox. Chaque mesure du Eh doit être accompagnée d'une mesure du pH. Le concept Eh7 ou valeur du Eh à pH 7 a été introduit pour éliminer l'influence du pH sur la valeur du Eh.

La valeur Eh7 est obtenue avec le calcul suivant (Leistner et Mirna, 1959) :

$$Eh7 = Eh - [(7-pH) \times \alpha]$$

Eh7 : Valeur du Eh corrigée à pH 7

pH : pH de la mesure

α : Coefficient déterminé expérimentalement (mV/unité pH). Ce coefficient est propre à chaque milieu.

Dans un milieu complexe comme le lait, où de nombreux couples redox sont en présence, la relation entre le Eh et le pH doit être déterminée expérimentalement (Jacob, 1970). Dans un lait stérilisé, cette valeur de α varie de 38 (26 °C) à 40 mV (42 °C) (Cachon et al., 2002 ; Abraham et al., 2013).

Dans la pratique, la mesure du potentiel d'oxydoréduction demande une grande rigueur dans la mise en œuvre des électrodes et dans leur entretien, comme décrit récemment par Abraham et al. (2013).

Différentes électrodes sont disponibles dans le commerce comme le montre la figure 1 (Cachon et De Coninck, 2012).



- 1 : Diamètre de 12 mm, à calotte de platine ;
- 2 : Diamètre de 6 mm, à calotte de platine ;
- 3 et 4 : Diamètre de 12 mm, à pointe de platine ;
- 5 : Diamètre de 12 mm, à anneau de platine
- 6 : Diamètre 12 mm, à disque de platine.

Les électrodes 5 et 6 sont des capteurs multi-paramètres : redox, pH et température.

Ce sont des électrodes combinées le plus souvent avec un corps en verre, de diamètre entre 6 et 12 mm et de longueurs variables, stérilisables ou non stérilisables.

Elles sont structurées de manière identique aux électrodes pH ; la seule différence provient de l'électrode de mesure car la membrane en verre, utilisée pour le pH est remplacée par un métal pour la mesure du redox. Ces électrodes ont généralement une plage de mesure entre -2000 mV et +2000 mV. Les fabricants d'électrodes proposent aujourd'hui des électrodes combinées redox/pH/température et l'électronique associée ; l'avantage est alors de recueillir 3 signaux différents sur un seul piquage. Ainsi, on garantit une compensation automatique de la température sur la valeur du pH. Il est recommandé, pour ces mesures, l'utilisation de câbles blindés pour éviter toute interférence, notamment dans les environnements de production.

Potentiel d'oxydo-réduction dans les matrices laitières

Lait

Le Eh du lait est compris généralement entre +200 mV et +350 mV au pH de 6,6-6,7 (McSweeney et al., 2010). Dans le lait cru, le potentiel redox est régi par la quantité d'oxygène dissout, en premier lieu, mais également par un ensemble de molécules naturellement présentes dans le lait telles que l'acide ascorbique, la riboflavine, le fer, le cuivre, les groupements thiols et les composés phénoliques (Walstra et al., 2006).

Produits laitiers transformés

Dans le fromage, le Eh est beaucoup plus bas que dans le lait. Ainsi les valeurs rapportées dans la littérature sont pour le camembert de -259 mV à -350 mV (Aubert et al, 2002) et de -300 mV à -360 mV (Abraham et al., 2007), pour le cheddar de -150 mV à -200 mV (Green et Manning, 1982), de -270 mV (Kristoffersen, 1967) et de -118 mV à -126 mV (Topcu et al., 2008), pour le comté de -156 mV (Aubert et al., 2002), pour l'emmental de -270 mV à -300 mV (Langeveld et Galesloot, 1971).

Dans le cas du cheddar, la stabilisation de la mesure du redox est longue, environ 48 heures, contrairement au camembert, entre 10 minutes et 1 heure (Abraham et al., 2007 ; Topcu et al., 2008).

Cependant selon McSweeney et al. (2010), cette mesure est plus rapide dans le cheddar en introduisant des électrodes miniatures dans le fromage durant le moulage et le pressage.

Dans les yaourts, les valeurs de Eh observées varient de -150mV à -410 mV selon les auteurs (Aubert et al., 2002 ; Dave et Shah, 1997).

Comment moduler le Eh dans les produits laitiers transformés

Quatre méthodes existent pour moduler le Eh dans le domaine laitier et plus généralement alimentaire.

- via les bactéries lactiques :

Au sein de la minifromagerie expérimentale de l'INRA de Poligny, l'évolution du potentiel d'oxydoréduction a été mesurée dans différents types de fromages (figures 2 et 3), issus de technologies différentes, en utilisant divers ferments lactiques, issus de plusieurs fournisseurs (Paysant, 2013).



Figure 2 : Suivi du Eh en cuve



Figure 3 : Suivi du Eh sous presse

Deux exemples de technologies utilisant du lait pasteurisé sont donnés dans cet article (figure 4) :

- fromage à pâte pressée cuite utilisant des ferments lactiques thermophiles (souches de *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus helveticus* et *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *lactis*) ;
- fromage à pâte pressée non cuite utilisant des ferments lactiques mésophiles (souches de *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris* et de *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *mesenteroides*).

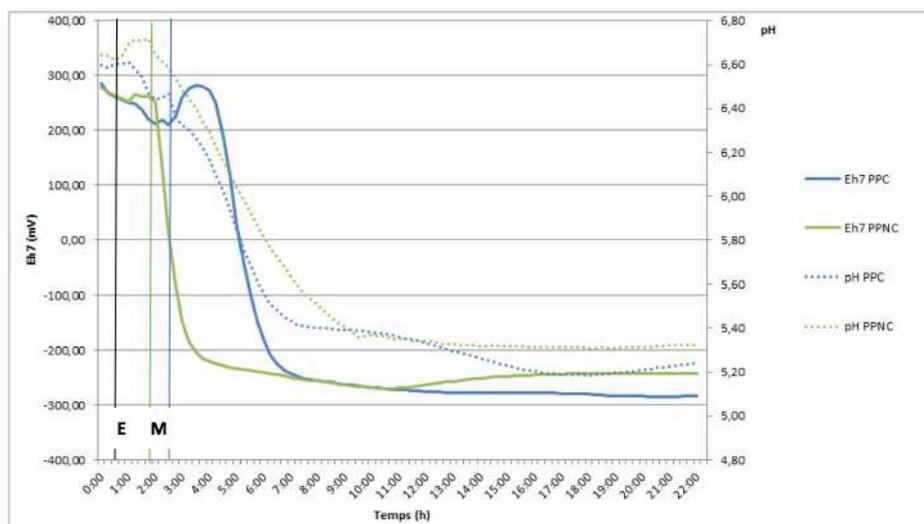


Figure 4 : Evolution du Eh7 et du pH lors de la fabrication d'un fromage à pâte pressée cuite (PPC) et d'un fromage à pâte pressée non cuite (PPNC) ; E = emprésurage ; M = Moulage

Les résultats obtenus dans le cas de la fabrication du fromage PPNC étaient attendus, avec l'utilisation de lactocoques très réducteurs en tant que ferments lactiques (Cachon et al., 2002 ; Brasca et al., 2007). Michelon et al (2010) ont montré qu'après la consommation de l'oxygène, les thiols exofaciaux présents à la surface des lactocoques, étaient fortement impliqués dans la réduction du lait. En revanche, les résultats obtenus en technologie PPC n'étaient pas attendus dans la mesure où les bactéries lactiques thermophiles sont connues pour être faiblement réductrices (Cachon et al., 2002 ; Brasca et al, 2007).

