

MINIMISATION DES CONSOMMATIONS D'EAU DANS LES USINES AGROALIMENTAIRES (PROJET MINIMEAU) : DEVELOPPEMENT D'OUTILS D'AIDE A LA DECISION ET EXEMPLES D'APPLICATION.

Fargues C.*¹, Guiga W.*^{1,2}, Deloche Y.*³, Nemati-Amirkolaii K.¹, Maesele C.⁴, Garnier C.¹,
and Romdhana H.¹

¹Paris-Saclay Food and Bioproduct Engineering (SayFood) – AgroParisTech, Université Paris-Saclay, INRAE – 22 place de l'Agronomie, 91120 Palaiseau, France

²Le Cnam – UMR SayFood – 10 rue de la procession, 93210 Saint-Denis, France

³CRITT Agroalimentaire Sud – ACTIA - Le réseau français des instituts techniques de l'agro-alimentaire – Cité de l'alimentation, 100 rue Pierre Bayle, BP 11548, 84140 Montfavet, France

⁴Technologies et Méthodes pour les Agricultures de demain (UMR ITAP) – Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Institut Agro Montpellier – 361, rue J.F. Breton - BP 5095 - 34033 Montpellier Cedex 1, France

ABSTRACT

L'accès durable à une eau de qualité est un enjeu vital pour l'industrie agroalimentaire (IAA), compte-tenu de la pression croissante sur la ressource en eau en France. La plupart des industriels sont déjà engagés dans une démarche d'économie d'eau par la mise en œuvre de « bonnes pratiques ». Ces premières mesures, souvent peu coûteuses, résultent d'emblée en une réduction de 15 à 20% de leur consommation. Pour aller au-delà, la reconception des réseaux d'eau au sein de l'usine est nécessaire, incluant des options de réutilisation directe des eaux peu chargées, ou de recyclage après purification. Les conditions de mise en œuvre de cette solution sont précisées depuis peu dans le cadre du Plan Eau 2023 du Gouvernement, par le décret n° 2024-33 du 24 janvier 2024 spécifique aux IAA, suivi du décret n° 2024-769 du 8 juillet 2024 (publié au JORF n° 0162 du 9 juillet 2024). Ils fixent le cadre réglementaire de l'utilisation des eaux recyclées dans l'agroalimentaire par « l'utilisation de certaines eaux recyclées en tant qu'ingrédient dans la composition de denrées alimentaires finales » et indiquent « ... les différents usages autorisés » et « les exigences de qualité requises pour des eaux impropres à la consommation humaine, réutilisées pour la préparation, la transformation et la conservation de toutes denrées et marchandises destinées à l'alimentation humaine ».

Précurseur dans ce domaine, le projet MINIMEAU financé par l'ANR de 2018 à 2021 (ANR-17-CE10-0015, <https://minimeau.fr>) a associé pendant 4 ans des acteurs académiques (AgroParisTech/UMR SayFood ; INRAE/UMR ITAP), un industriel (ProSim, Labège-France), des instituts techniques (CTCPA, ITERG, ACTALIA, IFV) et un centre de transfert (CRITT Agroalimentaire Sud). L'objectif du projet était d'élaborer des outils d'aide à la décision pour accompagner les industriels de l'agroalimentaire dans la démarche de minimisation de leurs consommations d'eau par le recyclage de leurs « eaux de processus », nom donné désormais aux eaux non conventionnelles issues des processus de transformation des produits. Dans ce travail, les solutions de recyclage élaborées avec ou sans traitement, s'appliquent à l'ensemble du site industriel, à l'exception de la station d'épuration et du système d'assainissement public. Toutes les eaux de processus peuvent donc être concernées, avant mélange et envoi à la station d'épuration de l'usine (STEP). L'analyse environnementale de ces solutions s'étend bien au-delà du site de l'usine, englobant l'ensemble du territoire concerné.

Les études menées ont permis la mise au point d'une démarche méthodologique résumée dans un logigramme, et le développement de plusieurs guides et outils logiciels disponibles sur le site du projet. Les différentes étapes et quelques-uns des résultats obtenus sont décrits ci-après :

1/ Choix des effluents à recycler – Economies d'eau estimées

Pour une usine donnée d'une filière industrielle donnée, le choix des effluents les plus pertinents à recycler se base sur une étude Pincement Eau mono- ou multi-polluants du site, réalisée à l'aide d'un des deux outils développés dans le projet : SimulisPinch Water (ProSim ; <https://www.prosim.net/produit/simulis-pinch-analyse-pincement/>) et WaterOptim (AgroParisTech, Nemati-Amirkolaii *et al.*, 2021 ; <https://wateroptim.readthedocs.io/en/latest/>).

