

Université du Littoral Côte d'Opale
Ecole d'Ingénieurs du Littoral Côte d'Opale
Génie Énergétique et Environnement

RAPPORT
PROJET INNOVATION ET CONCEPTION (PIC)

**Réduction de l'usage du gaz dans les procédés
énergétiques de l'industrie agroalimentaire : Analyse
appliquée à la région Hauts-de-France**

Auteurs :

BOUYSK Bader
EL HAFI Abderrahim
SAFI Hamza

Soutenu le 20 février 2026 à Dunkerque

Membres du Jury :

M. BONDUELLE Antoine (encadrant principal)
Mme. POREBSKI Alice

EILCO 2025 - 2026

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation et à la réussite de ce projet.

Nous remercions tout particulièrement **M. Antoine Bonduelle**, notre encadrant principal, pour son accompagnement, son expertise dans le domaine de l'énergie et de la décarbonation, ainsi que ses conseils méthodologiques qui ont guidé notre travail.

Nous adressons également nos remerciements à **Mme Magaly Pennequin, M. Philippe Vasseur et M. Cédric Philibert** pour leur disponibilité, leurs conseils et leur expertise, qui ont contribué à enrichir notre réflexion et à faire avancer notre étude.

Enfin, nous remercions l'ensemble des personnes et institutions qui nous ont soutenus tout au long de ce projet. Leur confiance et leurs contributions ont été précieuses à sa réalisation.

Abstract

The agri-food industry, which is highly energy-intensive and heavily reliant on natural gas for thermal processes (steam, drying, cooking, pasteurization, evaporation), represents a key sector for the energy transition. The phase out of gas in the regional agri-food industry is -like the rest of fossil fuels- mandated by National and EU commitments in the next decades.

We have developed a pre-study methodology for the decarbonization of energy processes, specifically adapted to agri-food industries in the Hauts- de-France Region, designed to be replicable to other territories and industrial sectors.

Our approach is based on a state-of-the-art review of decarbonization technologies, mapping of processes and energy uses across six representative sectors, and the construction of typical energy consumption profiles for 16 industrial sites. We then selected six companies for more in- depth analyses, ensuring their representativeness of regional stakes.

We compared several decarbonization pathways: electrification of thermal processes, the use of renewable thermal energies (biomass, solar, geothermal, etc.), and decarbonized electricity supply scenarios, including architectures combining self-production and grid supply. To support our analyses, we developed parametrizable techno-economic modeling tools that allow comparison of the reference scenario (gas + electricity) with hybrid and fully decarbonized scenarios, assessing consumption, CO₂ emissions, CAPEX/OPEX, and total cost.

Finally, our sensitivity analyses enabled the identification of the most robust technological solutions and the economic and technical conditions for decarbonization across sectors.

Résumé

L'industrie agroalimentaire, fortement consommatrice d'énergie et dépendante du gaz naturel pour ses procédés thermiques (vapeur, séchage, cuisson, pasteurisation, évaporation), représente un secteur clé pour la transition énergétique. La sortie du gaz dans l'industrie régionale de l'agro-alimentaire dans les prochaines décennies fait partie de l'engagement de la France et de l'UE, comme c'est le cas pour toutes les énergies fossiles.

Nous avons développé une méthodologie de pré-étude de décarbonation spécifiquement adaptée aux industries agroalimentaires des Hauts-de-France, conçue pour être répliquable à d'autres territoires et filières.

Notre approche s'appuie sur un état de l'art des technologies de décarbonation, la cartographie des procédés et usages énergétiques de six filières représentatives, et la construction de profils-types de consommation énergétique pour 16 sites industriels. Nous avons ensuite sélectionné six entreprises pour des analyses plus approfondies, en veillant à la représentativité des enjeux régionaux.

Nous avons comparé plusieurs voies de décarbonation : électrification des procédés thermiques, recours aux énergies renouvelables thermiques (biomasse, solaire, géothermie...) et scénarios d'approvisionnement électrique décarboné, incluant des architectures combinant autoproduction et réseau. Pour appuyer nos analyses, nous avons développé des outils de modélisation technico-économique paramétrable, permettant de confronter le scénario de référence (gaz + électricité) à des scénarios hybrides et 100 % décarbonés, en évaluant consommation, émissions de CO₂, coûts CAPEX/OPEX et coût complet.

Enfin, nos analyses de sensibilité ont permis d'identifier les solutions technologiques les plus robustes et les conditions économiques et techniques pour la décarbonation de la filière.

Sommaire

Introduction	7
1. Introduction et cadrage de l'étude	8
2. État de l'art et cadre de référence de la décarbonation industrielle	9
2.1. Référentiel technique : BREF Food, Drink and Milk Industries	9
2.2. Normes, politiques et cadres de référence de la décarbonation	9
2.3. Synthèse bibliographique et apports scientifiques	10
2.4. Analyse critique et verrous de la décarbonation	11
2.5. Spécificités françaises et régionales (Hauts-de-France)	11
3. Méthodologie.....	12
3.1. Cadre réglementaire et revue bibliographique	12
3.2. Sélection des entreprises et périmètre d'étude.....	12
3.3. Collecte des données industrielles	12
3.4. Structuration et modélisation des données.....	13
3.5. Outils d'analyse et scénarios de décarbonation	13
3.6. Valorisation des échanges avec les acteurs du secteur	14
3.7. Sélection finale des entreprises étudiées.....	15
3.8. Analyse détaillée des solutions de décarbonation.....	15
3.9. Développement d'outils de pré-dimensionnement des solutions de décarbonation.....	15
4. Typologie des procédés et usages énergétiques.....	16
4.1. Gaz naturel: Usage et impacts dans l'industrie agroalimentaire	16
4.2. Cartographie des procédés.....	17
4.3. Technologies énergétiques actuelles dans l'industrie agro-alimentaire	18
5. Profils-types de consommation énergétique	21
5.1. Construction de profils temporels.....	21
5.2. Profils-types par industrie agro-alimentaire régionale.....	22
5.3. Paramétrage géographique – Hauts-de-France	22
6. Solutions de décarbonation étudiées.....	23
6.1. Mechanical Vapor Recompression (MVR)	23
6.2. Pompes à chaleur haute température (PAC HT).....	24
6.3. Méthanisation	25
6.4. Électricité bas carbone via CPPA (Corporate Power Purchase Agreement).....	26
6.5. Énergies renouvelables	27
6.6. Géothermie	28
6.7. Electrothermal Energy Storage (ETES)	29

6.8.	La Récupération de Chaleur Fatale	30
6.9.	L'Hydrogène Bas Carbone.....	31
6.10.	Chaudières électriques.....	32
7.	Analyse de décarbonation.....	33
7.1.	Présentation synthétique des entreprises.....	33
7.1.1.	Bonduelle	33
7.1.2.	Danone	34
7.1.3.	Lesaffre.....	36
7.1.4.	Tereos.....	37
7.1.5.	Roquette	38
7.1.6.	DéliFrance	40
7.2.	Scénarios de décarbonation envisagés.....	41
7.2.1.	Pompes à chaleur industrielles (PAC)	41
7.2.2.	Méthanisation	42
7.2.3.	Compression mécanique de vapeur (MVR).....	42
7.2.4.	Énergies renouvelables électriques et contrats d'achat (CPPA)	43
7.2.5.	Stockage thermique et ETES.....	43
7.2.6.	Géothermie et hydrogène bas carbone.....	43
7.3.	Contraintes structurelles et facteurs de résistance à la décarbonation dans les Hauts-de-France.....	44
7.4.	Limites et pistes pour études de faisabilité	45
7.4.1.	Limites de la pré-étude	45
7.4.2.	Études complémentaires nécessaires	46
8.	Regards des experts sur la décarbonation énergétique de l'agroalimentaire.....	48
	Conclusion et recommandations.....	49
	Annexes.....	53

Liste des figures

Figure 1: Région de Hauts-de-France.....	11
Figure 2 : Image extraite de notre fichier Excel présentant, pour les 15 entreprises (ex: Bonduelle), les données d'entrée et de sortie	12
Figure 3: Schéma illustrant la répartition des consommations énergétiques d'une entreprise industrielle , selon la même méthodologie que celle appliquée aux autres entreprises de notre fichier Excel	14
Figure 4: Image extraite de notre fichier Excel présentant, pour les six entreprises, les données d'entrée et de sortie choisies pour le travail final	15
Figure 5: Composition du gaz naturel	16
Figure 6: Plages de températures associées aux principaux procédés thermiques industriels.	17
Figure 7: Principe des chaudières gaz avec systèmes de cogénération.....	18
Figure 8: Exemple d'un réseau de vapeur	19
Figure 9: image d'un générateur thermique.....	19
Figure 10: Chauffe-eau industriels gaz.....	20
Figure 11: Groupes frigorifiques à absorption.....	20
Figure 12: Séchoirs alimentés au gaz	21
Figure 13: Fours à gaz.....	21
Figure 14:Zonage climatique Hauts-de-France	22
Figure 15: Mechanical Vapor Recompression (MVR)	23
Figure 16: image d'une pompe à chaleur haute température (PAC HT).....	24
Figure 17: Principe de la méthanisation	25
Figure 18: PPA power purchase agreement.....	26
Figure 19: Capteur solaire thermique (chauffage de l'eau) et panneau photovoltaïque (électricité).....	27
Figure 20: Les types de géothermie.....	28
Figure 21: Schéma de principe d'un système de stockage d'énergie électrothermique	29
Figure 22: Schéma de principe de la récupération de chaleur fatale.....	30
Figure 23: Schéma de principe de production et utilisation de l'hydrogène.....	31
Figure 24:Chaudière électrique	32
Figure 25: Logo BONDUELLE	33
Figure 26: Logo DANONE	34
Figure 27: Logo LESAFFRE	36
Figure 28: Logo TEREOS.....	37
Figure 29: Logo ROQUETTE.....	38
Figure 30: Logo DELIFRANCE	40

Glossaire des abréviations

Abréviation	Signification en français	Signification en anglais
ADEME	Agence de la transition écologique	<i>French Agency for Ecological Transition</i>
ANIA	Association Nationale des Industries Alimentaires	<i>National Association of Food Industries</i>
BAT	Meilleures Techniques Disponibles	<i>Best Available Techniques</i>
BREF	Document de Référence sur les MTD	<i>Best Available Techniques Reference Document</i>
CAPEX	Dépenses d'investissement	<i>Capital Expenditures</i>
CHP	Cogénération	<i>Combined Heat and Power</i>
CIP	Nettoyage en Place	<i>Cleaning In Place</i>
CO₂	Dioxyde de carbone	<i>Carbon Dioxide</i>
COP	Coefficient de Performance	<i>Coefficient of Performance</i>
CPPA	Contrat d'achat d'électricité d'entreprise	<i>Corporate Power Purchase Agreement</i>
CSR	Combustible Solide de Récupération	<i>Solid Recovered Fuel</i>
EED	Directive sur l'efficacité énergétique	<i>Energy Efficiency Directive</i>
ENR	Énergies Renouvelables	<i>Renewable Energies</i>
ETES	Stockage d'énergie électrothermique	<i>Electrothermal Energy Storage</i>
EU ETS	Système d'échange de quotas d'émission de l'UE	<i>EU Emissions Trading System</i>
FDM	Industries alimentaires, des boissons et laitières	<i>Food, Drink and Milk Industries</i>
GES	Gaz à effet de serre	<i>Greenhouse Gases</i>
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat	<i>IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)</i>
HT	Haute Température	<i>High Temperature</i>
IED	Directive sur les émissions industrielles	<i>Industrial Emissions Directive</i>
JRC	Centre commun de recherche	<i>Joint Research Centre</i>
MEE	Évaporation multi-effets	<i>Multi-Effect Evaporation</i>
MTD	Meilleures Techniques Disponibles	<i>Best Available Techniques</i>
MVR	Compression mécanique de vapeur	<i>Mechanical Vapor Recompression</i>
OPEX	Dépenses d'exploitation	<i>Operating Expenditures</i>
ORC	Cycle de Rankine organique	<i>Organic Rankine Cycle</i>
PAC	Pompe à chaleur	<i>Heat Pump</i>
RED	Directive sur les énergies renouvelables	<i>Renewable Energy Directive</i>
RSE	Responsabilité Sociétale des Entreprises	<i>Corporate Social Responsibility</i>
SNBC	Stratégie Nationale Bas Carbone	<i>National Low-Carbon Strategy</i>
STEP	Station d'épuration	<i>Wastewater Treatment Plant</i>
TRL	Niveau de maturité technologique	<i>Technology Readiness Level</i>
UHT	Ultra Haute Température	<i>Ultra-High Temperature</i>

Introduction

La lutte contre le changement climatique constitue un enjeu majeur pour l'industrie mondiale. Le rapport du GIEC souligne que, pour limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C, il est nécessaire de réduire rapidement et significativement les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et des autres gaz à effet de serre dans tous les secteurs économiques, pour aboutir à la neutralité carbone globale.

La région Hauts-de-France se distingue par son niveau élevé d'émissions industrielles. En 2021, les émissions directes de GES y étaient estimées à 48,0 Mt éq. CO₂, soit environ 12,8 % des émissions nationales, plaçant la région comme la deuxième plus émettrice de France, derrière Auvergne-Rhône-Alpes (Observatoire Énergie Climat Hauts-de-France). L'industrie y représente près de 37 % des émissions régionales, notamment dans les secteurs manufacturiers et énergétiques, ce qui souligne l'importance d'actions ciblées pour réduire l'empreinte carbone locale.¹

Au niveau national, la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) fixe un cadre clair pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Elle identifie l'industrie comme un secteur prioritaire pour la réduction des émissions, en encourageant notamment la décarbonation des procédés énergétiques, l'amélioration de l'efficacité énergétique et l'intégration d'énergies à faible empreinte carbone. La SNBC insiste également sur la nécessité d'une planification progressive, adaptée aux spécificités de chaque filière, afin de concilier transition énergétique et performance industrielle.