- Via les gaz :

L'ajout de gaz, azote ou mélange azote/hydrogène peut être utilisé avantageusement car sans action sur les produits, pour modifier les conditions d'oxydoréduction dans des fromages (Ledon et Ibarra, 2006) ou dans des yaourts (Martin et al., 2010, 2011).

- Via l'ajout de molécules réductrices ou oxydantes :

L'ajout de molécules chimiques réductrices ou oxydantes peut réduire ou augmenter le Eh de façon conséquente. En jouant sur leur concentration, il est possible d'obtenir différents niveaux d'oxydoréduction dans le milieu concerné. Ainsi, Dave et Shah (1997) ont utilisé différentes concentrations de cystéine (de 0 à 500 mg.L-1) et d'acide ascorbique (de 0 à 250 mg.kg-1) pour abaisser le Eh d'un lait (jusqu'à -210/-220

mV et -30/-100 mV, respectivement, pour les concentrations les plus élevées) servant à la fabrication de yaourts.

- Via traitement thermique ou électroréduction.

Lorsqu'un traitement thermique est appliqué au lait avant la transformation fromagère, la valeur du potentiel redox du lait va diminuer dû à une baisse de la teneur en oxygène et à l'apparition de groupements thiols par dénaturation des protéines, ceci en fonction de la sévérité du traitement thermique (McSweeney et al., 2010).

L'électroréduction (traitement physique qui consiste à réduire une solution aqueuse, notamment le lait, en utilisant l'électrolyse) diminue le Eh et la concentration en oxygène dissous dans le lait (Bolduc et al., 2006a). Mais ce procédé requiert une optimisation car le Eh réduit ainsi obtenu n'est pas stable dans le temps (observation d'une remontée du Eh après quelques jours de stockage au froid).

INTÉRÊT DU POTENTIEL D'OXYDORÉDUCTION EN TRANSFORMATION LAITIÈRE

Arômes et texture des produits laitiers

Le contrôle du Eh des fromages est primordial car leurs caractéristiques aromatiques sont étroitement liées à ce paramètre.

Ainsi, il a été montré par Green et Manning (1982) et Kristoffersen (1985) qu'un redox négatif était indispensable au bon développement de la saveur caractéristique de certains produits laitiers fermentés tels que les fromages via notamment la production de composés thiols. De même, Urbach (1995) rapporte que des fromages type cheddar de bonne qualité sensorielle possèdent un redox négatif et que ce paramètre peut être considéré comme un indicateur de l'établissement des conditions nécessaires à la formation des composés d'arômes.

Par ailleurs, des études ont montré que le Eh pouvait avoir un fort impact sur la formation de la saveur par les bactéries lactiques en modifiant des voies métaboliques. Kieronczyk et al. (2006) ont par exemple observé que des conditions réductrices (-200mV) stimulaient la production d'acides carboxyliques tels les acides isovalérique, phénylacétique et méthylpropionique contribuant à l'arôme d'un fromage très affiné.

Au contraire, les conditions oxydantes (+300mV) favorisaient la production d'aldéhydes et de composés soufrés volatils responsables d'arômes malté, floral, fruité, amande et chou. La production d'arômes souhaités semblent donc possible par le biais du contrôle du Eh dans le fromage.

Par ailleurs en affinant des fromages sous atmosphère réductrice (ajout d'un mélange azote/hydrogène), Ledon et Ibarra (2006) ont amélioré leurs propriétés sensorielles via notamment une production accrue d'acides gras volatils.

Martin et al. (2011) ont modifié le Eh de yaourts fabriqués avec du lait écrémé grâce à l'utilisation de différents gaz : air, azote, mélange azote/hydrogène. Dans ces conditions, la biosynthèse des arômes par les bactéries lactiques du yaourt (*Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*) variaient en fonction du Eh du milieu. Ainsi, des conditions oxydantes étaient favorables à la production d'acétaldéhyde, de sulfure de diméthyle, et de dicétones (diacétyl et pentane-2,3-dione), principaux composés volatils odorants du yaourt, ce qui confirme les résultats de Kieronczyk et al. (2006). Le Eh du milieu influence donc la production d'arômes dans le yaourt en modifiant les voies métaboliques de *St. thermophilus* et *Lb. delbrueckii* subsp. *bulgaricus*.

De la même manière, Martin et al. (2010) ont modifié les propriétés rhéologiques de yaourts en les fabriquant dans des conditions gazeuses différentes : air, azote et mélange azote/hydrogène. Ainsi des conditions réductrices obtenues avec le mélange N_2/H_2 donnaient des yaourts ayant une viscosité apparente plus faible et ayant moins d'exsudation de lactosérum, favorisée par une meilleure agrégation des protéines.

Effet protecteur de probiotiques

Ebel et al. (2011) ont montré que des laits fermentés dits probiotiques, fabriqués avec des laits avec ajout d'azote et plus particulièrement avec un mélange azote + hydrogène (Eh = - 300mV), étaient caractérisés par une survie plus importante de *Bifidobacterium bifidum* (+ 1,46 log) durant le stockage au froid par rapport à des laits fermentés fabriqués sans ajout d'azote + hydrogène, ceci sans modifier la survie de *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*. De même, il a été observé un impact positif d'un Eh négatif sur la viabilité/survie de souches de probiotiques (*Bifidobacteria*) conservé dans du lait pasteurisé (Bolduc et al., 2006b).

Lutte contre les bactéries potentiellement pathogènes

Staphylococcus aureus :

Des effets antagonistes d'une souche de *Lactococcus lactis* étaient observés sur la croissance de *Staphylococcus aureus* dans une matrice fromagère (6h après ensemencement), tout en affectant la production d'entérotoxines. Si la baisse de pH occasionnée par *Lc. lactis* semblait partiellement responsable de ces effets, d'autres facteurs comme le potentiel d'oxydoréduction, seraient impliqués (Cretenet et al., 2011). En effet, les propriétés réductrices de *Lc. lactis* interféraient avec la régulation du système agr (accessory gene regulator) responsable de la production d'entérotoxines chez *S. aureus* (Nouaille et al., 2014). Par ailleurs, il avait été précédemment observé que la production d'entérotoxines par *S. aureus* dans le lait était retardée par diminution du potentiel redox (Lamprell, 2003).

Listeria monocytogenes :

Ignatova et al. (2010) ont montré une influence du potentiel d'oxydoréduction sur le temps de latence de *Listeria monocytogenes* dans des conditions réductrices et à pH 6,0.

CONCLUSION

Le potentiel d'oxydo-réduction est un paramètre physicochimique important qui, avec le pH, la température et l'activité de l'eau détermine les conditions environnementales des produits laitiers transformés. Aujourd'hui, nous disposons d'une procédure de mesure qui permet de mieux appréhender ce paramètre dans les produits laitiers (Abraham et al, 2013), même si des améliorations des sondes de mesure restent encore à apporter. Ainsi l'utilisation d'agents biologiques, biochimiques ou de gaz réducteurs ou oxydants apparait comme un levier innovant pour contrôler, améliorer la flaveur des produits laitiers transformés ou de réduire, voire d'inhiber la croissance et/ou l'activité de microflore indésirables et ainsi limiter l'emploi de conservateurs en lien avec la demande des consommateurs.