Cette étape nécessite l'établissement préalable du « Flowsheet Eau » le plus exhaustif possible de l'usine, c'est-à-dire la connaissance des débits et des qualités des flux d'eau consommés et émis à chaque poste. Un guide pour l'établissement de ce diagnostic clef a été rédigé. Les paramètres de qualité à considérer sont des critères microbiologiques, physico-chimiques globaux (pH, conductivité, turbidité...), et/ou de teneurs en indicateurs de pollution globaux ou plus spécifiques (MES¹, DCO², NTK³, NGL⁴, pesticides, protéines, sucres, acides organiques...). Reviennent à l'usine le choix des paramètres à suivre et leurs niveaux de qualité « seuil » autorisés dans l'eau recyclée, par poste ; ces critères dépendent des exigences sanitaires propres à chaque usage de l'eau recyclée. Ce point est critique et des études sont encore en cours pour le rationaliser.

Dans le cadre du projet MINIMEAU, des analyses Pinch-eau mono-polluant (DCO) ont été réalisées sur 10 sites industriels représentatifs de 4 branches de l'industrie agroalimentaire, à savoir les secteurs laitier, vitivinicole, fruits et légumes, et oléoprotéagineux. Les économies d'eau estimées par des scénarios de réutilisation directe d'effluents, sans intégrer dans un premier temps leur traitement, varient entre 30-60% pour le secteur laitier, 20-40% pour les conserveries, 25-30% pour la filière vitivinicole et 10% pour les raffineries d'huiles végétales alimentaires (Romdhana *et al.*, 2020). Dans le cas de la filière des corps gras, le potentiel d'amélioration est relativement modeste par rapport aux autres filières, notamment en raison de l'incompatibilité de la réutilisation de l'eau pour certains ateliers où les exigences de qualité sont élevées. Cependant, compte tenu du régime de fonctionnement de certains sites, notamment dans la transformation des huiles alimentaires, qui fonctionnent presque 24h/24 et quasiment tous les jours de l'année, les économies générées se traduisent par des volumes d'eau économisée significatifs, pouvant atteindre jusqu'à 11 000 m³/an (Nemati-Amirkolaii *et al.*, 2021).

Cependant, l'analyse Pinch-eau initialement réalisée avec un seul indicateur global de pollution se heurte à la complexité des effluents industriels en termes de composition d'une part, et de variabilité temporelle d'autre part, notamment en lien avec la nature cyclique de nombreux procédés utilisés en agroalimentaire, comme l'osmose inverse ou l'ultrafiltration dans l'industrie laitière. Les variations de la demande en eau et la saisonnalité des matières premières ajoutent une complexité supplémentaire. Les travaux de thèse de Keivan Nemati-Amirkolaii ont permis de développer des approches numériques multicritères pour mieux refléter la réalité de ces procédés industriels et pour intégrer les contraintes temporelles (besoins en eau par créneau horaire et niveaux de pollution variables) (Nemati-Amirkolaii, 2021). Cette stratégie considère la possibilité d'un stockage qui permet d'adapter la conception selon les périodes de production. Appliquée au secteur laitier sur un cas de traitement de sérum et de babeurre elle prédit, sans stockage, une économie de 41% d'eau propre et 27% d'eaux usées ; avec stockage, ces économies augmentent jusqu'à 45% pour l'eau propre et 30% pour les eaux usées. Plus flexible et adaptée, cette approche démontre le potentiel de l'analyse Pinch-eau pour optimiser la consommation d'eau, même dans des contextes industriels complexes. Dans tous les cas, ces stratégies de reconception des réseaux d'eaux -sans traitement- nécessitent un investissement, mais elles restent accessibles aux industriels avec une bonne planification.

Pour maximiser les économies d'eau, divers procédés de traitement des effluents comme la décantation, la filtration, les procédés membranaires, l'adsorption sur charbon actif ou un traitement biologique, peuvent être combinés (Section 2/). L'introduction d'un tel traitement permet de mobiliser de nouvelles eaux de processus à réutiliser, et génère des économies d'eau supplémentaires d'au moins 10%, en fonction du taux d'abattement de la pollution recherché et du volume d'effluents réutilisé. Par exemple, pour un diagnostic réalisé sur une usine de surgélation de légumes, les économies d'eau estimées par l'étude Pinch-eau sans traitement sont de 29,6% et atteignent 43,2% avec traitement, soit une économie supplémentaire de 14% environ.