Dans ce contexte, le présent projet vise à analyser les procédés énergétiques de l'industrie agroalimentaire en région Hauts-de-France et à proposer des solutions de décarbonation adaptées aux enjeux régionaux. Ces travaux s'appuient notamment sur nos travaux précédents consacrés aux pompes à chaleur haute température pour l'industrie agroalimentaire, présentés dans notre article « Pompes à chaleur haute température pour l'industrie agro-alimentaire : Analyse technico-économique approfondie et stratégies de déploiement ». L'objectif est de contribuer à la réduction des émissions de CO₂ tout en maintenant la compétitivité et l'efficacité des industries régionales, en s'inscrivant pleinement dans les orientations nationales et internationales pour la transition énergétique.

1. Introduction et cadrage de l'étude

L'industrie agroalimentaire occupe une place centrale dans le paysage énergétique et industriel français en raison de la forte intensité énergétique de ses procédés. Les besoins en énergie thermique, nécessaires à la production de vapeur, au séchage, à la cuisson ou à la pasteurisation, s'ajoutent à des consommations électriques importantes liées à la réfrigération, aux moteurs et aux équipements auxiliaires. En France, le gaz naturel constitue près de la moitié de la consommation énergétique du secteur, tandis que l'électricité représente un peu plus d'un tiers, ce qui traduit une dépendance marquée aux énergies fossiles. Cette situation confère à l'agroalimentaire un poids significatif dans la consommation énergétique industrielle nationale, le secteur représentant environ 16 % de l'énergie consommée par l'industrie manufacturière, derrière la chimie-pharmacie et la métallurgie. À l'échelle régionale, les Hauts-de-France concentrent une part particulièrement élevée de cette consommation, avec près de 20 % de l'énergie nationale du secteur, ce qui en fait un territoire prioritaire pour l'analyse et le déploiement de solutions de décarbonation adaptées.

La décarbonation de l'industrie agroalimentaire s'inscrit aujourd'hui dans un cadre réglementaire et stratégique contraignant, à la fois au niveau européen et national. Le Pacte vert pour l'Europe fixe l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, avec une réduction intermédiaire d'au moins 55 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport à 1990. Les révisions des directives européennes sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique renforcent les obligations pesant sur les États membres et, par extension, sur les secteurs industriels fortement émetteurs. Dans ce contexte, le Net-Zero Industry Act vise à accélérer le déploiement des technologies bas carbone en Europe, en simplifiant les cadres réglementaires et en soutenant l'investissement industriel, afin de renforcer la compétitivité tout en réduisant les émissions.

Au niveau national, la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) constitue la feuille de route de la France pour atteindre la neutralité carbone. Elle fixe des objectifs sectoriels ambitieux pour l'industrie, avec une réduction de 35 % des émissions à l'horizon 2030 et de plus de 80 % d'ici 2050 par rapport à 2015. Pour le secteur agroalimentaire, ces orientations sont complétées par la feuille de route de l'ANIA, qui identifie des leviers concrets tels que la substitution progressive du gaz par des énergies renouvelables thermiques, l'électrification des procédés et l'optimisation énergétique. Ces cadres réglementaires s'accompagnent également de mécanismes économiques, comme le système européen d'échange de quotas d'émission (EU ETS), qui introduisent un signal prix du carbone et renforcent l'intérêt économique des investissements de décarbonation par rapport au maintien de solutions fossiles.

Dans ce contexte, le projet présenté vise à développer une méthodologie de pré-étude de décarbonation des procédés énergétiques dans l'industrie agroalimentaire, en prenant comme territoire de référence la région Hauts-de-France. L'objectif principal est de proposer un cadre d'analyse technico-économique simple, permettant aux industriels et aux acteurs territoriaux de hiérarchiser les options de sortie du gaz et de préparer des études de faisabilité plus approfondies. Le projet ambitionne également d'analyser les procédés et usages énergétiques de filières représentatives telles que la conserverie, la surgélation, la laiterie-fromagerie, la

malterie, la sucrerie et l'amidonnerie – afin d'identifier les leviers de décarbonation les plus pertinents en fonction des profils thermiques et des contraintes industrielles.

Le périmètre de l'étude est volontairement circonscrit afin de garantir la cohérence méthodologique et la disponibilité des données. Il se concentre sur les filières agroalimentaires à forte intensité énergétique et sur le territoire des Hauts-de-France, qui compte plus de 700 entreprises agroalimentaires et constitue l'un des principaux pôles industriels du secteur en France. L'approche retenue relève d'une pré-faisabilité : les analyses s'appuient sur des données publiques, sectorielles et bibliographiques. L'étude ne vise pas à dimensionner précisément les installations ni à fournir des analyses financières détaillées, mais à proposer une première aide à la décision, destinée à orienter les industriels vers des scénarios de décarbonation pertinents et à préparer des études ultérieures plus approfondies.

2. État de l'art et cadre de référence de la décarbonation industrielle

2.1. Référentiel technique : BREF Food, Drink and Milk Industries

Dans le cadre de cette étude, le BREF "*Best Available Techniques Reference Document*" *Food, Drink and Milk Industries* (FDM) est mobilisé non pas comme un outil de conformité réglementaire, mais comme un référentiel technique structurant pour l'analyse de pré-faisabilité de la décarbonation dans l'industrie agroalimentaire. Il permet avant tout d'identifier les procédés énergétiques les plus consommateurs, tels que la production de vapeur, la cuisson, le séchage, la pasteurisation ou l'évaporation, qui constituent les principaux postes d'émissions de CO₂ liées à l'usage du gaz naturel.

Le BREF FDM fournit également des ordres de grandeur de performance énergétique et des bonnes pratiques associées aux meilleures techniques disponibles (BAT : "*Best Available Techniques*"). Ces éléments servent de cadre pour évaluer la cohérence et la crédibilité des scénarios de décarbonation analysés, sans entrer dans une logique de dimensionnement détaillé. En s'appuyant sur l'approche BAT, la méthodologie de l'étude hiérarchise les actions de décarbonation selon une logique progressive : optimisation des procédés existants, réduction des besoins énergétiques, puis substitution progressive des combustibles fossiles. Le BREF constitue ainsi une base méthodologique robuste pour structurer l'analyse comparative des solutions technologiques envisagées.

2.2. Normes, politiques et cadres de référence de la décarbonation

La décarbonation des procédés industriels s'inscrit dans un cadre normatif et réglementaire structuré, tant au niveau européen que national. À l'échelle européenne, le *Green Deal* et le paquet législatif *Fit for 55* fixent un objectif de réduction nette de 55 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030, avec une trajectoire vers la neutralité carbone en 2050. Ces objectifs sont traduits dans des directives clés, notamment la directive sur l'efficacité énergétique (EED)

et la directive sur les énergies renouvelables (RED), qui renforcent les obligations de réduction de la consommation d'énergie fossile et d'intégration de sources bas carbone dans l'industrie.

Le système européen d'échange de quotas d'émission (EU ETS) constitue un levier économique majeur, en instaurant un prix du carbone incitant les entreprises industrielles à réduire leurs émissions ou à investir dans des technologies de décarbonation. À l'échelle nationale, la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) définit des trajectoires sectorielles ambitieuses, avec une réduction significative attendue des émissions industrielles d'ici 2030 et 2050. Pour l'agroalimentaire, ces orientations sont complétées par des feuilles de route sectorielles, notamment celle de l'ANIA, qui identifient des leviers concrets tels que l'efficacité énergétique, l'électrification des procédés et la substitution du gaz par des énergies renouvelables thermiques.

Ces cadres sont renforcés par des dispositifs d'accompagnement et de financement, tels que France 2030 ou les aides à l'industrie bas carbone, qui visent à réduire les barrières économiques à l'investissement. Ensemble, ces normes et politiques constituent un référentiel de performance énergétique et environnementale qui oriente les choix technologiques et méthodologiques analysés dans l'étude.

2.3. Synthèse bibliographique et apports scientifiques

Les rapports du GIEC constituent une référence scientifique centrale pour l'analyse de la décarbonation industrielle. Le sixième rapport d'évaluation souligne que le secteur industriel représente environ 24 % des émissions mondiales directes de gaz à effet de serre et que leur réduction repose sur une combinaison de trois leviers principaux : amélioration de l'efficacité énergétique, substitution des combustibles fossiles par des énergies bas carbone et innovation technologique. Le *fuel switching*, notamment la substitution du gaz naturel par de l'électricité décarbonée ou des énergies renouvelables thermiques, est identifié comme un levier clé pour réduire les émissions liées à la production de chaleur.

Bien que le GIEC ne traite pas spécifiquement l'industrie agroalimentaire dans un chapitre dédié, les analyses transversales montrent que les procédés thermiques tels que la cuisson, le séchage et l'évaporation sont fortement dépendants des combustibles fossiles, ce qui confère à ce secteur un potentiel élevé de réduction des émissions. Le GIEC insiste également sur la nécessité d'approches systémiques, combinant réduction de la demande énergétique, optimisation des procédés et transformations organisationnelles.

Les publications de l'ECEEE, notamment celles issues des *Industrial Summer Studies*, complètent ces analyses en mettant l'accent sur le rôle central de l'efficacité énergétique et de l'électrification des charges thermiques dans la décarbonation industrielle. Elles soulignent que la réduction de la consommation de gaz passe autant par des solutions technologiques (récupération de chaleur, PAC, optimisation des réseaux thermiques) que par des démarches de management de l'énergie, telles que la mise en place de systèmes conformes à la norme ISO 50001. Ces travaux montrent également que les stratégies de décarbonation peuvent renforcer la compétitivité industrielle lorsqu'elles sont intégrées de manière cohérente et progressive.

Les rapports industriels et études de cas disponibles confirment ces constats, en montrant que des entreprises agroalimentaires ont réussi à réduire significativement leur consommation de gaz et leurs émissions de CO₂ grâce à des combinaisons de mesures organisationnelles et

technologiques. Ces retours d'expérience constituent un socle empirique important pour la méthodologie de pré-faisabilité développée dans l'étude.

2.4. Analyse critique et verrous de la décarbonation

Malgré l'existence de référentiels techniques et de cadres réglementaires solides, plusieurs limites et verrous freinent la décarbonation effective de l'industrie agroalimentaire. Les référentiels BAT, bien qu'utiles, présentent des limites en termes d'adaptabilité à des procédés spécifiques et à des configurations industrielles hétérogènes. De nombreuses technologies alternatives au gaz, telles que l'électrification avancée ou l'hydrogène vert pour la chaleur à haute température, restent encore immatures ou économiquement peu viables à grande échelle.

Les verrous techniques concernent principalement la dépendance à des infrastructures thermiques lourdes, la difficulté d'électrifier certains procédés à haute température et la complexité du *retrofit* des installations existantes, souvent incompatible avec des arrêts de production prolongés. À ces contraintes s'ajoutent des verrous économiques, liés aux coûts d'investissement élevés, à la volatilité des prix de l'énergie et à l'accès limité au financement, en particulier pour les PME. Enfin, des verrous organisationnels et sectoriels persistent : fragmentation du secteur agroalimentaire, manque de compétences internes en énergie et décarbonation, et priorité donnée aux investissements liés au produit plutôt qu'aux procédés.

2.5. Spécificités françaises et régionales (Hauts-de-France)



Figure 1: Région de Hauts-de-France

La France dispose d'un cadre politique favorable à la décarbonation industrielle, mais reste confrontée à une dépendance significative aux combustibles fossiles, notamment le gaz naturel. La région Hauts-de-France présente des spécificités marquées, héritées de son passé industriel, avec une consommation énergétique industrielle particulièrement élevée et une forte dépendance au gaz dans les filières agroalimentaires intensives en chaleur, telles que la sucrerie et l'amidonnerie. Cette situation accentue la vulnérabilité économique des entreprises face à la volatilité des prix de l'énergie.

Ces caractéristiques régionales imposent une stratégie de décarbonation adaptée, combinant réduction de la dépendance au gaz, maintien de la compétitivité industrielle et préservation de l'emploi. Elles justifient pleinement l'approche méthodologique développée dans l'étude, centrée sur une analyse de pré-faisabilité adaptée aux réalités industrielles et territoriales.

3.3. Collecte des données industrielles

La collecte des données s'est appuyée sur une double approche :

- Approche directe : Plus de 35 courriels ont été envoyés [sont dans l'annexe] aux entreprises concernées afin d'obtenir des informations sûres : Les consommations énergétiques, Les procédés thermiques, Les sources d'énergie utilisées, La saisonnalité des besoins.
- Approche indirecte : En complément, des documents électroniques publics ont été exploités (rapports RSE, publications techniques, données sectorielles, retours d'expérience industriels), permettant de compléter ou d'estimer les données manquantes.

3.4. Structuration et modélisation des données

Les informations collectées ont été organisées dans un tableau de modélisation énergétique, comprenant les entrées suivantes : Sources d'énergie actuelles, Technologies énergétiques utilisées, Saisonnalité des consommations, Gammes de températures selon les usages (process, vapeur, eau chaude, froid). Ces données ont servi de base à une analyse thermique et énergétique approfondie.

3.5. Outils d'analyse et scénarios de décarbonation

À partir des données structurées, plusieurs outils d'analyse ont été appliqués afin d'évaluer les possibilités de sortie du gaz : Cartographie thermique des procédés, Cascade énergétique, Analyse des points critiques, Profil saisonnier détaillé, Évaluation du potentiel de récupération de chaleur.