RÉFÉRENCES

Abraham, S., Cachon, R., Colas, B., Feron, G., De Coninck, J., 2007. Eh and pH gradients in Camembert cheese during ripening : Measurements using microelectrodes and correlations with texture. *International Dairy Journal* 17 : 954-960.

Abraham, S., Cachon, R., Jeanson, S., Ebel, B., Michelon, D., Aubert, C., Rojas, C., Feron, G., Beuvier, E., Gervais, P., De Coninck, J., 2013. A procedure for reproducible measurement of redox potential (Eh) in dairy processes. *Dairy Science and Technology* 93 : 675-690.

Aubert, C., Capelle, N., Jeanson, S., Eckert, H., Diviès, C., Cachon, R., 2002. Le potentiel d'oxydoréduction et sa prise en compte dans les procédés d'utilisation des bactéries lactiques. *Science des Aliments* 22 : 177-187.

Beresford, T.P., Fitzsimons, N.A., Brennan, N.M., Cogan, T.M., 2001. Recent advances in cheese microbiology. *International Dairy Journal* 11: 259-274.

Bolduc, M.P., Bazinet, L., Lessard, J., Chapuizet, M.-P., Vuilleumard, J.-C., 2006a. Electrochemical modification of the redox potential of pasteurized milk and its evolution during storage. *Journal of agricultural and food chemistry* 54 : 4651-4657.

Bolduc, M.-P., Raymond, Y., Fustier, P., Champagne, C. P., Vuilleumard, J.-C., 2006b. Sensitivity of bifidobacteria to oxygen and redox potential in non-fermented pasteurized milk. *International Dairy Journal* 16 : 1038-1048.

Brasca, M., Morandi, S., Lodi, R., Tamburini, A., 2007. Redox potential to discriminate among species of lactic acid bacteria. *Journal of Applied Microbiology* 103 : 1516-1524.

Cachon, R., De Coninck, J., 2012. Le potentiel d'oxydoréduction (Eh) des matrices alimentaires. *Cahiers techniques de l'ingénieur. Base documentaire* : TIB427DUO, n° f4020.

Cachon, R., Jeanson, S., Aldarf, M., Divies, C., 2002. Characterisation of lactic starters based on acidification and reduction activities. *Lait* 82 : 281-288.

Cachon, R., Gavoye, S., Roussel, C., Gaudu, P., Beuvier, E., 2015. Activités réductrices des bactéries lactiques dans les procédés fromagers. *Revue des Industries Alimentaires et Agricoles* novembre-décembre, 30-31.

Cretenet, M., Nouaille, S., Thouin, J., Rault, L., Stenz, L., Francois, P., Hennekinne, J.-A., Piot, M., Maillard, M.B., Fauquant, J., Loubiere, P., Le Loir, Y., Even, S., 2011. *Staphylococcus aureus* virulence and metabolism are dramatically affected by *Lactococcus lactis* in cheese matrix. *Environmental Microbiology Reports* 3 : 340-351.

Dave, R.I., Shah, N.P., 1997. Effect of cysteine on viability of yogurt and probiotic bacteria in yogurts made with commercial starter cultures. *International Dairy Journal* 7 : 537-545.

Ebel, B., Martin, F., Le, L.D.T. Gervais, P., Cachon, R., 2011. Use of gases to improve survival of *Bifidobacterium bifidum* by modifying redox potential in fermented milk. *Journal of Dairy Science* 94 : 2185-2191.

Glaster, H., 1991. pH measurement: fundamentals, methods, applications, instrumentation. V.C.H. Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, DEU.

Glaster, H., 2000. Technique of measurement, electrode processes and electrode treatment. In *Redox Fundamentals. Processes and Applications* pp 13-23. Vol 10, Heidelberg, Springer-verlag Berlin.

Green, M.L., Manning, D.J., 1982. Development of texture and flavor in cheese and other fermented products. *Journal of Dairy Research* 49 : 737-748.

Ignatova, M., Prévost, H., Legurinel, I., Guillou, S., 2010. Growth and reducing capacity of *Listeria monocytogenes* under different initial redox potential. *Journal of Applied Microbiology* 108 : 256-265.

Jacob, H.E., 1970. Redox potential. In: Norris, J.R., Ribbon, D.W. (Eds.), *Methods*

in *Microbiology*, vol. 2. Academic Press, London, England, pp. 91-123.

Kieronczyk, A., Cachon, R., Feron, G., Yvon, M., 2006. Addition of oxidizing or reducing agents to the reaction medium influences amino acid conversion to aroma compounds by *Lactococcus lactis*. *Journal of Applied Microbiology* 101 : 1114-1122.

Kristoffersen, T. 1967. Interrelationships of flavor and chemical changes in cheese. *Journal of Dairy Science* 50: 279-284.

Kristoffersen, T., 1985. Development of flavor in cheese. *Milchwissenschaft* 40 : 197-199.

Langeveld, L. P. M., Galesloot, T. E., 1971. Estimation of the oxidation-reduction potential as an aid in tracing the cause of excessive openness in cheese. *Netherlands Milk and Dairy Journal* 25 : 15-23.

Lamprell, H. 2003. Production des entérotoxines dans les fromages en fonction de la diversité phénotypique et génétique des souches de *Staphylococcus aureus*. Thèse de Doctorat en Sciences des Aliments. Université de Bourgogne, 192 p.

Leistner, L., Mirna, A., 1959. Das redoxpotential von Pökellanken. *Die Fleischwirtschaft* 8 : 659-666.

Ledon, H., Ibarra, D., 2006 Method for modifying hygienic, physico-chemical and sensory properties of cheese by controlling the redox potential. France Patent WO2006106252.

Martin, F., Cayot, N., Vergoignan, C., Journaux, L., Gervais, P., Cachon, R., 2010. Impact of oxidoreduction potential and of gas bubbling on rheological properties of non-fat yoghurt. *Food Research International* 43 : 218-223.

Martin, F., Cachon, R., Pernin, K., De Coninck, J., Gervais, P., Guichard, E., Cayot, N., 2011. Effect of oxidoreduction potential on aroma biosynthesis by lactic acid bacteria in nonfat yogurt. *Journal of Dairy Science* 94 : 614-622.

McSweeney, P.L.H., Caldeo, V., Topcu, A., Cooke, D.R., 2010. Ripening of cheese: oxidation-reduction potential and calcium phosphate. *Australian Journal of Dairy technology* 65 : 178-183.

Paysant, B., 2013. Suivi du potentiel redox en technologies fromagères par l'emploi raisonné de bactéries lactiques. Master2, Spécialité Industries Laitières. ENSAIA, Université de Lorraine, Nancy, France. 49 pages.

Topcu, A., McKinnon, I., McSweeney, P.L.H., 2008. Measurement of the oxidation-reduction potential of cheddar cheese. *Journal of Food Science* 73: C198-C203.

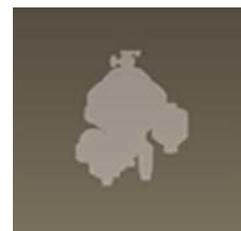
Urbach, G., 1995. Contribution of lactic acid bacteria to flavour compound formation in dairy products. *International Dairy Journal* 5 : 877-903.