¹ Matières En Suspension

² Demande Chimique en Oxygène

³ Azote Total Kjeldahl

⁴ Azote Global

2/ Solutions de traitement

Pour optimiser les consommations d'eau sur l'usine et assurer la sécurité sanitaire de l'atelier et du produit, un traitement des eaux de processus est généralement nécessaire avant leur réutilisation. Selon la qualité initiale de l'effluent, il peut aller d'un « simple » procédé de désinfection permettant de limiter le risque microbiologique (traitement UV, chloration...), à un traitement d'épuration combiné à la désinfection pour atteindre le seuil de qualité désiré (élimination des MES et/ou de la turbidité, baisse de la DCO, élimination des pesticides ou autres micropolluants...). Dans le projet MINIMEAU, seules des opérations de traitements physico-chimiques ont été envisagées, incluant décantation, tamisage, filtration sur sable et/ou membranaire tangentielle (micro-/ultra- filtration, osmose inverse). Le fait que l'étude porte sur les eaux de processus recueillies « à la source » -avant mélange et envoi à la STEP de l'usine- permet de conserver leur spécificité et donc une certaine stabilité de composition à l'effluent considéré. Mais on se prive alors d'une baisse de charge polluante que le traitement par la STEP, en particulier biologique, effectue.

Un guide et une revue bibliographique (Garnier *et al.*, 2023) ont été réalisés pour aider au choix des procédés de traitement appropriés par filière ; ils indiquent leur efficacité *a priori* en fonction des types de polluants. Les traitements membranaires apparaissent tout à fait adaptés du fait de leurs taux de rétention élevés et de leur modularité. Cependant les efficacités les plus élevées sont obtenues par des combinaisons de traitements successifs (prétraitement + nanofiltration + osmose inverse ; prétraitement + double osmose inverse ...) qui représentent un coût, voire un impact environnemental élevé.

Le traitement des effluents de blanchiment de deux types de légumes et d'un effluent de rinçage après pelage de carottes a été étudié et a montré l'efficacité d'un traitement combinant un prétraitement par tamisage et ultrafiltration, suivi d'une étape de finition par osmose inverse. Pour ces effluents, le prétraitement permet d'éliminer 100% des MES/turbidité et 45% de la teneur initiale en DCO totale, qui était d'environ 4000 mg O₂/L pour l'effluent de rinçage après pelage. L'efficacité d'élimination des polluants par osmose inverse dépend du type de membrane, de la productivité souhaitée en eau traitée (= taux de conversion de l'effluent en eau traitée) et de la pression de travail, qui constitue le principal impact environnemental de cette opération. Sur la base d'essais d'osmose inverse à l'échelle pilote avec la membrane ESPA4-LD (Hydranautics), la pression optimale pour traiter l'effluent prétraité a été établie à 9 bar, correspondant à un flux de perméat de 40 L/h.m². Les paramètres de perméabilité à l'eau et aux polluants contenus dans l'effluent de rinçage après pelage de carottes ont pu être déterminés pour cette membrane classique, et utilisés dans le module de simulation « filtration membranaire » développé sous ProSimPlus pour prédire à l'échelle industrielle les performances de traitement par ce procédé. Pour un débit d'effluent généré de 10 m³/h, le rendement d'élimination prévu pour la DCO de l'effluent prétraité serait de 90% pour un taux de conversion de 50% (5 m³/h d'eau traitée produite), mais chuterait à 77% pour un taux de conversion de 85% (8,5 m³/h d'eau traitée produite). Il reste à vérifier si cette moindre qualité serait malgré tout satisfaisante pour un recyclage à une des étapes du procédé de transformation dans l'usine. Il est à noter que cet effluent, caractérisé par une teneur élevée en sucres et donc susceptible de se dégrader microbiologiquement rapidement, est totalement désucré par cette étape de traitement.