Sur cette base, des scénarios prospectifs sans gaz ont été élaborés, intégrant : Un mix énergétique cible, Des solutions alternatives (électrification, EnR, récupération de chaleur, Pompe à chaleur HT ...), L'adéquation saisonnière des solutions proposées.

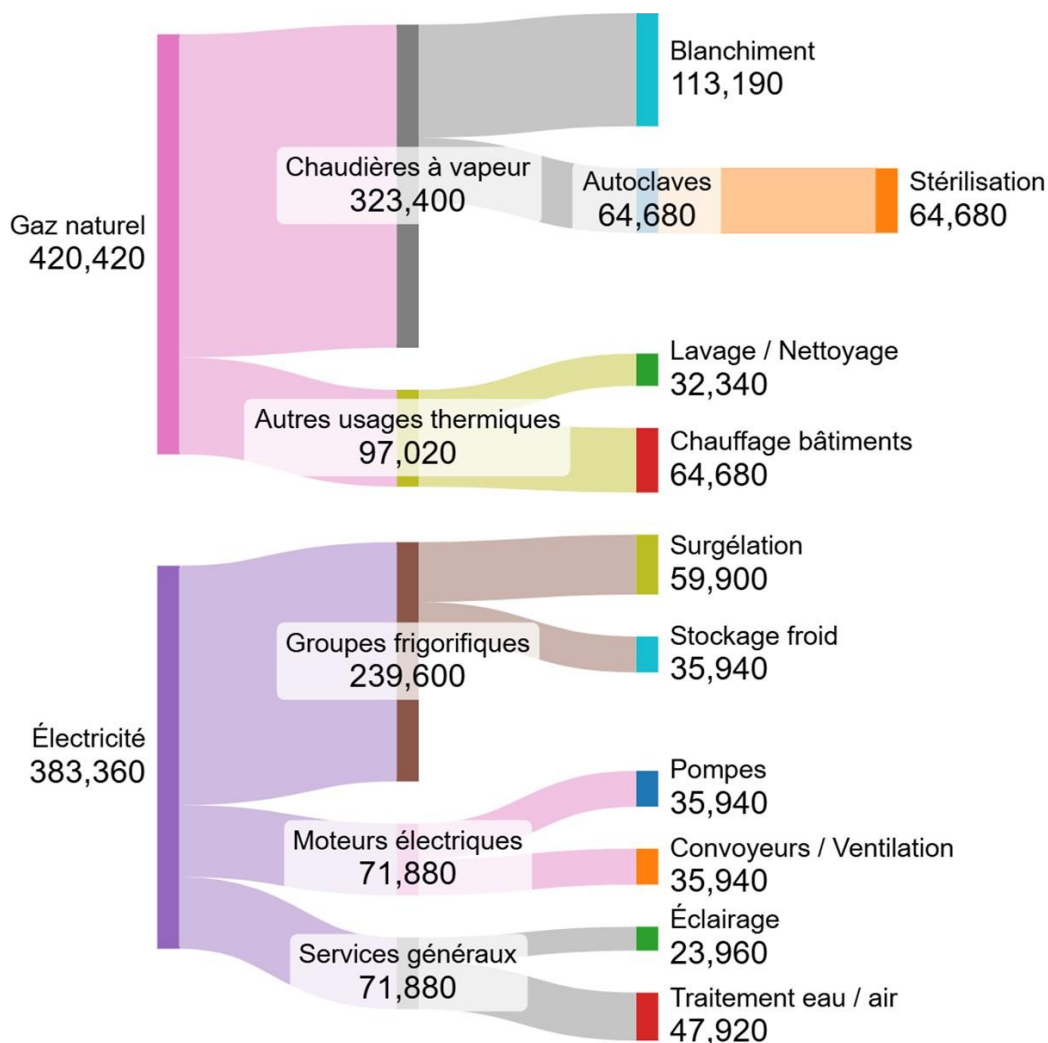


Figure 3: Schéma illustrant la répartition des consommations énergétiques d'une entreprise industrielle, selon la même méthodologie que celle appliquée aux autres entreprises de notre fichier Excel.

3.6. Valorisation des échanges avec les acteurs du secteur

Dans le cadre de cette étude, des démarches de contact direct auprès des acteurs industriels et institutionnels ont été menées afin d'enrichir l'analyse et de confronter les données théoriques à la réalité du terrain. Ces échanges ont permis d'obtenir des retours qualifiés et pertinents sur les enjeux énergétiques et les trajectoires de décarbonation du secteur agroalimentaire.

Quatre contacts se sont révélés particulièrement déterminants pour l'avancement du projet : Magaly PENNEQUIN, Philippe VASSEUR, Cédric PHILIBERT et Claude LENGLET. Leurs contributions ont permis d'apporter un éclairage complémentaire sur les contraintes industrielles, les orientations stratégiques de transition énergétique et les leviers technico-économiques mobilisables à l'échelle régionale et nationale.

Ces échanges ont renforcé la crédibilité de l'analyse et ont contribué à affiner les hypothèses retenues pour la modélisation énergétique et l'élaboration des scénarios de sortie du gaz.

Ces outils permettent de réaliser les calculs énergétiques essentiels (puissance, production thermique, couverture des besoins, ordres de grandeur) nécessaires à une première évaluation technico-économique des solutions proposées.

4. Typologie des procédés et usages énergétiques

4.1. Gaz naturel : Usage et impacts dans l'industrie agroalimentaire

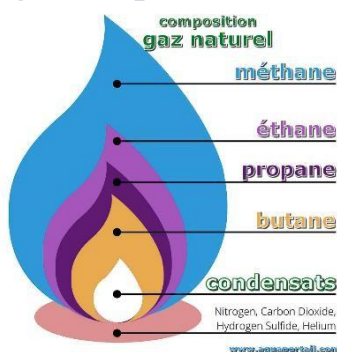


Figure 5: Composition du gaz naturel

Principalement composé de méthane (CH_4), le gaz naturel s'impose comme la source d'énergie fossile majeure de l'industrie agroalimentaire grâce à son haut pouvoir calorifique (33 à 38 MJ/m^3) et sa grande flexibilité d'usage. Il est indispensable pour la production de vapeur, le chauffage de procédés comme le séchage, ainsi que pour les opérations de cuisson industrielle et de cogénération, offrant une régulation thermique d'une grande précision. Bien que sa combustion soit plus propre que celle du charbon ou du fioul avec des émissions de particules quasi nulles, son bilan environnemental reste problématique avec environ 0,25 kg CO_2/kWh et des risques de fuites de méthane durant son transport. En tant que ressource stratégique massivement importée, il expose également les industries aux fluctuations de prix et aux crises géopolitiques mondiales, créant une vulnérabilité directe pour la sécurité d'approvisionnement des sites de production.

En France, l'industrie agroalimentaire est encore massivement dépendante du gaz naturel pour sa production de chaleur et de vapeur, fait face à une double nécessité de transformation. La crise ukrainienne a révélé la fragilité stratégique du secteur face aux importations russes, exposant les sites industriels à de fortes instabilités de prix et d'approvisionnement. Parallèlement, le respect des objectifs climatiques impose de s'affranchir des combustibles fossiles (généralement le gaz) pour réduire radicalement l'empreinte carbone.

Pour conjuguer sécurité énergétique et décarbonation, la France doit désormais accélérer le déploiement de solutions renouvelables, telles que la biomasse, la géothermie..., tout en explorant les alternatives bas carbone comme le biométhane ou l'hydrogène vert. Cette transition est devenue essentielle pour pérenniser l'activité industrielle tout en respectant les engagements environnementaux nationaux et européens.

4.2. Cartographie des procédés

L'industrie agroalimentaire offre de nombreuses opportunités pour la mise en œuvre de pompes à chaleur industrielles dans divers procédés nécessitant un chauffage contrôlé à des températures généralement inférieures à 160 °C. Comme le montrent les profils de température des procédés, de nombreuses opérations critiques correspondent bien aux capacités actuelles des pompes à chaleur.

Procédé	20°C	40°C	60°C	80°C	100°C	120°C	140°C	160°C	180°C	200°C
Drying										
Evaporation										
Pasteurization										
Sterilization										
Boiling										
Distillation										
Blanching										
Scalding										
Concentration										
Tempering										
Smoking										

Figure 6: Plages de températures associées aux principaux procédés thermiques industriels.

Drying (Séchage) : Opération consistant à éliminer tout ou partie de l'eau d'un produit par évaporation pour empêcher le développement de micro-organismes. Les températures varient de 40°C à plus de 200°C selon le produit et la technique utilisée.

Pasteurization (Pasteurisation) : Traitement thermique modéré visant à détruire les micro-organismes pathogènes et une grande partie de la flore d'altération. Elle s'effectue généralement entre 60°C et 140°C

Sterilization (Stérilisation) : Traitement thermique poussé destiné à détruire toute forme microbienne vivante, y compris les spores. Elle est située entre 100°C et 120°C.

Blanching (Blanchiment) : Immersion brève dans de l'eau chaude ou de la vapeur pour inactiver les enzymes responsables de la dégradation des fruits et légumes avant congélation ou séchage. Il se pratique entre 60°C et 80°C.

Evaporation (Évaporation) : Technique visant à éliminer un solvant (généralement l'eau) sous forme de vapeur pour concentrer un produit liquide. Les plages de température s'étendent de 40°C à 160°C.

Distillation (Distillation) : Procédé de séparation de substances liquides mélangées en exploitant la différence de leurs points d'ébullition. Elle est répertoriée entre 40°C et 80°C.

Concentration (Concentration) : Augmentation de la teneur en matières solides d'un liquide par élimination d'eau.

Boiling (Ébullition / Cuisson à l'eau) : Cuisson des aliments dans un liquide porté à sa température d'ébullition. Les températures indiquées vont de 80°C à 100°C.

Scalding (Échaudage) : Traitement thermique rapide (souvent par immersion dans l'eau chaude) facilitant des opérations comme l'épilation (porcs) ou le plumage (volailles). Il est pratiqué entre 40°C et 60°C.

Tempering (Tempéage) : Processus de chauffage et de refroidissement contrôlés, utilisé principalement pour les graisses (comme le chocolat) afin de stabiliser leur structure cristalline. Il se situe entre 40°C et 60°C.

Smoking (Fumage) : Exposition d'un aliment à la fumée pour lui donner du goût et améliorer sa conservation. Selon le tableau, ce procédé couvre une large plage allant de 20°C (fumage à 0°C).

4.3. Technologies énergétiques actuelles dans l'industrie agro-alimentaire

L'industrie agro-alimentaire se distingue par une demande énergétique massive et constante, structurée autour de trois besoins fondamentaux : la chaleur, le froid et l'électricité. Pour répondre à ces exigences, le secteur s'appuie historiquement sur des technologies matures dont la pierre angulaire demeure le gaz naturel. Aujourd'hui, le paysage énergétique industriel est principalement structuré autour des chaudières à gaz, des réseaux de distribution de vapeur et des systèmes de réfrigération mécanique.

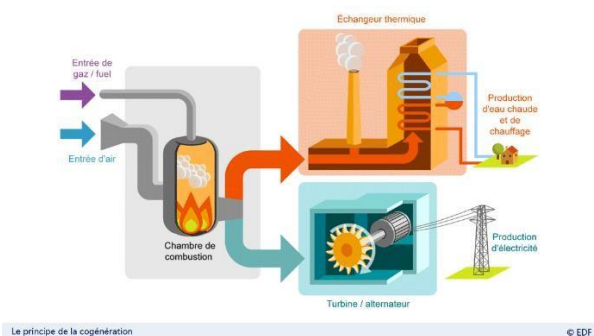


Figure 7: Principe des chaudières gaz avec systèmes de cogénération

Chaudières gaz systèmes de cogénération

Les chaudières industrielles sont des installations robustes et flexibles qui assurent une production de chaleur stable grâce à leur grande souplesse opérationnelle. Elles occupent une place centrale dans l'industrie agroalimentaire, où elles sont indispensables à la réalisation de procédés thermiques essentiels tels que la cuisson, la pasteurisation ou la stérilisation, parfois couplées à des unités de cogénération pour produire simultanément de l'électricité. La

décarbonation de ces systèmes est aujourd'hui impérative car, malgré des rendements élevés, leur fonctionnement repose sur la combustion de ressources fossiles (gaz) générant des émissions de 2CO_2 significatives qu'il est nécessaire d'éliminer.

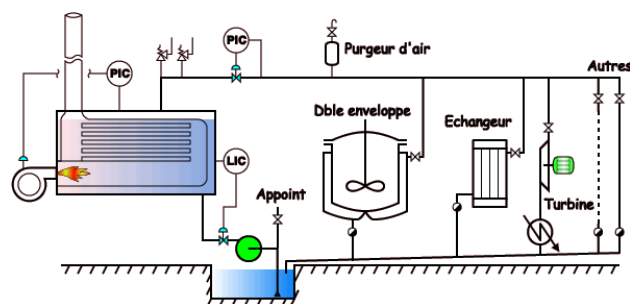


Figure 8: Exemple d'un réseau de vapeur

Réseaux vapeur

La vapeur est le vecteur énergétique privilégié pour transporter l'énergie thermique vers les ateliers de transformation, grâce à sa densité énergétique élevée. Elle est centrale dans l'industrie agroalimentaire pour des applications variées, allant du chauffage indirect des produits au nettoyage industriel des équipements. Sa décarbonation et son optimisation sont aujourd'hui indispensables car, outre une production souvent issue de sources fossiles, ce mode de transport subit des pertes structurelles massives (entre 10 % et 30 % selon l'ADEME) liées aux fuites et aux défauts d'isolation, qu'il est urgent de réduire pour limiter l'empreinte carbone globale.