Walstra, P., Wouters, J.T.M., Geurts, T.J., 2006. Milk properties. In *Dairy Science and Technology*, 2nd ed. Taylor & Francis Group, Pp; 159-174.

webalim



**Formation à distance
sur les équipements,
en génie industriel et
en physique**



- Installations, conception de bâtiments, PDU
- Automatisation des procédés
 - Technologie électrique
- Hydraulique et pneumatique
 - Régulation industrielle
 - Physique générale

www.webalim.fr

LES BIOCAPTEURS

Bruno VOLLE, Chargé d'application R&D, Système analytique et biotechnologie, ENIL Mamirolle

LES BIOCAPTEURS VERS UNE MESURE SPÉCIFIQUE EN MATRICE COMPLEXE

Proposés comme des outils analytiques simples fournissant une information quantitative ou semi-quantitative, spécifique d'un composé cible (analyte) présent dans l'échantillon, les biocapteurs constituent un groupe de capteurs chimiques, où un matériau biologique est utilisé comme biorécepteur [1]. Avec, chaque année, des milliers de publications scientifiques consacrées à ce sujet, la recherche appliquée sur les biocapteurs est en plein développement. Elle couvre tout autant les applications médicales (le glucomètre à main pour les personnes diabétiques...) que les secteurs de l'industrie, de l'environnement, de l'alimentation, ou de la défense [2-3].

Fondamentalement basés sur un repérage moléculaire, les biocapteurs sont des dispositifs extrêmement spécifiques, conçus pour des applications rapides, portables et présentant un coût globalement plus faible que la mise en œuvre d'analyses nécessitant une main d'œuvre qualifiée pour mobiliser des appareillages et/ou des procédures complexes de traitement de l'échantillon. Cet article mettra en lumière quelques applications dans le domaine industriel qui nous concerne [4-5], de la réception de la matière première et la préparation des laits à la libération des lots produits pour commercialisation.

Issu de la combinaison sophistiquée des domaines de la microélectronique, de la biotechnologie voire des nanotechnologies, un biocapteur est une entité constituée d'un élément biologique, le **bio-récepteur**, intimement interfacé avec une structure électronique, le **transducteur** (Figure 1). Si l'élément biologique a pour fonction de reconnaître spécifiquement, au sein d'un mélange complexe, l'analyte ciblé, composant de la matrice analysée, le transducteur, quant à lui, est capable de transformer l'interaction biologique entre le bio-récepteur et le composé à quantifier en un signal électrique exploitable. La spécificité des biocapteurs, soutenue par une dualité de conception à la fois biologique et électronique, permet d'imaginer, sans trop de difficulté, l'optimisation des configurations existantes les réalisations potentielles [6], ciblées et multi-paramètres qui pourraient voir le jour avec de tels concepts : détection rapide (voire quantification) de flores pathogènes, d'allergènes [7], d'antibiotiques [8] ou d'organismes génétiquement modifiés, identification de souches phagiques problématiques [9], dosage de métabolites d'intérêt technologique [10] (acide lactique, composés aromatiques...).

UNE BIO-INTERACTION SPÉCIFIQUE

Un élément biologique est responsable de la spécificité du capteur à reconnaître et/ou transformer l'analyte ciblé [11].

Pour jouer ce rôle, nous retrouverons :

- **les enzymes** dont la spécificité de substrat et d'action n'est plus à démontrer;
- **les anticorps** spécifiques de l'antigène correspondant (et inversement);
- **les acides nucléiques (ADN, ARN)** dont la spécificité repose sur la complémentarité des bases azotées;
- **des récepteurs cellulaires** dont l'interaction spécifique avec un ligand induit, « in vivo » une réponse cellulaire adaptée;
- **des fragments de phage** impliqués dans la reconnaissance spécifique de la cellule cible à infecter;
- **des cellules entières** ou encore **des coupes de tissus**.

Il est possible de distinguer, sur la base de ces bio-interactions spécifiques, deux grands types de « bio-reconnaissance » et donc autant de classes de biocapteurs [12].

Les biocapteurs dits d'**affinité biologique** ou de biocomplexation supposent une interaction stérique (association) de l'analyte et de bio-récepteurs tels que les acides nucléiques, les anticorps ou les récepteurs cellulaires, membranaires ou nucléaires...

Les biocapteurs sont appelés **biocapteurs métaboliques** si l'interaction entre l'analyte et la part biologique du capteur conduit à une transformation du composé cible et induit directement ou indirectement une modification chimique de l'environnement utilisable par le transducteur.

L'interaction biorécepteur/analyte conduit donc à des modifications de nature physique (influence des caractéristiques optiques ou thermiques du milieu...) ou chimique (induction d'une variation du pH ou du potentiel d'oxydoréduction...) du milieu analysé. Ces modifications seront, à leur tour, converties par l'intermédiaire d'un transducteur adapté en signal électrique exploitable.

L'immobilisation du bio-récepteur sur le transducteur fait appel à des procédés chimiques ou physiques déjà largement utilisés dans le domaine des biotechnologies notamment en ce qui concerne les enzymes ou les cellules immobilisées. Cette fixation peut être assurée par adsorption en surface, par réticulation ou par mise en place de liaisons covalentes. Il est également possible de maintenir le bio-récepteur dans ou sur le système en le piégeant dans un gel ou en le retenant par une membrane.

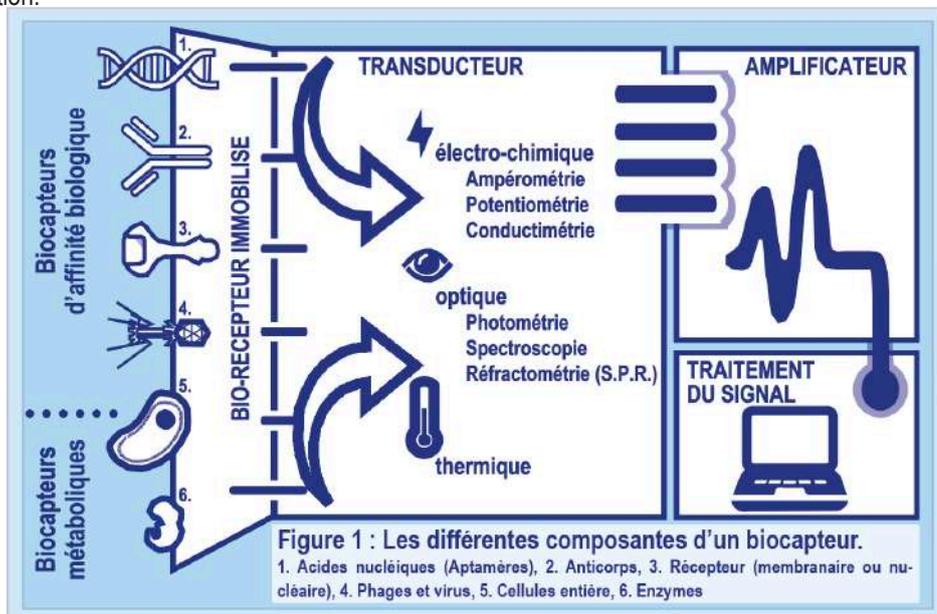
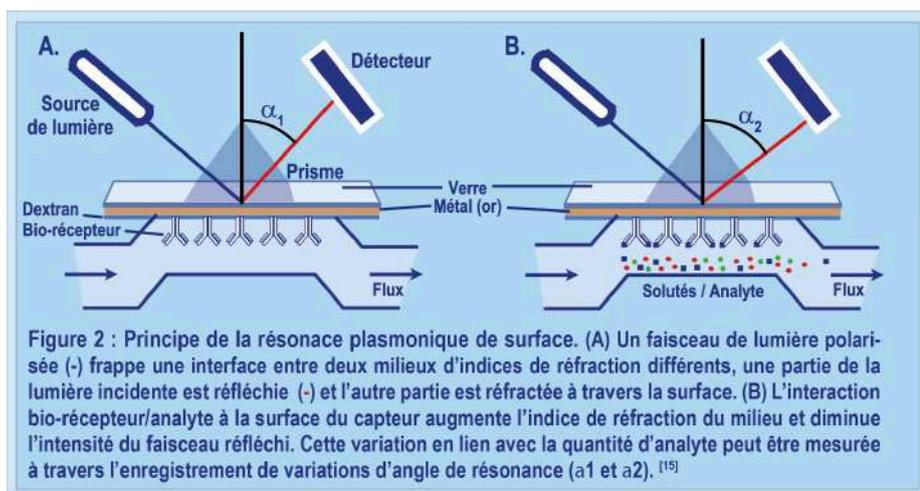