3/ Validité de la solution au plan environnemental

L'analyse environnementale permet d'évaluer l'éco-efficience des scénarios de réutilisation identifiés par la méthode Pinch-eau, en comparaison avec le scénario de référence. Un calculateur Excel PEAC (INRAE) a donc été développé pour une évaluation environnementale multicritère (ACV et empreinte eau) du scénario de recyclage retenu, incluant le stress hydrique et la disponibilité de l'eau dans les différentes régions, mais aussi adaptée aux objectifs et à la typologie des filières étudiées (Maesele *et al.*, 2021). Le périmètre des scénarios modélisés et étudiés comprend bien-sûr l'acheminement (réseau), le stockage et le traitement des effluents concernés par les boucles de réutilisation, mais aussi l'approvisionnement en eau de l'usine (WSmix), la collecte et le traitement des effluents (STEP). Les procédés internes de l'usine ne sont pas modélisés car identiques dans les différents scénarios (de référence et avec recyclage avec ou sans traitement).

Pour les cas traités de la transformation de légumes et de l'industrie laitière, les deux scénarios de réutilisation proposés par le Pinch-eau, avec ou sans traitement, s'avèrent moins impactant pour l'environnement que le scénario de référence (résultats midpoint ou endpoint). Pour le cas de la transformation de légumes, un scénario de réutilisation directe de 30% des effluents engendre une réduction des impacts environnementaux de 35%

quand celui d'un scénario combinant réutilisation directe de seulement 25%, complétée de 25% d'effluents recyclés après traitement, aboutit à une réduction des impacts un peu plus faible, à 32%, liée à l'impact environnemental négatif du traitement. Dans le cas « laitier », cette dernière stratégie de combinaison de 10% d'effluent réutilisés directement plus 10% après traitement, aboutit quant à elle à une réduction des impacts environnementaux de 20%. Les économies d'approvisionnement en eau et de traitement par la STEP des effluents générés compensent donc largement pour ces deux cas les impacts de l'implémentation des réseaux de distribution pour la réutilisation (impacts négligeables, à peine visibles sur les graphiques) et du traitement physico-chimique de l'effluent. Par ailleurs, l'empreinte eau de ces trois scénarios (référence, recyclage avec et sans traitement) permet de mettre en évidence le peu d'économie de ressource en eau généré par la réutilisation en situation continentale tempérée. En effet, les principaux contributeurs à l'empreinte eau sont les consommations d'eau indirectes des étapes d'approvisionnement en eau et de traitement des effluents (STEP et/ou régénération).

L'étude MINIMEAU a montré que le recyclage des eaux de processus devait être étudié au cas par cas. Les principales économies d'eau (20 à 60% réalisables) sont apportées par la réutilisation directe de certains effluents, à des postes où leur qualité le permet. Le traitement n'apporte quant à lui qu'une économie d'environ 15% supplémentaires (sur les cas étudiés). Mais il est à noter que plusieurs des seuils de qualité des eaux réutilisées dans les scénarios sans traitement ont été fixés arbitrairement, en l'absence de réglementation claire sur ce point dans la période du projet. Ces seuils seront certainement revus à la baisse dans le cas d'un travail complémentaire portant sur les teneurs à respecter pour assurer la qualité et la sécurité sanitaire des produits. Le traitement serait alors dans certains cas rendu indispensable. Ces travaux doivent donc être poursuivis par la réalisation des analyses de risque HACCP, pour chaque cas étudié. L'alternative d'une réutilisation des eaux sortie de STEP usine après un traitement complémentaire, désormais envisageable, devra également être étudiée.

REFERENCES

- Garnier, C., Guiga W., Lameloise M.-L., Degrand L., Fargues C., 2022. Treatment of cauliflower processing wastewater by nanofiltration and reverse osmosis in view of recycling. *Journal of Food Engineering* 317, 110863.
- Garnier, C., Guiga W., Lameloise M.-L., Fargues C., 2023. Water reuse in the food processing industries: A review on pressure-driven membrane processes as reconditioning treatments. *Journal of Food Engineering* 344, 111397.
- Maesele, C., Roux, P., 2021. An LCA framework to assess environmental efficiency of water reuse: Application to contrasted locations for wastewater reuse in agriculture. *Journal of Cleaner Production* 316, 128151, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128151>.
- Nemati-Amirkolaii K., 2021. Optimization of industrial water networks. development of generic design tools and application in a real industrial site, Août 2021. <https://www.theses.fr/2021UPASB036>.
- Nemati-Amirkolaii, K., Romdhana, H., Lameloise, M.L., 2021. A novel user-friendly tool for minimizing water use in processing industry. *Cleaner Engineering and Technology* 4, 100260.
- Romdhana, H., Delauche, Y. and Labau. M. P., 2020. Exemple de stratégie de réduction de l'eau par l'analyse du pincement dans la conservation des légumes. *Revue IAA, Industries alimentaires et agricoles*, 20200910-29-33.