Figure 9: image d'un générateur thermique

Brûleurs et générateurs thermiques directs

Les brûleurs industriels sont des dispositifs conçus pour produire une flamme stable et contrôlée, capable d'atteindre les hautes températures exigées par les traitements thermiques. Ils occupent une place stratégique dans l'agroalimentaire pour le chauffage direct de l'air ou des surfaces lors d'opérations de cuisson, de grillage, de torréfaction ou pour alimenter les tunnels de traitement thermique. La décarbonation de ces équipements est désormais prioritaire car, bien que leur combustion soit précise et modulable selon la production, ils fonctionnent majoritairement à partir de combustibles fossiles dont les émissions de gaz à effet de serre doivent être supprimées.



Figure 10: Chauffe-eau industriels gaz

Chauffe-eau industriels gaz

Les chauffe-eaux industriels sont des équipements dédiés à la production d'eau chaude de procédé, opérant généralement sur une plage de température allant de 50 à 95 °C. Dans le secteur agroalimentaire, ils sont essentiels à l'hygiène et à l'efficacité opérationnelle, alimentant les laveuses, les cycles de nettoyage en place (NEP/CIP) ainsi que le préchauffage des flux d'eau. La décarbonation de ces systèmes est aujourd'hui nécessaire car, bien qu'ils soient plus économes que la vapeur pour les besoins à basse température, ils reposent encore sur la combustion de gaz fossile pour générer cette chaleur thermique.



Figure 11: Groupes frigorifiques à absorption

Groupes frigorifiques à absorption



Les groupes frigorifiques à absorption sont des systèmes produisant du froid à partir d'une source de chaleur plutôt que d'un compresseur électrique, en utilisant un cycle thermodynamique basé sur un couple réfrigérant-absorbant. Dans l'industrie agroalimentaire, ils sont principalement sollicités pour la réfrigération des zones de stockage et de transformation, offrant une alternative stratégique pour valoriser la chaleur fatale issue des chaudières. La décarbonation de cette technologie est aujourd'hui essentielle car, bien qu'elle permette de réduire la dépendance au réseau électrique, son fonctionnement repose encore fréquemment sur la combustion directe de gaz fossile pour générer l'énergie thermique nécessaire au cycle.

Séchoirs alimentés au gaz

Figure 12: Séchoirs alimentés au gaz

Les séchoirs industriels sont des équipements qui exploitent la chaleur pour chauffer un flux d'air contrôlé afin d'éliminer l'humidité des produits par évaporation. Ils occupent une fonction vitale dans l'industrie agroalimentaire pour la déshydratation des fruits, légumes, céréales et herbes aromatiques, garantissant la conservation des aliments et la sécurité microbiologique. La décarbonation de ces systèmes est aujourd'hui un enjeu majeur car, malgré la finesse de régulation qu'ils offrent pour préserver la qualité des denrées, leur fonctionnement repose sur une combustion fossile qu'il est nécessaire de substituer pour réduire l'empreinte carbone du processus de séchage.



Figure 13: Fours à gaz

Fours à gaz

Les fours industriels sont des chambres de traitement thermique équipées de brûleurs haute performance permettant d'atteindre rapidement des températures élevées. Ils sont au cœur de la fabrication de nombreux produits tels que la boulangerie, les biscuits, les snacks et les plats cuisinés, tout en assurant des opérations de grillage ou de pasteurisation. La décarbonation de ces équipements est aujourd'hui indispensable car, bien que leur grande réactivité et l'uniformité de leur chaleur garantissent une productivité et une qualité industrielle optimales, leur fonctionnement dépend encore de la combustion de gaz fossile émettrice de CO₂.

5. Profils-types de consommation énergétique

La région Hauts-de-France constitue l'un des principaux pôles agro-alimentaires français, avec une forte concentration d'industries de transformation (produits céréaliers, sucre, produits laitiers, viande, surgélation). Cette spécialisation industrielle se traduit par des profils de consommation énergétique spécifiques, marqués par une forte intensité thermique, des besoins importants en froid et une dépendance au gaz naturel.

5.1. Construction de profils temporels

À l'échelle annuelle, les consommations énergétiques de l'industrie agro-alimentaire des Hauts-de-France sont fortement influencées par la saisonnalité des productions agricoles régionales. La région se caractérise notamment par des filières sucrières, amidonnières et de transformation de céréales, fonctionnant selon des campagnes industrielles concentrées sur plusieurs mois (**Sucrierie** : septembre à décembre, forte production de vapeur pour cuisson et transformation - **Céréales** : juin à août, séchage et cuisson intensifs, pics thermiques et électriques -...). Ces périodes entraînent des pics significatifs de consommation de chaleur (vapeur) et d'électricité.

Par ailleurs, les besoins en froid industriel augmentent durant les périodes estivales afin d'assurer la conservation des produits alimentaires, ce qui renforce la consommation électrique annuelle.

À l'échelle hebdomadaire, la majorité des sites agro-alimentaires régionaux fonctionnent principalement sur les jours ouvrés, avec une baisse d'activité partielle le week-end (20 à 30 %) sur les procédés thermiques et électriques non critiques, mais le froid industriel et la surgélation fonctionnent en continu pour assurer la sécurité sanitaire.

Cette continuité de fonctionnement explique une consommation de base incompressible, typique des sites agro-alimentaires de grande taille implantés dans la région.

À l'échelle journalière, les profils de consommation présentent des pics marqués, liés aux opérations de transformation agro-alimentaire : cuisson, pasteurisation, séchage, nettoyage en place (CIP). Ces pics concernent principalement la production de vapeur et conditionnent le dimensionnement des chaudières et des réseaux énergétiques.

Les groupes frigorifiques, quant à eux, fonctionnent souvent de manière plus continue, avec des variations liées aux cycles de production et de stockage.

5.2. Profils-types par industrie agro-alimentaire régionale

Afin de représenter de manière réaliste les consommations énergétiques des sites agro-alimentaires des Hauts-de-France, des profils-types sont définis à partir des principales filières régionales : sucrierie, transformation de céréales, produits laitiers, viande et produits surgelés.

Ces profils reposent sur des hypothèses simplifiées mais représentatives, utilisées couramment dans les études énergétiques régionales, et s'appuient sur une décomposition par usage énergétique :

- ✓ Chaleur de procédé (vapeur, eau chaude),
- ✓ Froid industriel (réfrigération, surgélation),
- ✓ Électricité de procédé (moteurs, pompes),
- ✓ Usages auxiliaires.

Cette méthodologie permet d'identifier les postes énergétiques dominants (généralement la chaleur

fossile et le froid industriel) et de servir de base aux analyses de décarbonation adaptées au tissu industriel régional.

5.3. Paramétrage géographique – Hauts-de-France

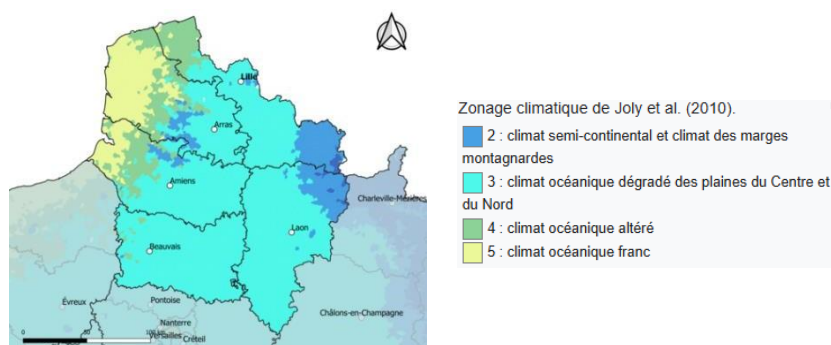


Figure 14: Zonage climatique Hauts-de-France

Le climat des Hauts-de-France, de type océanique dégradé, se caractérise par des hivers frais et des étés modérés. Ce contexte induit des besoins thermiques importants pour les procédés industriels et un recours significatif au froid industriel tout au long de l'année pour la conservation des produits alimentaires.

L'évaluation des émissions de gaz à effet de serre repose sur les facteurs d'émission nationaux, applicables aux sites agro-alimentaires régionaux. Le gaz naturel constitue le principal vecteur énergétique thermique, tandis que l'électricité bénéficie d'un facteur d'émission relativement faible en France, influençant fortement les scénarios de décarbonation.

Les prix de l'électricité et du gaz en Hauts-de-France sont cohérents avec les tendances nationales, mais peuvent présenter des spécificités liées aux profils industriels régionaux fortement consommateurs d'énergie. Cette dimension économique est déterminante pour la compétitivité des industries agro-alimentaires locales et le choix des solutions énergétiques alternatives.

6. Solutions de décarbonation étudiées

6.1. Mechanical Vapor Recompression (MVR)

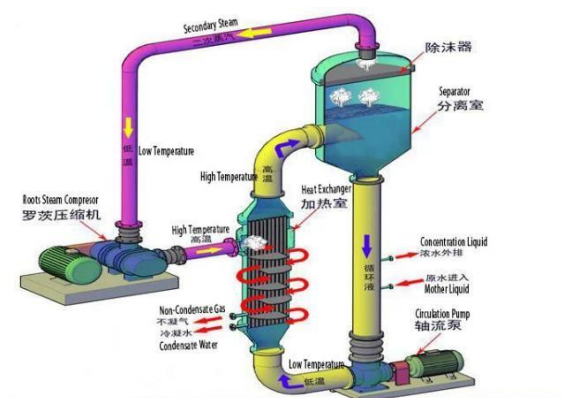


Figure 15: Mechanical Vapor Recompression (MVR)

La compression mécanique de vapeur (Mechanical Vapor Recompression – MVR) est une technologie d'évaporation à très haute efficacité énergétique, largement utilisée dans l'industrie agroalimentaire pour réduire drastiquement la consommation de vapeur issue de combustibles fossiles. Son principe repose sur la récupération et le recyclage de la chaleur latente contenue dans la vapeur secondaire générée lors des procédés d'évaporation ou de concentration. Contrairement aux systèmes conventionnels, où cette vapeur est condensée puis rejetée, la MVR permet de la recomprimer mécaniquement afin de la réutiliser directement comme source de chaleur pour le procédé lui-même, transformant ainsi une perte énergétique en ressource.

Le fonctionnement de la MVR s'articule autour d'une boucle quasi fermée. Lors de l'ébullition du produit à concentrer (lait, jus, effluents, sirops), une vapeur secondaire à basse pression et basse température est produite. Cette vapeur est aspirée par un compresseur mécanique (centrifuge, Roots ou à vis), qui augmente sa pression et, par conséquent, sa température. Un écart thermique relativement faible, typiquement compris entre 5 et 15 °C, devient alors suffisant pour permettre un nouveau transfert de chaleur. La vapeur comprimée est ensuite réinjectée dans l'évaporateur ou dans un échangeur thermique, où elle condense en cédant sa chaleur latente pour poursuivre l'évaporation du produit. Le condensat est récupéré et le cycle

recommence, de sorte que l'énergie externe nécessaire au procédé devient essentiellement électrique, via l'alimentation du compresseur.

Du point de vue de la décarbonation, la MVR constitue un levier particulièrement puissant, car elle supprime ou réduit fortement le recours à la vapeur externe produite par combustion. La chaleur n'est plus générée par une chaudière gaz, mais recyclée et amplifiée mécaniquement, ce qui transforme un procédé historiquement thermique en un procédé majoritairement électrifié. Par rapport aux évaporateurs multi-effets conventionnels, qui améliorent l'efficacité mais nécessitent toujours une vapeur primaire fossile, la MVR offre une efficacité équivalente voire supérieure avec un seul effet, tout en éliminant la dépendance à une vapeur motrice. Elle se distingue également du chauffage électrique direct par résistances en conservant une logique d'efficacité énergétique élevée, fondée sur la valorisation de chaleur existante.

La MVR est largement déployée dans l'agroalimentaire pour la concentration de produits liquides, tels que le lait et le lactosérum, les jus de fruits et légumes, les sirops sucrés (glucose, fructose) ou encore les extraits alimentaires. Elle est également très répandue dans les industries sucrière et amidonnière, historiquement parmi les plus consommatrices de gaz, notamment pour la concentration des jus sucrés, l'épaississement des solutions d'amidon et le raffinage du sucre. La technologie couvre une large gamme de températures de fonctionnement, pouvant s'étendre de quelques dizaines de degrés jusqu'à environ 200 °C selon la conception, ce qui la rend compatible avec de nombreux produits, y compris sensibles à la chaleur.

Sur le plan de la maturité, la MVR est une technologie industrielle éprouvée, développée dès les années 1950–1960 et aujourd'hui largement standardisée. Les systèmes actuels bénéficient de compresseurs électriques fiables, d'automatismes avancés et d'une longue durée de vie, souvent comprise entre 20 et 25 ans. Ils peuvent être intégrés aussi bien dans des installations existantes que dans des projets neufs, sur une large gamme de capacités, allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres cubes par heure de vapeur recomprimée. Cette maturité se traduit par une adoption croissante, y compris par des PME, malgré un investissement initial parfois plus élevé que pour des solutions conventionnelles. Toutefois, les coûts d'exploitation sont fortement réduits, du fait de la quasi-suppression de la consommation de vapeur fossile, ce qui conduit souvent à des temps de retour courts, de l'ordre d'un à trois ans. L'intérêt de la MVR pour la décarbonation est donc majeur : lorsqu'elle est alimentée par une électricité faiblement carbonée, elle permet une réduction très significative des émissions de CO₂ associées aux procédés d'évaporation, tout en optimisant l'usage de l'énergie et de l'eau dans l'industrie agroalimentaire.