Figure 1 : Les différentes composantes d'un biocapteur.
1. Acides nucléiques (Aptamères), 2. Anticorps, 3. Récepteur (membranaire ou nucléaire), 4. Phages et virus, 5. Cellules entières, 6. Enzymes



Là encore, des techniques novatrices ont fait leur apparition. En effet, si le bio-récepteur est piégé à la surface de certain support en court de polymérisation, puis détruit lorsque la synthèse du polymère est effective, ce support conservera, alors, une empreinte moléculaire du bio-récepteur, morphologique et chimique permettant sa fixation avec une grande spécificité.

Quoi qu'il en soit, l'immobilisation doit permettre, tout en assurant une fixation stable, de conserver une activité optimale du bio-élément, c'est à dire d'assurer la reconnaissance de l'élément cible. Plusieurs modes d'immobilisation peuvent être envisagés. Le choix final dépendra de la nature de bio-récepteur et du transducteur, des caractéristiques de l'analyte et des conditions d'utilisation du biocapteur.

UNE DÉTECTION ET UNE CONVERSION ADAPTÉES

Le type de bio-reconnaissance et d'interaction bio-récepteur/analyte mis en jeu conditionne le type de **transducteur** utilisé, assurant à la fois le rôle d'identification des modifications du milieu et de conversion en signal électrique exploitable. Cet exposé se limitera aux types de transduction fréquemment retrouvés dans les biocapteurs à destination de l'industrie agroalimentaire.

De nombreuses réactions consommant un analyte produisent ou consomment des espèces chimiques chargées électriquement, des ions ou des électrons. Les propriétés électriques des solutions ainsi modifiées sont utilisées comme paramètre de mesure. On parle alors de **biocapteurs à transduction électrochimique**. Dans cette catégorie est donc retrouvé, le mode de transduction

le plus utilisé pour les biocapteurs métaboliques à enzyme, l'**ampérométrie**^[13]. Ils mesurent l'intensité d'un courant électrique, elle même en relation avec la concentration de l'espèce à doser.

Les **biocapteurs potentiométriques**^[14], quant à eux, mesurent la différence de potentiel entre une électrode en contact avec la solution analysée et une électrode de référence. La valeur mesurée est directement en lien, au regard de la loi de NERNST avec la concentration (activité) de l'analyte. Le dernier type de biocapteur à transduction électrochimique abordé concerne les **capteurs conductimétriques**. Les variations des concentrations des espèces chimiques chargées électriquement (consommation ou production) entraînent un changement mesurable de la conductivité globale.

Largement inspiré des techniques de photométrie classiquement développée dans les techniques d'analyses classiques, les méthodes de **transduction optique** développées dans le cadre des biocapteurs font appel aux propriétés de la lumière. Il est ainsi possible de mesurer :

- les quantités de lumière monochromatique, dans le domaine du visible ou de l'ultra-violet, transmises ou non suite à leur passage dans la solution étudiée (transmittance/absorbance);
- l'émission de signaux lumineux par mesure de **fluorescence** intrinsèque, caractéristique de l'analyte ou par fluorescence exogène spécifique suite à l'utilisation de marqueur moléculaire (sonde, substrat secondaire...);
- la **chimio ou bio-luminescence**, c'est à dire la production de lumière par certaines réactions combinées en utilisant certains réactifs chimiques (luminol) ou certaines enzymes intégrées telles que la luciférase,

retrouvée chez le ver luisant;

- la **résonance plasmonique de surface** SPR, une innovation dérivée des principes, tout à fait classiques, de la réfraction et de la réflexion de la lumière^[15] (Figure 2).

DES CRITÈRES DE CHOIX

Si l'analyte ciblé aiguille le choix du biocapteurs, d'autres critères, métrologiques ou non, permettent de guider la décision du responsable d'atelier ou du service d'assurance qualité.

Ainsi, la **sélectivité** indique la propriété du capteur à ne répondre qu'à un seul analyte cible et à le distinguer d'autres molécules de structure similaire^[16]. Cette spécificité découlant de l'interaction biologique bio-récepteur/analyte, est essentielle pour la caractérisation d'échantillons complexes (lait, sérum, effluent, etc.).

Pour envisager une mesure en temps réelle qualifiant l'évolution de la quantité d'analyte dans le mélange, le **temps de réponse** du capteur vis à vis des modifications du milieu se doit d'être le plus court possible^[17]. Il correspond au temps nécessaire pour renvoyer une réponse équivalent quasiment à la réponse totale (entre 90 et 99%) assujettie à une quantité d'analyte.

La quantité minimale d'analyte cible détectée par le capteur est également une donnée significative (Figure 3). Techniquement, cette limite de détection (LOD) est généralement déterminée dans une zone de mesure où le rapport entre le signal mesuré en présence d'analyte et le signal de base généré en absence d'analyte par le du système (bruit de fond) est supérieur à un facteur allant de 3 à 5 (signal statistiquement significatif, 99%)^[17]. Cette détermination est fonction de la matrice, de la méthode et de l'analyte.^[17]

Un capteur est donc capable de mesurer, de manière fiable, une évolution de la concentration de l'analyte sur une gamme de concentrations, la **gamme dynamique**^[17], qui s'étale de la valeur spécifiée par la limite de détection comme valeur minimale à une valeur de concentration maximale liée à la saturation de la totalité des bio-récepteurs présents à la surface du capteur. Dans le cadre d'une quantification, cette gamme dynamique s'accompagne du **domaine de linéarité** qui exprime l'intervalle de concentration sur lequel l'intensité du signal mesurée est proportionnelle à la quantité d'analyte.

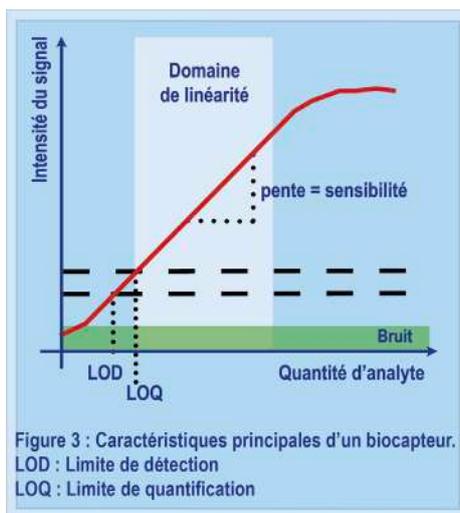
La valeur correspondant à la concentration minimale d'analyte balisant la partie inférieure du domaine de linéarité constitue la limite de quantification (LOQ). Elle est différente de la limite de détection.

Si la **résolution** du capteur réfère à la plus petite variation mesurable de la quantité d'analyte, la **sensibilité**, dans le domaine de linéarité défini, correspond au rapport (facteur de proportionnalité) entre la variation de l'intensité du signal (Dy) et la variation de la quantité d'analyte correspondante (Dx) [17].