6.2. Pompes à chaleur haute température (PAC HT)



Figure 16: image d'une pompe à chaleur haute température (PAC HT)

Les pompes à chaleur haute température (PAC HT) sont considérées comme une extension des PAC industrielles, avec l'objectif de couvrir des besoins thermiques plus exigeants que ceux typiquement servis par les PAC « classiques ». Dans une logique de décarbonation, elles visent à élever une source de chaleur disponible (par exemple chaleur fatale industrielle) vers des niveaux de température plus élevés, afin d'alimenter des usages de procédé lorsque l'eau chaude standard ne suffit plus. Dans un contexte agroalimentaire, cette approche est pertinente dès lors que le site dispose de rejets thermiques valorisables et d'usages nécessitant une chaleur au-delà des niveaux usuels de lavage ou de préchauffage. L'intérêt principal d'une PAC HT réside donc dans l'extension du champ de l'électrification de la chaleur, tout en conservant le principe d'efficacité (valoriser une chaleur existante plutôt que produire toute la chaleur par effet Joule). Comme pour les autres PAC, son intégration dépend fortement du couplage source–usage (températures, débits, stabilité), de la place disponible, des contraintes d'exploitation et de maintenance, ainsi que de la stratégie électrique du site.

6.3. Méthanisation

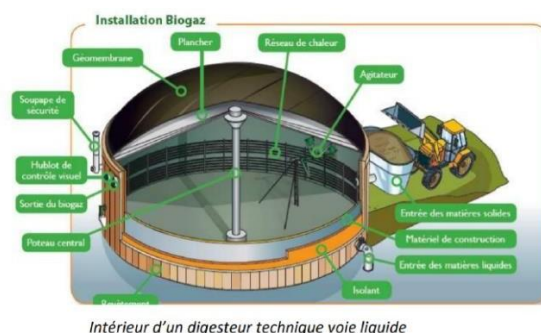


Figure 17: Principe de la méthanisation

La méthanisation est un procédé biologique de digestion anaérobie permettant de transformer des matières organiques en biogaz, principalement composé de méthane, ainsi qu'en digestat. Le biogaz peut être valorisé en chaleur et en électricité par cogénération ou épuré en biométhane pour une injection dans le réseau de gaz ou un usage carburant. Le digestat issu du procédé peut être utilisé comme fertilisant agricole, en substitution partielle des engrais chimiques.

Le fonctionnement de la méthanisation repose sur plusieurs étapes biologiques successives réalisées dans un digesteur hermétique, incluant l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse. Les intrants utilisés proviennent principalement de déchets agroalimentaires, de résidus agricoles, de boues de traitement des eaux et de biodéchets. Afin d'optimiser l'activité microbienne, le procédé est exploité à température contrôlée, en régime mésophile ou thermophile.

La méthanisation est particulièrement adaptée au secteur agroalimentaire en raison de la disponibilité de flux organiques issus des procédés de transformation. Elle est déjà mise en œuvre pour valoriser des déchets industriels, traiter des effluents organiques et produire localement de l'énergie sous forme de chaleur, d'électricité ou de biométhane.

Il s'agit d'une technologie mature et largement industrialisée, avec de nombreuses installations en service en Europe. Les coûts d'investissement varient fortement selon la taille des installations, allant de petites unités agricoles à des unités industrielles de grande capacité.

Les principaux freins au déploiement de la méthanisation résident dans le niveau d'investissement initial, la nécessité d'une gestion rigoureuse des intrants et le besoin d'expertise opérationnelle. Les contraintes réglementaires et les conditions de valorisation économique du biogaz constituent également des facteurs déterminants.

Du point de vue de la décarbonation, la méthanisation permet de substituer les combustibles fossiles par une énergie renouvelable, de limiter les émissions directes de méthane et de valoriser les déchets organiques dans une logique d'économie circulaire. Elle représente ainsi un levier structurant de transition énergétique pour les industries agroalimentaires générant des flux organiques significatifs.

6.4.Électricité bas carbone via CPPA (Corporate Power Purchase Agreement)



Figure 18: PPA power purchase agreement

Les Corporate Power Purchase Agreements (CPPA) sont des contrats d'achat d'électricité à long terme conclus entre une entreprise consommatrice, notamment dans le secteur agroalimentaire, et un producteur d'énergie renouvelable issu de filières telles que le solaire, l'éolien ou l'hydroélectricité. Ces accords permettent aux entreprises de sécuriser un approvisionnement en électricité d'origine renouvelable sur une période généralement comprise entre dix et vingt-cinq ans, avec un prix fixé à l'avance. Les CPPA contribuent ainsi à la décarbonation du mix électrique de l'entreprise tout en soutenant financièrement le développement de nouvelles capacités de production bas carbone. Selon leur configuration, ils peuvent être physiques, avec une livraison directe d'électricité renouvelable, ou virtuels, reposant sur un mécanisme financier associé à la production et au prix de l'électricité.

Le fonctionnement d'un CPPA repose sur un engagement contractuel de long terme entre l'entreprise et le producteur d'électricité renouvelable. L'entreprise s'engage à acheter un volume défini d'électricité sur la durée du contrat, ce qui garantit que sa consommation est compensée par une production renouvelable équivalente. Ce mécanisme permet à la fois d'assurer la traçabilité de l'électricité bas carbone consommée et de stabiliser les coûts énergétiques, en protégeant l'entreprise contre la volatilité des prix sur les marchés de l'électricité. En parallèle, le producteur bénéficie d'une visibilité financière qui facilite le financement et la construction de nouvelles installations renouvelables.

Dans le secteur agroalimentaire, les CPPA sont particulièrement adaptés aux sites industriels à forte consommation électrique, notamment ceux intégrant des procédés thermiques électrifiés, des installations de réfrigération, de surgélation ou des équipements électriques intensifs. Ils

constituent un levier privilégié pour les entreprises engagées dans des trajectoires de réduction de leurs émissions indirectes (Scope 2) et dans l'atteinte d'objectifs de neutralité carbone. Des exemples concrets montrent leur applicabilité, comme le recours de Lesaffre à un CPPA agrivoltaïque pour réduire ses émissions de CO₂ ou l'approvisionnement en électricité solaire décarbonée mis en place par Agrial sur plusieurs sites de production.

Les CPPA constituent aujourd'hui une solution mature et standardisée, déployée depuis plus de quinze ans dans le monde industriel, en particulier en Europe et en Amérique du Nord. Les cadres contractuels sont bien établis, les acteurs du marché nombreux et la réglementation stabilisée, ce qui confère à cette solution une forte crédibilité pour les stratégies de décarbonation industrielles. Les entreprises peuvent ainsi sécuriser à long terme leur approvisionnement électrique tout en maîtrisant leurs coûts énergétiques.

Toutefois, l'adoption des CPPA implique certaines contraintes. Bien qu'ils ne nécessitent pas d'investissement physique direct, ils requièrent un engagement contractuel de long terme et une capacité de consommation électrique suffisante pour rendre l'accord économiquement pertinent. La taille des sites industriels constitue ainsi un frein potentiel, les CPPA étant plus adaptés aux grandes structures. Par ailleurs, une planification financière rigoureuse et un suivi des garanties d'origine sont nécessaires afin d'assurer la cohérence entre la consommation électrique et la production renouvelable associée. Pour les PME, des mécanismes de mutualisation ou de regroupement peuvent être envisagés afin de lever ces contraintes.

Du point de vue de la décarbonation, les CPPA présentent un intérêt majeur en permettant une réduction significative des émissions indirectes liées à l'électricité consommée. Ils contribuent directement au développement des énergies renouvelables, tout en offrant une visibilité économique favorable à la compétitivité industrielle. En sécurisant un approvisionnement électrique bas carbone et en stabilisant les coûts, les CPPA constituent un levier stratégique pour accompagner la transition énergétique des entreprises agroalimentaires, sans compromettre la continuité et la performance de leurs processus industriels.

6.5. Énergies renouvelables



Figure 19: Capteur solaire thermique (chauffage de l'eau) et panneau photovoltaïque (électricité).

Les énergies renouvelables reposent sur l'exploitation de ressources naturelles inépuisables à l'échelle humaine, telles que le rayonnement solaire et la biomasse. Elles permettent de produire de la chaleur et de l'électricité tout en limitant fortement les émissions de gaz à effet de serre, ce qui en fait des leviers essentiels pour la décarbonation des procédés énergétiques dans l'industrie agroalimentaire.

Le solaire thermique consiste à capter le rayonnement solaire à l'aide de capteurs afin de chauffer un fluide caloporteur, dont la chaleur peut être utilisée directement ou stockée. Il

permet de produire de la chaleur à des températures généralement comprises entre 30 et 120 °C, compatibles avec de nombreux usages agroalimentaires tels que la production d'eau chaude industrielle, le préchauffage des fluides de procédé ou le séchage de produits agricoles et alimentaires. Cette technologie mature et fiable permet une substitution partielle des chaudières fossiles et une réduction directe des émissions de CO₂, bien que sa production dépende de l'ensoleillement et nécessite des surfaces disponibles importantes.

Le solaire photovoltaïque convertit le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules semi-conductrices. L'électricité produite peut être autoconsommée sur le site industriel ou injectée dans le réseau électrique, permettant d'alimenter les équipements électriques des procédés agroalimentaires tels que les moteurs, pompes et systèmes de contrôle. Cette technologie contribue à la réduction de l'empreinte carbone électrique, à une autonomie énergétique partielle et à la stabilisation des coûts énergétiques, malgré une production intermittente dépendante des conditions climatiques.

En matière de décarbonation, les énergies renouvelables offrent des bénéfices significatifs grâce à une forte réduction des émissions de CO₂. Leur déploiement est toutefois soumis à certaines limites, notamment l'intermittence des énergies solaires, les besoins en surfaces et en ressources disponibles, les investissements initiaux nécessaires et les contraintes logistiques liées à l'approvisionnement en biomasse.

Dans une stratégie globale de décarbonation, les énergies renouvelables sont particulièrement efficaces lorsqu'elles sont intégrées dans un mix énergétique diversifié, combinées à des solutions de stockage thermique ou électrique et associées à des actions d'efficacité énergétique et de récupération de chaleur. Elles constituent ainsi des solutions complémentaires et indispensables à la décarbonation durable de l'industrie agroalimentaire.

6.6. Géothermie

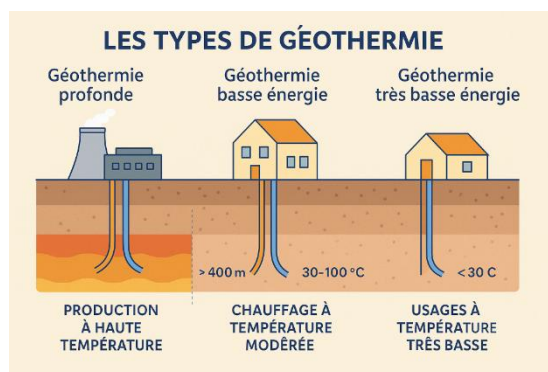


Figure 20: Les types de géothermie

La géothermie consiste à exploiter la chaleur naturellement présente dans le sous-sol terrestre, issue à la fois du gradient géothermique, correspondant à l'augmentation progressive de la température avec la profondeur, et de la radioactivité naturelle des roches. Cette source d'énergie présente des caractéristiques particulièrement intéressantes pour la décarbonation industrielle : elle est locale, renouvelable, disponible de manière continue et associée à de très faibles émissions de CO₂. Ces propriétés en font une solution potentiellement structurante pour la fourniture de chaleur dans l'industrie agroalimentaire, dont les procédés sont souvent fortement dépendants des énergies fossiles.

Selon la profondeur des forages et les températures accessibles, plusieurs types de géothermie peuvent être distingués. La géothermie très basse énergie, exploitée à faible profondeur, permet principalement le chauffage via des pompes à chaleur. La géothermie basse énergie, accessible entre quelques centaines et quelques milliers de mètres, fournit de la chaleur à des niveaux compatibles avec l'eau chaude industrielle et certains procédés thermiques. La géothermie moyenne énergie, à des profondeurs plus importantes, permet d'atteindre des températures plus élevées adaptées à des procédés thermiques plus exigeants. Enfin, la géothermie haute énergie, au-delà de 150 °C, est principalement utilisée pour la production d'électricité. Dans le secteur agroalimentaire, ce sont essentiellement les géothermies basse et moyenne énergie qui sont mobilisées, car elles correspondent aux besoins thermiques des procédés industriels.

La production de chaleur par géothermie repose sur le captage d'un fluide chaud souterrain à l'aide d'un forage, le transfert de cette chaleur vers les procédés industriels, directement ou via un échangeur thermique, puis la réinjection du fluide refroidi dans le sous-sol dans un circuit fermé. Lorsque la température du fluide géothermal est modérée, le recours à des pompes à chaleur permet d'élever le niveau de température jusqu'à des valeurs compatibles avec les usages industriels, incluant l'eau chaude de procédé, le nettoyage en place, la pasteurisation, certains séchages ou la stérilisation. Cette combinaison géothermie–pompe à chaleur permet ainsi de substituer des chaudières alimentées par des combustibles fossiles.

Du point de vue environnemental, la géothermie permet une réduction très importante des émissions de CO₂ par rapport aux énergies fossiles, tout en offrant une production d'énergie non intermittente et une durée de vie des installations généralement supérieure à plusieurs décennies. Néanmoins, son déploiement reste contraint par des coûts initiaux élevés, liés notamment aux forages, par une forte dépendance au potentiel géologique local et par des délais de développement importants nécessitant des études approfondies. Dans une stratégie de décarbonation de l'industrie agroalimentaire, la géothermie apparaît ainsi comme une solution particulièrement pertinente lorsqu'elle est intégrée dans un mix énergétique, couplée à des pompes à chaleur industrielles et associée à des démarches de récupération de chaleur, afin de maximiser son efficacité et sa faisabilité.

6.7. Electrothermal Energy Storage (ETES)

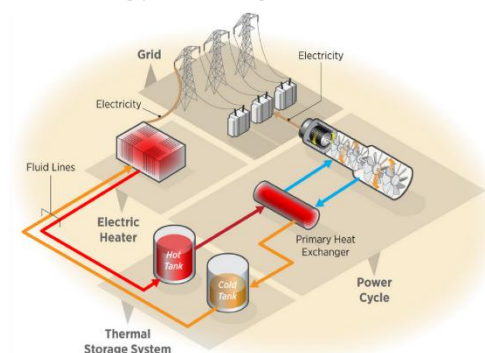


Figure 21: Schéma de principe d'un système de stockage d'énergie électrothermique

L'Electrothermal Energy Storage (ETES) est une technologie permettant de convertir de l'électricité en énergie thermique stockée, afin de la restituer ultérieurement sous forme de chaleur pour les procédés industriels. Elle permet de dissocier la production d'électricité de la consommation de chaleur, contribuant ainsi à la flexibilité énergétique et à la décarbonation de l'industrie.

Le stockage électrothermique repose sur différents milieux de stockage thermique, notamment les matériaux solides et les sels fondus, qui sont aujourd'hui les solutions les plus matures pour les applications industrielles. Ces technologies permettent de couvrir une large gamme de températures, allant de la production de chaleur de procédé à la fourniture de vapeur ou de chaleur à plus haute température.

Le fonctionnement de l'ETES consiste à convertir l'électricité en chaleur à l'aide de résistances électriques ou de systèmes à induction, puis à stocker cette chaleur dans un matériau thermique. Lors de la phase de restitution, la chaleur est transférée vers un fluide caloporteur, tel que l'air, l'eau ou la vapeur, afin d'être utilisée directement dans les procédés industriels. L'ETES peut ainsi fournir de l'eau chaude industrielle, de la vapeur de procédé ou de la chaleur haute température, en remplacement ou en complément des chaudières fossiles.

Dans l'industrie agroalimentaire, cette technologie permet de répondre à des besoins thermiques continus ou discontinus, de valoriser l'électricité renouvelable excédentaire et de disposer d'une chaleur pilotable disponible à la demande. Elle est utilisée pour des applications telles que le séchage, la cuisson, la transformation thermique, la production de vapeur et le lissage des pics de demande énergétique.

Du point de vue de la décarbonation, l'ETES permet une réduction des émissions de CO₂ lorsqu'il est alimenté par une électricité bas carbone et contribue à limiter les effets de l'intermittence des énergies renouvelables. Son déploiement reste toutefois contraint par la dépendance au mix électrique, des coûts d'investissement encore élevés pour certaines technologies, l'encombrement des systèmes de stockage thermique et un déploiement industriel encore en phase de montée en puissance.

6.8. La Récupération de Chaleur Fatale

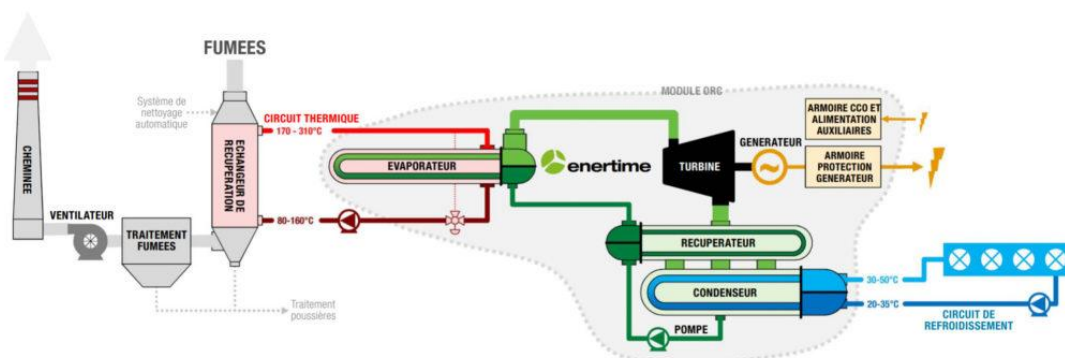


Figure 22: Schéma de principe de la récupération de chaleur fatale

Description et fonctionnement de la technologie

La récupération de chaleur fatale consiste à capter l'énergie thermique résiduelle générée par un processus industriel, qui serait autrement dissipée dans l'environnement. Cette énergie est issue de diverses sources telles que les fumées de fours, les condensats de vapeur, les eaux de lavage ou l'air chaud des séchoirs. Le principe repose sur l'utilisation de systèmes de transfert, principalement des échangeurs de chaleur ou des boucles de fluides caloporteurs, pour acheminer cette énergie vers un nouveau besoin thermique. Selon la température récupérée allant de la basse température (30-60 °C pour le nettoyage) à la haute température (>120 °C

pour les fumées), la chaleur peut être utilisée directement ou rehaussée via une pompe à chaleur (PAC) ou une compression mécanique de vapeur (MVR).

Utilisation et avantages en agroalimentaire

Dans l'industrie agroalimentaire, cette technologie trouve des applications directes en substitution de la production de chaleur neuve, généralement issue du gaz fossile. Elle permet notamment le préchauffage de l'eau de process (cuves, blanchiment), l'alimentation des réseaux de chauffage des locaux, ou le maintien en température de lignes de pasteurisation. Le principal avantage réside dans son efficacité radicale : contrairement à d'autres solutions, elle ne crée pas d'énergie mais réutilise une ressource déjà payée et disponible. Avec une maturité technologique totale (TRL 9), elle offre un retour sur investissement rapide (souvent entre 1 et 5 ans) et réduit immédiatement les émissions de CO₂ en diminuant la charge des chaudières principales.

6.9. L'Hydrogène Bas Carbone :

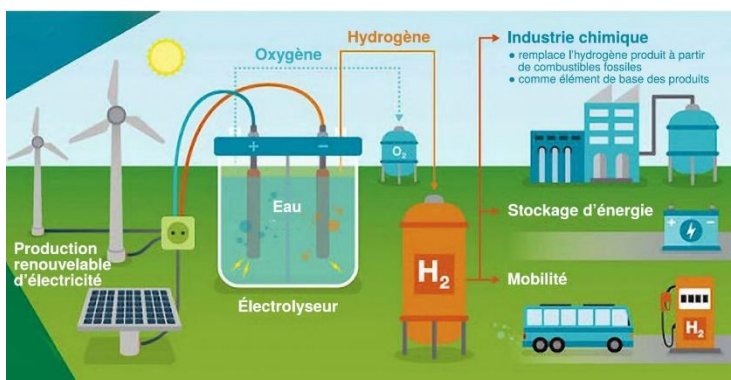


Figure 23: Schéma de principe de production et utilisation de l'hydrogène

Description et principes de fonctionnement

L'hydrogène est un vecteur énergétique capable de générer de l'énergie sans émissions directes de CO₂. Il se décline principalement en deux catégories : l'hydrogène vert, produit par électrolyse de l'eau via des énergies renouvelables, et l'hydrogène bas carbone (ou bleu), issu du reformage du gaz naturel avec capture et stockage du carbone. Une fois produit et stocké sous pression ou par cryogénie, l'hydrogène est valorisé soit par combustion directe dans des brûleurs adaptés pour générer de la vapeur ou de la chaleur, soit via des piles à combustible pour une production combinée de chaleur et d'électricité (cogénération).

Utilisations et atouts pour l'agroalimentaire

Dans le secteur agroalimentaire, l'hydrogène se positionne comme le remplaçant direct du gaz fossile pour les procédés exigeant de très hautes températures (jusqu'à 800 °C). Il est particulièrement adapté pour alimenter les fours industriels, les tunnels de cuisson, les séchoirs et les unités de stérilisation ou de blanchiment. Contrairement aux pompes à chaleur ou à la récupération de chaleur fatale, souvent limitées en température, l'hydrogène permet de décarboner les usages thermiques les plus intensifs sans perte de performance. Son intégration permet une réduction immédiate des émissions de gaz à effet de serre dès lors qu'il se substitue aux chaudières et brûleurs à gaz conventionnels.

6.10. Chaudières électriques



Figure 24: Chaudière électrique

Les chaudières électriques permettent de produire de la chaleur ou de la vapeur par conversion directe de l'électricité en énergie thermique, principalement par effet Joule ou par induction. Lorsqu'elles sont alimentées par une électricité bas carbone ou renouvelable, elles constituent une solution efficace pour la décarbonation des procédés thermiques industriels.

Plusieurs types de chaudières électriques existent afin de répondre aux différents besoins thermiques de l'industrie agroalimentaire. Les chaudières à résistances permettent de produire de l'eau chaude ou de la chaleur de procédé jusqu'à environ 200 °C. Les chaudières vapeur électriques utilisent des résistances immergées pour produire de la vapeur à basse ou moyenne pression, tandis que les chaudières à induction sont destinées à des applications spécifiques nécessitant des températures plus élevées.

Le fonctionnement repose sur l'alimentation de résistances ou de systèmes à induction par de l'électricité, laquelle est intégralement convertie en chaleur. Cette chaleur est ensuite transmise à l'eau ou à un fluide caloporteur afin de produire directement de la chaleur ou de la vapeur utilisée dans les procédés industriels.

Les chaudières électriques peuvent être intégrées en remplacement direct des chaudières gaz ou fioul, en complément d'installations existantes dans une configuration hybride, ou pour répondre à des besoins thermiques ponctuels ou de pointe. Leur temps de réponse rapide les rend particulièrement adaptées aux procédés discontinus.

Dans l'industrie agroalimentaire, elles sont utilisées pour la production de vapeur destinée à la pasteurisation et à la stérilisation, le nettoyage et la désinfection des équipements (CIP), le chauffage des procédés et des installations, ainsi que la production d'eau chaude sanitaire industrielle.

En matière de décarbonation, les chaudières électriques présentent l'avantage de ne générer aucune émission directe de CO₂ sur site et d'offrir un rendement proche de 100 %. Elles sont simples à mettre en œuvre, flexibles, peu encombrantes et nécessitent une maintenance réduite, bien que leur impact carbone dépende fortement du mix électrique utilisé.

Leur déploiement reste toutefois soumis à certaines contraintes, notamment le coût potentiellement élevé de l'électricité, la dépendance à la disponibilité d'une électricité bas

carbone, les puissances électriques importantes requises et une moindre adaptation aux très fortes puissances continues sans renforcement du réseau.

Dans une stratégie de décarbonation, les chaudières électriques sont particulièrement pertinentes lorsqu'elles sont alimentées par une électricité renouvelable ou bas carbone, couplées à des installations photovoltaïques ou à des solutions de stockage électrothermique, et utilisées comme solution de substitution rapide aux chaudières fossiles. Elles constituent ainsi une solution mature, simple et flexible pour décarboner les procédés thermiques de l'industrie agroalimentaire.

7. Analyse de décarbonation

7.1. Présentation synthétique des entreprises

7.1.1. Bonduelle



Figure 25: Logo BONDUELLE

Bonduelle est un acteur majeur de l'agroalimentaire spécialisé dans la transformation de légumes, notamment sous forme de conserves et de produits surgelés. Ses activités industrielles reposent sur des procédés thermiques intensifs, tels que le blanchiment, la cuisson et la stérilisation des légumes, ainsi que le nettoyage en place (CIP). Ces procédés nécessitent principalement de la vapeur et de l'eau chaude à des températures élevées, ce qui explique le recours historique au gaz naturel comme source d'énergie principale.

Les données consolidées issues des rapports de responsabilité sociétale indiquent que la consommation énergétique totale de Bonduelle s'élève à environ 679 216 MWh pour l'année 2025. Le gaz naturel représente environ 45 % de ce total, ce qui en fait la première source d'énergie du groupe. L'électricité provenant de sources nucléaire constitue 17 % de la consommation. Les énergies renouvelables atteignent déjà 28 % du mix énergétique, traduisant une démarche engagée mais encore incomplète de décarbonation.

Ces données sont issues du rapport RSE 2024-2025 de Bonduelle et correspondent à un périmètre consolidé couvrant l'ensemble des sites industriels du groupe.

Analyse des données énergétiques

L'analyse du mix énergétique de Bonduelle met en évidence une forte dépendance aux énergies thermiques, en particulier au gaz naturel, qui est principalement utilisé pour la production de vapeur industrielle. Cette vapeur est indispensable aux étapes de blanchiment et de stérilisation, qui requièrent des températures élevées, généralement comprises entre 120 et 130 °C, voire plus selon les procédés. Ces niveaux de température constituent une contrainte technique forte pour la décarbonation.

La part significative de l'électricité reflète quant à elle les besoins en entraînement mécanique (convoyeurs, moteurs), en froid industriel (notamment pour les légumes surgelés) et en auxiliaires de production. Cette électricité constitue un levier potentiel de décarbonation indirecte, sous réserve de son origine et de son intensité carbone.

Enfin, la présence déjà notable d'énergies renouvelables dans le mix (28 %) indique que Bonduelle a engagé des actions concrètes. Toutefois, au regard du poids du gaz naturel dans les usages thermiques critiques, la décarbonation complète des besoins énergétiques reste un enjeu majeur, nécessitant des solutions capables de répondre à des puissances élevées et à des besoins thermiques continus ou saisonniers.