Le bio-récepteur, de nature biologique, est un élément fragile. La **réutilisation** possible du biocapteur dépendra donc de la capacité à régénérer le bio-récepteur, c'est-à-dire de la rendre à nouveau apte à assurer sa fonction de reconnaissance. Ceci est d'autant plus vrai s'il s'agit d'un biocapteur d'affinité biologique où l'étape de régénération consiste à dissocier l'analyte du bio-récepteur. De plus, la **longévité** du système sera en corrélation avec la configuration globale et la fréquence de mesure demandée (capteur d'alerte, analyse ponctuelle, analyse en continu). Les biocapteurs doivent également répondre aux contraintes d'hygiène et sécurité spécifiques de l'industrie agroalimentaire et résister aux procédures de nettoyage en place. Pour pallier ces difficultés, il est possible d'utiliser des capteurs rétractables associés à des systèmes automatiques de nettoyage et d'étalonnage, ou des robots de prélèvement.

APPLICATIONS EN AGROALIMENTAIRE

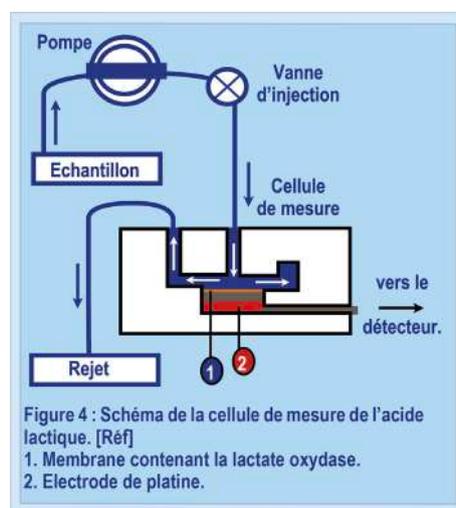
Malgré une augmentation significative de la production de publications et de brevets, il n'y a pas eu de hausse correspondante du nombre de biocapteurs commerciaux disponibles sur le marché [3]. Les secteurs des bioprocédés, de l'environnement et de l'industrie ont besoin de capteurs qui fonctionnent en continu ou à une fréquence de mesure prédéfinie. Ils doivent, de plus, présenter d'autres critères abordés précédemment, tels que une durée de vie suffisante, une vitesse de mesure cohérente, une absence d'effets de la matrice alimentaire, une bonne sélectivité, une gamme dynamique adaptée et une intégration entre le biocapteur et un système de traitement des échantillons. Malheureusement, la plupart des dispositifs de biocapteurs conçus, ayant répondu de façon incomplète à ces attentes, peu d'exemples de biocapteurs ont été déployés avec suc-



cès dans ces secteurs [3]. Ce travail s'attache à faire l'écho de systèmes ayant participé à des études en conditions industrielles, en transformation laitière. Deux axes seront privilégiés, illustrant pleinement le potentiel des biocapteurs, le suivi du procédé de transformation avec la mesure de concentration d'analytes spécifiques [18] (lactose, acide lactique) et l'évaluation de la sécurité alimentaire avec la détection de microorganismes pathogènes (*Listeria*, *salmonella*).

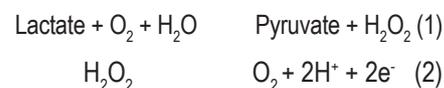
Suivi du procédé de transformation :

Au cours de la fabrication du fromage, un système utilisant un biocapteur a permis de contrôler la concentration d'acide L-lactique produite par la fermentation du lactose catalysée par une souche commerciale de *Streptococcus thermophilus* [19].



L'appareil de mesure, également utilisé pour la détermination de l'acide lactique dans des échantillons biologiques et des vins [19-20], se compose d'une cellule à écoulement (10 μ L) combinée à une électrode de platine recouverte d'une enzyme immobilisée, la lactate oxydase (Figure 4). Cette sonde de mesure est reliée à un ampèremètre [19]. Deux réactions sont mises en jeu.

Une réaction (1), catalysée par la lactate oxydase produit un composé intermédiaire, l'eau oxygénée H_2O_2 (ou peroxyde d'hydrogène). Elle est, à son tour, oxydée au niveau de l'électrode de platine (2).



Suite à l'étalonnage du biocapteur, la détermination de la concentration d'analyte dans l'échantillon se base sur une relation linéaire entre le courant produit par la réaction enzymatique et la concentration de lactate.

Le domaine de linéarité du système s'étend de 0,45 à 9 $mg.L^{-1}$ d'acide lactique. La limite de détection est évaluée à 0,2 $mg.L^{-1}$. Le temps de réponse du biocapteur reste inférieur à 30 secondes au cours des différentes étapes de la fabrication du fromage. De plus, la mesure affiche une très bonne reproductibilité avec un coefficient de variation de l'ordre de 2 %. Après plus d'une centaine d'analyses, le biocapteur a conservé sa sensibilité initiale.

Les valeurs de concentration en acide lactique obtenues ont été comparées à la variation du pH pendant le processus. Le biocapteur s'est révélé plus sensible que la procédure de mesure du pH, surtout lorsque les variations de pH sont faibles. Il en résulte un contrôle étroit du procédé.

Détection de la présence de micro-organismes pathogènes :

En combinant la biologie moléculaire avec la compréhension des systèmes d'infection des bactériophages [21] pour la construction de biocapteurs, la détection rapide, dans des matrices alimentaires, de bactéries telles que les salmonelles, *E. coli* et *listeria* devient accessible.

L'exemple le plus significatif est illustré par l'utilisation du bactériophage A511, un virus infectant la bactérie pathogène *Listeria monocytogenes*.

Ce phage, utilisé comme bio-récepteur comporte une modification génétique intégrant dans son patrimoine génétique un gène d'une autre espèce bactérienne codant pour une enzyme, la luciférase, impliquée dans le phénomène de bioluminescence. De plus, ce virus transformé est génétiquement bloqué de telle façon que l'infection de la bactérie cible reste possible mais la multiplication virale et la lyse de la cellule hôte soient empêchées. L'expression des gènes du virus dans la cellule infectée conduit à la production de luciférase. L'activité catalytique de cette enzyme en présence de substrats adéquats (luciférine et ATP) [21], assure la production de lumière dont l'intensité peut être mesurée (biocapteur à transduction optique). La spécificité du système, et donc la sélectivité élevée du capteur, est assurée par l'interaction du phage avec sa cellule cible. Elle permet d'obtenir des résultats fiables même dans des échantillons d'une complexité microbiologique aussi importante que les aliments.

L'un des dispositifs, actuellement commercialisé aux Etats Unis [22], approuvé par le département de l'agriculture des Etats-Unis (USDA, United States Department of Agriculture) et l'AOAC International, (Association of Official Analytical Chemists) permet de détecter, sans enrichissement, une faible contamination par des cellules de *Listeria* en moins de 24h [22]. La lecture est automatique. Les résultats sont également enregistrés par la plateforme de lecture. De tels systèmes sont également disponibles pour la détection d'autres microorganismes, salmonelles, *E. coli*....