Identification des gisements et contraintes pour la décarbonation

L'activité de transformation de légumes génère des gisements internes de déchets organiques, tels que les résidus végétaux, écarts de tri et sous-produits de transformation. Ces flux constituent un atout important pour la décarbonation, car ils peuvent être valorisés énergétiquement, notamment via des solutions de type biomasse ou méthanisation. Cette logique d'économie circulaire est cohérente avec la stratégie de responsabilité sociétale de Bonduelle et avec les premières intégrations d'énergies renouvelables déjà observées dans son mix énergétique.

En revanche, pour Bonduelle l'enjeu majeur réside dans la conciliation de besoins thermiques extrêmes et d'un cycle de production saisonnier. Les procédés de stérilisation des conserves constituent un verrou thermique critique, exigeant des températures stables et supérieures à 120°C, ce qui limite l'usage de technologies comme la géothermie basse température ou les pompes à chaleur classiques. Cette contrainte technique est accentuée par une activité calée sur les récoltes de légumes, générant des pics de demande massifs qui imposent des solutions énergétiques robustes, flexibles et capables de délivrer une forte puissance sur de courtes périodes. Enfin, bien que la production génère des déchets organiques valorisables par méthanisation, leur exploitation en interne reste complexe en raison de la dispersion géographique des sites et de volumes parfois insuffisants pour justifier des unités dédiées.

7.1.2. Danone



Figure 26: Logo DANONE

Danone est un acteur international majeur de l'industrie agroalimentaire, notamment dans les produits laitiers frais, les yaourts, les desserts lactés et les boissons nutritionnelles. Les sites industriels de Danone dans le nord de la France fonctionnent majoritairement comme des laiteries de grande capacité, caractérisées par des procédés thermiques et frigorifiques très exigeants sur le plan énergétique. Les principales étapes de transformation incluent la réception et le stockage du lait cru, la pasteurisation, la stérilisation UHT, la fermentation, ainsi que le nettoyage en place (CIP), indispensable au respect des normes sanitaires.

D'après les données issues du document d'enregistrement universel de Danone, la consommation énergétique annuelle d'un site type Danone est dominée par le gaz naturel, qui représente environ 50 à 60 % du mix énergétique. L'électricité constitue le second poste

énergétique avec 35 à 40 % du mix, principalement dédiée au froid industriel et aux équipements électriques. Les énergies renouvelables (incluant biogaz, solaire et achats d'électricité verte) restent minoritaires, avec une part inférieure à 10 %.

Analyse des données énergétiques

L'analyse détaillée des usages énergétiques montre que le gaz naturel est un vecteur critique pour les procédés thermiques à haute et moyenne température. Il alimente en particulier les chaudières à vapeur utilisées pour la stérilisation UHT du lait, qui nécessite des températures supérieures à 140 °C, pouvant atteindre 150 °C, afin de garantir la sécurité microbiologique des produits. Le gaz est également utilisé pour la pasteurisation, qui s'effectue dans une plage de 72 à 85 °C, ainsi que pour le maintien en température des cuves de fermentation, autour de 40 à 45 °C, et pour le nettoyage en place, qui mobilise de l'eau chaude entre 60 et 85 °C.

L'électricité, quant à elle, est essentiellement consommée par les systèmes de froid industriel, qui constituent le poste électrique le plus important du site. Ces systèmes fonctionnent de manière quasi continue pour assurer le refroidissement rapide des produits, le stockage du lait cru à +1 à +4 °C et la conservation des produits finis à +2 à +6 °C. La continuité de la chaîne du froid est un impératif absolu pour la qualité et la sécurité des produits, ce qui confère à l'électricité un rôle stratégique.

Enfin, la structure énergétique de Danone se caractérise par des cycles thermiques alternant phases chaudes et phases froides, ainsi qu'une production globalement continue tout au long de l'année, avec toutefois des variations liées à la collecte du lait et aux volumes transformés.

Identification des gisements et contraintes pour la décarbonation

Les sites Danone disposent de gisements internes limités en déchets organiques énergétiquement valorisables, contrairement à certaines industries végétales. Les sous-produits laitiers (lactosérum, boues de station d'épuration) peuvent néanmoins constituer des ressources potentielles pour la production de biogaz, bien que leur valorisation énergétique reste souvent externalisée ou limitée à des volumes modestes. En revanche, les procédés thermiques et frigorifiques génèrent des gisements importants de chaleur fatale, notamment sur les circuits de refroidissement post-pasteurisation et post-stérilisation, qui pourraient être récupérés et valorisés à basse ou moyenne température.

Pour cette entreprise laitière, l'impératif de décarbonation se heurte à des barrières techniques et opérationnelles majeures. Le besoin critique de chaleur pour la stérilisation UHT, dont les températures dépassent 140°C, constitue un verrou technologique majeur : cette plage de température reste largement inaccessible aux pompes à chaleur classiques et difficilement couverte par les solutions électriques matures. Cette contrainte thermique est doublée d'une exigence de continuité de service 24/7, où la sécurité sanitaire et la production ininterrompue excluent le recours à des sources d'énergie intermittentes ou expérimentales au profit d'une disponibilité énergétique permanente. Enfin, contrairement à d'autres filières, les sites laitiers disposent de faibles gisements de coproduits valorisables en interne, ce qui limite considérablement les perspectives d'autonomie énergétique par méthanisation ou biomasse.

Ainsi, l'analyse des gisements et contraintes montre que la décarbonation de Danone ne peut pas s'appuyer sur une solution unique. Elle devra combiner, à terme, la valorisation de la

chaleur fatale, l'électrification partielle des besoins basse et moyenne température, et le maintien de solutions thermiques robustes pour les procédés critiques à haute température.

7.1.3. Lesaffre



Figure 27: Logo LESAFFRE

Lesaffre est un industriel de la fermentation (levures, ingrédients microbiens) dont les procédés reposent sur des bioréacteurs/fermenteurs, des étapes de séparation (centrifugation/filtration), de concentration (évaporation) puis de déshydratation/séchage. Ce type d'activité combine des besoins thermiques importants (principalement pour l'évaporation et le séchage, souvent via vapeur) et une consommation électrique continue (agitation, instrumentation, pompes, compression, utilités). Les données pour Lesaffre (site de Marcq-en-Barœul) décrivent un modèle industriel où l'énergie est historiquement dominée par le gaz pour la chaleur de process, mais où une démarche avancée de récupération de chaleur et de décarbonation est déjà engagée (valorisation de chaleur fatale)

Sur le profil énergétique, le gaz naturel est principalement utilisé pour la production de la vapeur de process (évaporation/séchage) et le chauffage. Un point différenciant majeur de Lesaffre est la valorisation de chaleur fatale (site de Marcq-en-Barœul) : installation de deux PAC permettent de réutiliser la chaleur générée par le processus de fermentation, couvrant ainsi 70 % des besoins en chauffage de l'usine. Chaque année, ce système permet d'éviter l'émission de 30 000 tonnes de CO₂ et d'économiser 150 000 mètres cubes d'eau.

Analyse des données énergétiques

L'analyse des données montre que l'enjeu principal de décarbonation chez Lesaffre n'est pas seulement la substitution d'un combustible, mais l'optimisation d'un système énergétique déjà "hybride" : une part significative du besoin thermique est couverte par de la chaleur récupérée (ce qui réduit mécaniquement la consommation de gaz), tandis que le reste des besoins thermiques – notamment ceux associés à la production de vapeur pour l'évaporation et le séchage – demeure plus difficile à électrifier intégralement. Les procédés de fermentation génèrent naturellement de la chaleur (process exothermique) et obligent à refroidir : cette contrainte devient un atout puisque cette chaleur, captée à basse température, peut être relevée (via PAC) pour alimenter des usages à 60–95 °C (CIP, préchauffages, eau chaude process), ce qui explique la très forte part de "chaleur fatale valorisée".

Identification des gisements et contraintes (Hauts-de-France)

Le gisement le plus robuste et directement exploitable chez Lesaffre, est la chaleur fatale liée à la fermentation et aux utilités de refroidissement. C'est un gisement structurel, disponible de manière régulière, et particulièrement pertinent dans une industrie à fonctionnement continu : c'est précisément ce qui rend possible une couverture élevée du besoin thermique par récupération. Cette situation donne à Lesaffre un potentiel élevé pour l'électrification

“intelligente” : en valorisant une chaleur déjà produite (et auparavant dissipée), la PAC ne “fabrique” pas de la chaleur, elle augmente la valeur d’un flux thermique existant.

La transition énergétique de ce site repose sur un équilibre complexe entre électrification et maintien de solutions thermiques haute performance. Si les pompes à chaleur (PAC) valorisent efficacement la chaleur fatale, elles ne suffisent pas à couvrir les étapes de séchage et d’évaporation, qui exigent toujours de la vapeur à haute température et pression.

Cette limite technique impose un mix énergétique hybride où une solution d'appoint reste indispensable pour sécuriser la continuité de production et la stabilité financière. En parallèle, l’intégration de ces technologies dans un procédé de fermentation continu exige une précision extrême pour préserver la qualité microbiologique. Enfin, la valorisation des déchets organiques internes s'avère souvent plus pertinente via des partenariats territoriaux que par une gestion strictement interne, faute de volumes suffisants sur site.

7.1.4. Tereos



Figure 28: Logo TEREOS

Tereos est un acteur majeur de la filière betteravière (sucre, coproduits, parfois alcool/bioéthanol selon les sites) dont l’activité industrielle repose sur des opérations thermiques intensives : extraction du jus sucré, évaporation/concentration, cuisson-cristallisation, et séchage des coproduits (notamment pulpes). Les données indiquent un profil énergétique très fortement orienté vers la vapeur de procédé et donc historiquement vers le gaz naturel, avec des températures de vapeur élevées (environ 130 à 180 °C pour la vapeur haute pression). le site est engagé dans une trajectoire de substitution : une vapeur CSR (renouvelable) est prévue/considérée à hauteur d’environ 400 GWh/an, représentant environ 40 % des besoins thermiques et remplaçant une partie du gaz. Cela positionne Tereos comme un cas typique d’industrie agroalimentaire « haute température/vapeur », où la décarbonation est structurée par la capacité à substituer la production de vapeur.

Analyse des données énergétiques

L’analyse des données énergétiques met en évidence deux caractéristiques déterminantes. D’abord, la dépendance au gaz est liée à des besoins thermiques à haute température et à forte puissance, principalement sous forme de vapeur pour l’évaporation et les cuissons de sucre, et parfois en gaz direct ou vapeur pour le séchage des pulpes. Ensuite, le profil de consommation est très saisonnier : la période de campagne (pleine production) s’étend typiquement de fin septembre à fin janvier, avec un fonctionnement en continu 24/7, et représente la très grande majorité de l’énergie annuelle. Hors campagne (février → août), l’activité sucrière est fortement réduite, avec une présence plutôt maintenance/arrêts. Cette combinaison “haute température + pointe saisonnière” est un point clé : elle rend certains leviers (électrification totale) plus complexes, mais elle favorise des solutions capables de délivrer beaucoup de vapeur sur une fenêtre courte et intense, tout en restant fiables.

Identification des gisements et contraintes (Hauts-de-France)

Pour une sucrerie, les gisements et contraintes sont particulièrement structurants. Du côté des gisements, l'activité betteravière génère des coproduits et effluents valorisables énergétiquement (pulpes, eaux de process, éventuelles vinasses/effluents de distillation si le site produit de l'alcool), ce qui ouvre la porte à des schémas de méthanisation (production de biogaz/biométhane) en complément de la chaleur renouvelable. Le gisement "cœur" sur le plan énergétique reste cependant la capacité à substituer de la vapeur : c'est précisément ce que reflète le scénario CSR (vapeur renouvelable).

La campagne sucrière impose une contrainte de puissance massive sur une période très courte (4 à 5 mois), exigeant de grandes quantités de vapeur haute pression. Ce profil limite l'usage des pompes à chaleur aux besoins secondaires (préchauffage, eau chaude) et rend complexe l'adoption d'énergies renouvelables intermittentes.

Toute transition vers une alternative décarbonée impose donc une redondance coûteuse pour garantir la fiabilité totale durant la campagne. Par ailleurs, la valorisation énergétique des pulpes de betterave, via la méthanisation ou la combustion, reste vulnérable aux aléas agricoles qui impactent la disponibilité et la qualité constante de cette ressource.

7.1.5. Roquette



Figure 29: Logo ROQUETTE

Roquette est un acteur industriel majeur de la transformation de matières premières végétales, notamment le maïs, le blé et le pois, pour la production d'ingrédients alimentaires, nutritionnels et pharmaceutiques. Le site de Lestrem, situé dans les Hauts-de-France, constitue l'un des plus grands complexes industriels agroalimentaires d'Europe. Son activité repose sur une succession de procédés physico-chimiques et biologiques incluant l'extraction de l'amidon, la séparation des fractions, la fermentation, la concentration, l'évaporation et le séchage. Ces opérations sont fortement consommatrices d'énergie, en particulier sous forme de vapeur et d'électricité, et fonctionnent de manière quasi continue tout au long de l'année.

Le gaz naturel demeure la principale source d'énergie du site, utilisé majoritairement pour la production de vapeur nécessaire aux procédés d'évaporation, de distillation et de séchage. L'électricité constitue le second poste énergétique, indispensable au fonctionnement des équipements de séparation, de compression, de pompage et aux installations de fermentation. Ce profil fait de Roquette une industrie à forte intensité énergétique, où la décarbonation du gaz représente un enjeu stratégique tant sur le plan environnemental qu'économique.

Analyse des données énergétiques

L'analyse des données énergétiques met en évidence une prédominance des besoins thermiques à moyenne et haute température, généralement fournis par de la vapeur industrielle. Les températures de procédé s'étendent typiquement de 70–90 °C pour certaines phases d'extraction et de lavage, jusqu'à 120–160 °C pour les étapes d'évaporation, de concentration

et de séchage. Ces niveaux de température, associés à des puissances élevées et à un fonctionnement continu, expliquent la dépendance structurelle au gaz naturel et constituent un verrou majeur pour une électrification complète à court terme.