POUR DES PERSPECTIVES PROMETTEUSES DANS LA GESTION DES PROCÉDÉS ET L'ASSURANCE QUALITÉ

Les avancées dans les domaines des biotechnologies associées aux capacités de traitement des signaux et de stockage des données ont favorisé le développement de nouveaux capteurs et instruments pour l'industrie alimentaire [23]. Des efforts sont actuellement portés sur le développement de systèmes transducteur, ou le multiplexage [24], c'est à dire la capacité à réaliser des mesures ciblant différents analytes dans le même échantillon. L'apport des nanotechnologies devrait permettre d'aller encore plus loin avec la miniaturisation, la diminution des coûts et la mise en œuvre

possible de systèmes portables de mesure et d'analyse. La diminution des volumes d'échantillon et de réactifs impliqués dans ces « micro-systèmes » (circuits microfluidiques) devrait induire un raccourcissement de la durée des analyses. De plus, l'utilisation de nanomatériaux (graphène, nanotubes de carbone...) devrait induire une augmentation des surfaces d'interaction, et par voie de conséquence une diminution des limites de détection [25]. L'élargissement de l'utilisation des technologies des biocapteurs existant et l'ouverture à de nouveaux champs d'applications potentiels dans les industries alimentaires devraient pouvoir couvrir, au cours des prochaines années, des analyses immédiates, la détermination des valeurs nutritionnelles, l'état de fraîcheur du produit dans son emballage [23], la détection des résidus de pesticides, des toxines, des antibiotiques, la contamination microbienne et la caractérisation des effluents (Demande biochimique en oxygène DBO)... Ces nouveaux dispositifs de surveillance et de mesure rapides présentent une vitesse, une sensibilité et une facilité d'utilisation qui entrent en concurrence avec les méthodologies actuelles. En outre, plusieurs approches sont proposées pour caractériser leur performance et assurer la validation des méthodes de mesure développées [26], une condition sine qua non pour la reconnaissance et la diffusion de toute méthode d'analyse.

À l'aide de ces progrès dans l'instrumentation, la gestion du procédé et de la qualité du produit devrait pouvoir s'effectuer quasiment en temps réel.

BIBLIOGRAPHIE

- 1. Biosensors and Their Principles.** Koyun, Ahlatcıoğlu, İpek. A Roadmap of Biomedical Engineers and Milestones. 2012.
- 2. Biosensors: A Modern Day Achievement.** Shruthi, Amitha. Journal of Instrumentation Technology. 2014. 2 : 26-39
- 3. Recent Advances in Biosensor Technology for Potential Applications – An Overview.** Vigneshvar, Sudhakumari, Balasubramanian Senthilkumaran and Hridayesh Prakash. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2016, 4 : 1-9.
- 4. Biosensors for food and dairy industry.** Kulkarni, Joshi, Tagalpallewar. Asian J. Dairy & Food Res. 2014. 33 : 292-296.
- 5. Biosensors in food industry.** Sabbusangee, Chopra, Ombre. Food Sci. Res. J. 2013. 4 : 93-97.
- 6. Biosensors for Contaminants Monitoring in Food and Environment for Human and Environmental Health.** da Costa Silva, dos Santos, Medeiros Salgado, Signori Pereira. State of the Art in Biosensors - Environmental and Medical Application. 2013. 155-168.

7. Rapid Detection of Food Allergens by Microfluidics ELISA-Based Optical Sensor. Weng, Gaur, Neethirajan. Biosensors. 2016. 6 : 24-30.

8. Biosensor Applications in the Field of Antibiotic Research—A Review of Recent Developments. Katrin Reder-Chris, Gerd Bendas. Sensors. 2011, 11 : 9450-9466

9. On-chip impedimetric detection of bacteriophages in dairy samples. Garcia-Aljaro, Munoz-Berbel, Munoz. Biosens Bioelectron. 2009, 24 : 1712-1716

10. Lactate biosensors for food industry. Przybył. Biotechnology and Food Sciences. 2014, 78 (1), 71-88.

11. Biosensors : design, Classification and applications in food industry. Korotkaya. Foods and Raw Materials. 2014. 2 : 161-171.

12. Continuous monitoring based on biosensors coupled with artificial intelligence. Domínguez Cruz, Alonso, Muñoz, Marty. Biosensors: Recent Advances and Mathematical Challenges. 2014. 143-161.

13. Enzyme Based Amperometric Biosensors for Food Analysis. Prodromidis, Karayannis. Electroanalysis. 2002. 14 : 241-261.

14. Electrochemical biosensors for food safety. Pividori, Alegret. Contributions to Science. 2010. 6 : 173-191.

15. Evanescent Wave Fiber Optic Biosensor for Salmonella Detection in Food. Valadez, Lana, Tu, Morgan, Bhunia. Sensors. 2009. 9 : 5810-5824.

16. Selectivity coefficients for amperometric sensors. Wang. Talanta. 1994. 41 : 857-63.

17. Computational Studies on Response and Binding Selectivity of Fluorescence Sensors. Hudson, Cheng, Yu, Yan, Dyer, McCarroll, Wang. J Phys Chem B. 2010. 114 : 870-876.

18. Lactate biosensors: current status and outlook. Rassaei, Olthuis, Tsujimura, Sudhölter, van den Berg. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2013.

19. Curd-Ripening Evaluation by Flow Injection Analysis of L-Lactic Acid with an Electrochemical Biocell during Mozzarella Cheese Manufacture. Esti, Messia, La Notte, Lembo, Compagnone, Palleschi, J. Agric. Food Chem., 1996, 44 : 3102-3107

20. Reagent-Less and Robust Biosensor for Direct Determination of Lactate in Food Samples. Bravo, Revenga-Parra, Pariente, Lorenzo. Sensors 2017, 17 : 144-155.

21. Application of bacteriophages for detection of radioborne pathogens. Shmelcher, Loessner. Bacteriophage. 2014 ; 4 : 128-137.

22. Sample6 Dectect/L. AOAC performance tested method 041401. Certification summary. 2014.

23. Past, Present and Future of Sensors in Food Production. Adley. Foods 2014, 3 : 491-510.

24. Optimization of a Multi-Mode Detection Model for Measuring Real-time Cellular Respiration and Mitochondrial Function using Fluorophoric Biosensors. Wendy Goodrich. Biotek instrument. 2016.

25. Recent Advances in Nanoparticles-based Lateral Flow Biosensors. Gao, Xu, Zhou, Liu, Zhang. Am. J. Biomed. Sci. 2014. 6, 41-57.

26. Regulatory and Validation Issues for Biosensors and Related Bioanalytical Technologies. Sergeev, Herold, Rasooly. Handbook of Biosensors and Biochips. 2008.

STAGES ANFOPEIL

Thierry MICHELET, Coordinateur-Responsable pédagogique, ANFOPEIL

Des capteurs de toute nature se trouvent dans notre environnement de travail et sont incontournables dans tous les systèmes automatisés. La bonne connaissance de leur principe de fonctionnement permet au conducteur ou au pilote d'être à l'aise avec sa machine ou son installation.

L'ANFOPEIL propose des stages sur les outils et les équipements qui décrivent et expliquent le principe et le fonctionnement des capteurs rencontrés en atelier de fabrication ou de conditionnement.



<p>Stage 58 «Le principe de fonctionnement d'une machine automatisée»</p>	<p>ENIL St-Lô Semaine 39 du 25/09 (13h30) au 28/09 (12h) 3 Jours Niveau Initiation</p>	<p>Objectifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rappels de vocabulaire technique et de notions physiques • Principe général de fonctionnement d'une machine • Notions d'automatisme, d'électricité et de pneumatique appliquées aux machines automatisées • Compréhension des cycles de production des installations
<p>Stage 59 «Optimisation et gestion des dysfonctionnements de machines automatisées»</p>	<p>ENIL St-Lô Semaine 46 du 13/11 (13h30) au 17/11 (13h30) 4 Jours Niveau Initiation</p>	<p>Objectifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caractérisation des éléments constitutifs des machines (différents organes, énergies, capteurs / actionneurs...) et principe de fonctionnement • Identification, diagnostic et résolution de dysfonctionnements par une approche logique

NB : Les descriptifs complets des stages sont disponibles sur notre site : www.anfopeil-enil.fr
N'hésitez pas à contacter le Réseau des ENIL/ANFOPEIL pour toute demande de formation « à la carte » sur ces thématiques ou d'autres.

Le réseau des ENIL/ANFOPEIL

BP 10025 • 39801 POLIGNY CEDEX
Tél : 03 84 37 27 24 • Fax : 03 84 37 08 61
accueil@anfopeil-enil.fr

Coordinateur - Responsable pédagogique :

Thierry MICHELET : thierry.michelet@anfopeil-enil.fr
06 44 71 15 83

Responsable administrative

Christine GRILLOT
christine.grillot@anfopeil-enil.fr





TRANSFORMATION & ALIMENTATION VOS MÉTIERS

Trouvez votre
FUTUR EMPLOI
dans le secteur de l'agroalimentaire



@eniljob

www.eniljob.fr

Ecrivez-nous : service.emploi@anfopeil-enil.fr

Un service qui vous met en **relation** avec des **candidats** motivés, diplômés et compétents dans **les secteurs qui vous intéressent** !

- Diffusion et Consultation d'offres en ligne
- Accès à la CVthèque
- Contact direct avec les candidats
- Affichage des offres dans les ENIL
- Suivi des offres
- Gratuité des offres de stage

TARIFS

Entreprise de -10 salariés
1 offre/ 3 mois **42 €**

Entreprise + 10 salariés
1 offre/ 3 mois **100 €**

Cabinet de recrutement/Agence intérim
1 offre / 3 mois **210 €**

PACKS ANNONCES

5 offres/ 1 an **400 €**
10 offres/ 1an **700 €**
50 offres/ 1 an **3000 €**

**Pour diffuser une offre d'emploi ou une offre de stage :
Créez un compte en ligne sur www.eniljob.fr ou contactez-nous**

ACTUALITÉS ANFOPEIL

BIENTÔT SUR VOS ÉCRANS :
NOUVEAU SITE INTERNET !



[S'abonner à la news!](#) [Mon compte](#)

[Accueil](#) [Qui sommes-nous ?](#) [Nos services](#) [Nos formations](#) [Nos stages](#) [S'inscrire aux stages](#) [Modalités](#)



Accueil



Pour en savoir plus : www.anfopeil-enil.fr

Préparation des laits en fromagerie
- [Aurillac](#)

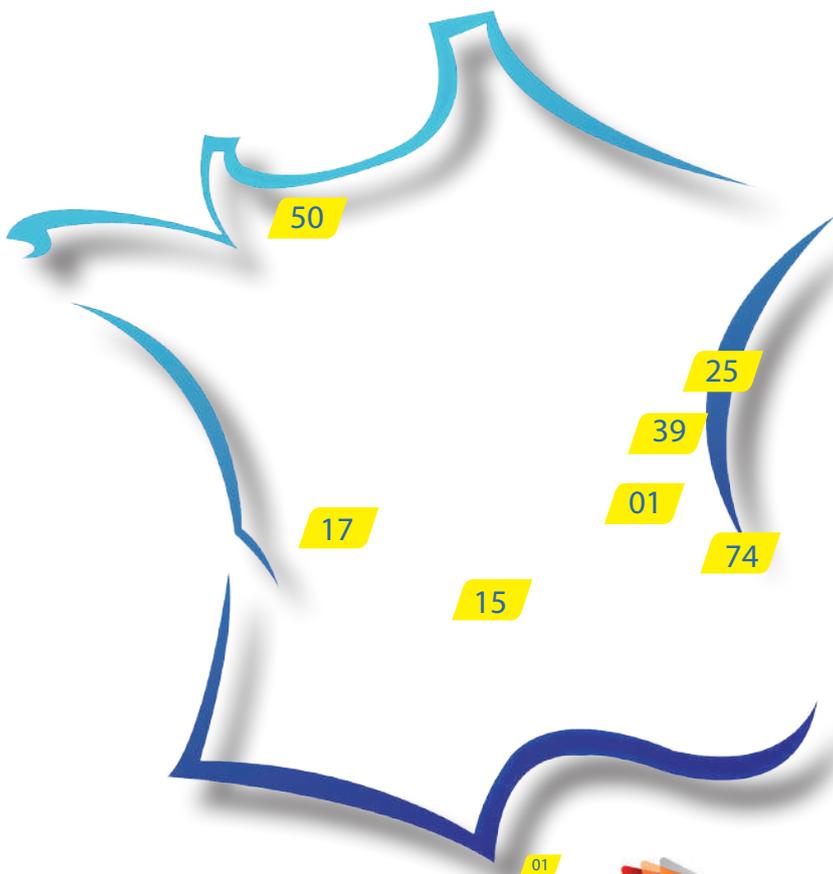
Technologie fromagère appliquée aux pâtes fraîches
- [Poligny](#)

Conduite des installations de concentration et de séchage
- [Mamirolle](#)

Techniques de séparations sélectives
- [St-Lô](#)

Les bases de la concentration et du séchage des produits laitiers
- [Surgères](#)

LE RÉSEAU ANFOPEIL



ENIL
ENIL
25620 MAMIROLLE
Tél. 03 81 55 92 00
Fax 03 81 55 92 17
DIRECTRICE : G. FOURNIER
Conseiller Formation : C. MOINE
E-mail : claudemoine@educagri.fr



ENILBIO
ENILBIO
39801 POLIGNY
Tél. 03 84 73 76 76
Fax 03 84 37 07 28
DIRECTRICE : G. FOURNIER
Conseiller Formation : I. FRIMOUT
E-mail : isabelle.frimout@educagri.fr



ACTALIA
ACTALIA
01000 BOURG-EN-BRESSE
Tél. 04 92 34 71 86
Fax 04 92 34 72 97
DIRECTEUR PRODUITS LAITIERS : J.M. HÉRODET
Conseillère Formation : S. FONTAINE
E-mail : s.fontaine@actalia.eu



ENIL
Saint-Lô Thère
ENIL
50620 LE HOMMET D'ARTHENAY
Tél. 02 33 77 80 82
Fax 02 33 77 80 84
DIRECTRICE : F. MARTIN
Conseillère Formation : A. deschenes
E-mail : agnes.deschenes@educagri.fr



ENILIA
17700 SURGÈRES
Tél. 05 46 27 69 00
Fax 05 46 07 31 49
DIRECTEUR : M. FAOURI
Conseiller Formation : E. AUDEBERT
E-mail : emmanuel.audebert@educagri.fr



ENILV
15000 AURILLAC
Tél. 04 71 46 26 60
Fax 04 71 46 26 40
DIRECTEUR : J.P. CHAPUT
Conseillère Formation : C. ARSAC
E-mail : celine.arsac@educagri.fr



ENILV
74805 LA ROCHE-SUR-FORON
Tél. 04 50 03 47 13
Fax 04 50 97 61 23
DIRECTRICE : V. DROUET
Conseillère Formation : J. DEBALLON
E-mail : julie.deballon@educagri.fr

Membres du réseau des ENIL

enil
Le Réseau
des Ecoles Nationales
d'Industrie Laitière