La consommation électrique est également élevée et relativement stable sur l'année, reflet d'un outil industriel dimensionné pour une production continue. Cette électricité est essentielle au cœur des procédés et ne peut être substituée sans modification profonde des installations. En revanche, elle offre un levier indirect de décarbonation via l'amélioration de son contenu carbone (électricité renouvelable) et par son couplage à des technologies permettant de réduire les besoins thermiques, comme la récupération de chaleur ou la compression mécanique de vapeur. Contrairement à des industries saisonnières, le profil énergétique de Roquette est caractérisé par une forte régularité annuelle, ce qui favorise l'intégration de solutions capitalistiques lourdes mais performantes sur le long terme.

Identification des gisements et contraintes

Les sites de Roquette disposent de gisements énergétiques variés et significatifs. Le premier gisement majeur est la chaleur fatale industrielle, générée par de nombreux équipements de refroidissement, condenseurs, rejets d'évaporateurs et procédés de fermentation. Ces flux thermiques, souvent disponibles à des températures comprises entre 30 et 80 °C, représentent un potentiel important pour des actions d'efficacité énergétique, soit par récupération directe, soit par intégration thermique avancée. La nature continue des procédés rend ce gisement particulièrement stable et exploitable.

Un second gisement réside dans les coproduits et résidus organiques issus de la transformation végétale, tels que les pulpes, fibres, eaux chargées et boues de stations de traitement. Ces flux peuvent être valorisés par différentes voies énergétiques : méthanisation, combustion biomasse, ou intégration dans des filières territoriales de valorisation. À la différence d'autres secteurs agroalimentaires, Roquette dispose de volumes importants et réguliers, ce qui renforce la faisabilité de solutions internes ou semi-internes de valorisation énergétique.

Un troisième gisement concerne les énergies renouvelables locales, notamment le photovoltaïque. Les surfaces industrielles disponibles (toitures, friches, parkings) offrent des opportunités pour une production électrique décarbonée, même si celle-ci reste marginale au regard des besoins thermiques du site. Ce levier contribue néanmoins à la réduction de l'empreinte carbone globale et à la sécurisation de l'approvisionnement électrique.

Enfin, des gisements technologiques internes existent via l'optimisation des procédés et des utilités, incluant la réduction des pertes vapeur, la récupération et la réutilisation des condensats, l'amélioration des réseaux thermiques, et surtout l'intégration de technologies de type compression mécanique de vapeur (MVR) dans les étapes d'évaporation. Ces leviers permettent de réduire directement la demande en vapeur issue du gaz, sans changer la nature des procédés. Les principales contraintes associées à ces gisements restent les niveaux de température élevés requis, la complexité d'intégration dans un outil industriel existant et la nécessité de maintenir une fiabilité opérationnelle maximale.

En revanche, la taille monumentale du site de Lestrem et l'imbrication de ses procédés rendent toute modification énergétique complexe et risquée pour la continuité de production. Un « noyau dur » de consommation, lié à l'évaporation, la distillation et au séchage à haute température, reste particulièrement difficile à électrifier avec les technologies actuelles.

Enfin, la mise en œuvre de solutions comme la compression mécanique de vapeur (MVR) ou la géothermie exige des investissements massifs. Leur rentabilité s'inscrit sur le long terme et demeure vulnérable à la forte volatilité des prix de l'énergie.

7.1.6. Délifrance



Figure 30: Logo DELIFRANCE

Délifrance est un acteur majeur de la boulangerie industrielle, spécialisé dans la production de pains, viennoiseries et produits de boulangerie surgelés. Les sites industriels de Délifrance dans les Hauts-de-France sont caractérisés par des procédés thermiques combinant cuisson, précuisson, surgélation, stockage frigorifique et nettoyage en place. Cette configuration conduit à une double dépendance énergétique : d'une part au gaz naturel, principalement utilisé pour l'alimentation des fours de cuisson, et d'autre part à l'électricité, indispensable aux chaînes de surgélation, aux chambres froides et aux équipements mécaniques.

Le gaz naturel constitue la principale source d'énergie thermique, utilisée quasi exclusivement pour la cuisson et la précuisson, avec des températures élevées pouvant dépasser 200 °C dans les fours. L'électricité représente également un poste énergétique majeur, en raison du recours intensif au froid industriel et à la surgélation, processus clés du modèle économique de Délifrance. Ce profil énergétique positionne l'entreprise parmi les industries agroalimentaires à forte intensité énergétique, avec des contraintes spécifiques liées à la qualité produit et à la continuité des lignes de production.

Analyse des données énergétiques

L'analyse des données énergétiques met en évidence une forte concentration de la consommation de gaz sur les fours de cuisson, qui constituent le cœur du procédé industriel. Ces équipements nécessitent des températures très élevées et des montées en régime rapides, ce qui explique le recours historique au gaz naturel pour des raisons de performance, de flexibilité et de maîtrise du process. Cette dépendance au gaz pour la cuisson représente le principal verrou technique à la décarbonation complète.

En parallèle, la consommation électrique est structurellement élevée et relativement continue sur l'année, du fait des besoins en surgélation, en stockage frigorifique et en entraînement des équipements. Cette électricité est critique pour la qualité sanitaire et organoleptique des produits finis, et ne peut être réduite sans impact direct sur la production. Toutefois, la coexistence de flux thermiques chauds (fours) et froids (surgélation) crée un potentiel important de synergies énergétiques, notamment via la récupération de chaleur fatale. Le profil énergétique de Délifrance est globalement continu, avec des variations liées aux volumes produits, ce qui favorise l'intégration de solutions de récupération et de valorisation thermique à long terme.

Identification des gisements et contraintes

Les sites de Délifrance disposent de gisements énergétiques diversifiés, au-delà des seules technologies de substitution du gaz. Le premier gisement significatif est la chaleur fatale des fours de cuisson, disponible à des températures élevées via les fumées et les rejets thermiques. Cette chaleur est aujourd'hui en grande partie dissipée, alors qu'elle pourrait être récupérée pour des usages internes tels que le préchauffage d'air, la production d'eau chaude ou l'alimentation de procédés à plus basse température.

Un second gisement important concerne la chaleur fatale des installations frigorifiques. Les groupes de froid et tunnels de surgélation rejettent de grandes quantités de chaleur à basse et moyenne température, qui peuvent être valorisées pour le chauffage des locaux, l'eau chaude sanitaire ou le nettoyage en place. La coexistence sur un même site de besoins en froid et en chaleur constitue un atout structurel pour améliorer l'efficacité énergétique globale.

Un troisième gisement réside dans les optimisations de procédés et d'utilités, incluant l'amélioration du rendement des fours, la réduction des pertes thermiques, l'optimisation des cycles de cuisson, la récupération et la réutilisation de condensats, ainsi que l'amélioration de l'isolation des réseaux. Les principales contraintes associées à ces gisements sont liées aux exigences strictes de qualité produit, à la nécessité de maintenir des profils thermiques précis dans les fours, et à la continuité de production.

En ce qui concerne les contraintes pour cette entreprise, la cuisson et la précuisson à plus de 200°C constituent un verrou technologique majeur, car l'électrification des fours peut altérer la qualité finale du produit (croûte, coloration) tout en engendrant des coûts d'exploitation élevés. Bien que la coexistence de besoins chauds (fours) et froids (surgélation) offre un potentiel de récupération de chaleur, sa mise en œuvre se heurte à la complexité technique et au manque d'espace dans les ateliers.

Enfin, la surgélation est un processus électrique intensif et incompressible qui sature déjà une grande partie de la capacité énergétique du site. Cette contrainte limite fortement la marge de manœuvre pour électrifier les fours sans risquer une explosion des coûts ou une surcharge du réseau électrique.

7.2. Scénarios de décarbonation envisagés

7.2.1. Pompes à chaleur industrielles (PAC)

Les pompes à chaleur industrielles constituent aujourd'hui le levier le plus mature et le plus immédiatement mobilisable pour la décarbonation des besoins thermiques basse et moyenne température dans l'agroalimentaire. Leur principe repose sur la valorisation de chaleur fatale issue des procédés industriels (refroidissements, fermentations, condenseurs, groupes frigorifiques) afin de produire de la chaleur utile à un niveau de température plus élevé. Dans les industries agroalimentaires étudiées, une part significative des besoins thermiques se situe dans des plages compatibles avec les PAC, typiquement entre 60 et 95 °C, correspondant aux usages de nettoyage en place (CIP), blanchiment, pasteurisation, eau chaude de process et chauffage de locaux.

Les cas de Danone, Lesaffre, Bonduelle et Roquette montrent que les gisements de chaleur fatale sont structurels et continus, notamment dans les sites fonctionnant toute l'année. Les PAC permettent ainsi une substitution directe du gaz naturel sur ces usages, avec des coefficients de performance élevés (COP généralement compris entre 3 et 5), réduisant fortement les émissions de CO₂ lorsque l'électricité est faiblement carbonée. Dans le contexte des Hauts-de-France, la décarbonation progressive du mix électrique renforce encore l'intérêt environnemental de cette technologie.

Cependant, les PAC présentent des limites structurelles. Elles ne permettent pas de couvrir les besoins à haute température, notamment la production de vapeur au-delà de 120 °C, requise pour la stérilisation, la cuisson ou le séchage intensif. Leur déploiement nécessite également une intégration fine dans les procédés existants et des investissements parfois conséquents. Malgré ces limites, les PAC constituent le socle central de toute stratégie de décarbonation du secteur agroalimentaire, en raison de leur maturité technologique, de leur efficacité énergétique et de leur compatibilité avec de nombreux procédés.

7.2.2. Méthanisation

La méthanisation repose sur la valorisation des déchets et coproduits organiques pour produire du biogaz, pouvant être utilisé directement ou épuré en biométhane injectable ou consommable sur site. Cette technologie présente un intérêt majeur dans l'agroalimentaire, en particulier pour les filières végétales et de fermentation, qui génèrent des flux organiques importants et réguliers. Les entreprises comme Bonduelle, Roquette, Tereos et Lesaffre disposent de gisements potentiels sous forme de résidus de transformation, effluents de process, pulpes, boues ou sous-produits agricoles.

L'atout principal de la méthanisation réside dans sa capacité à produire un gaz renouvelable directement substituable au gaz fossile, sans modification profonde des équipements thermiques existants. Elle est ainsi particulièrement adaptée aux besoins de vapeur à haute température, qui constituent le principal verrou à l'électrification. La méthanisation permet également une intégration territoriale forte, en s'appuyant sur des partenariats agricoles et en renforçant l'économie circulaire locale, ce qui est cohérent avec le tissu agricole dense des Hauts-de-France.

Néanmoins, la méthanisation présente aussi des contraintes importantes. La disponibilité et la continuité des gisements doivent être garanties, les projets nécessitent des investissements élevés et des délais de développement longs, et les contraintes réglementaires et opérationnelles peuvent être lourdes. De plus, tous les sites industriels ne disposent pas de volumes suffisants pour une unité dédiée, rendant parfois préférable un schéma territorial. Malgré ces limites, la méthanisation apparaît comme un levier indispensable pour traiter les besoins thermiques non électrifiables et compléter les solutions d'électrification.

7.2.3. Compression mécanique de vapeur (MVR)

La compression mécanique de vapeur est une technologie d'efficacité énergétique particulièrement adaptée aux procédés d'évaporation et de concentration, largement présents dans l'agroalimentaire. Son principe consiste à comprimer la vapeur issue du procédé afin d'augmenter sa température et de la réinjecter comme source de chaleur, réduisant ainsi le besoin de vapeur neuve produite par des chaudières.

Dans les entreprises étudiées, notamment Roquette, Tereos, Danone et Bonduelle, l'évaporation constitue un poste énergétique majeur. La MVR permet une réduction très significative de la consommation de gaz, parfois supérieure à 50 % sur les procédés concernés, avec une technologie éprouvée et déjà largement déployée dans l'industrie. Elle présente l'avantage de réduire la consommation d'énergie indépendamment de la source, ce qui en fait un levier robuste et pérenne.

Les limites de la MVR résident principalement dans son coût d'investissement et dans la nécessité d'une intégration technique fine, parfois complexe sur des installations existantes. Toutefois, compte tenu des gains énergétiques et carbone obtenus, la MVR apparaît comme l'un des leviers les plus efficaces pour la décarbonation des procédés intensifs en vapeur.

7.2.4. Énergies renouvelables électriques et contrats d'achat (CPPA)

Les énergies renouvelables électriques, notamment le photovoltaïque et l'éolien, jouent un rôle transversal dans la décarbonation du secteur agroalimentaire. Leur contribution directe à la substitution du gaz reste limitée, mais elles sont essentielles pour verdir l'électricité consommée et rendre réellement bas carbone les solutions électrifiées telles que les PAC, la MVR ou les stockages thermiques.

Les sites industriels étudiés disposent souvent de surfaces importantes (toitures, parkings, friches) permettant l'installation de centrales photovoltaïques, ou peuvent recourir à des contrats d'achat d'électricité renouvelable (CPPA), comme c'est le cas pour Lesaffre. Ces dispositifs permettent de sécuriser un approvisionnement électrique décarboné sur le long terme, sans investissement direct majeur.

Les principales limites de ces solutions résident dans leur intermittence et dans le décalage entre production et consommation, ce qui nécessite des solutions complémentaires de flexibilité ou de stockage. Néanmoins, les ENR électriques constituent un levier structurant pour accompagner l'électrification progressive des usages thermiques.

7.2.5. Stockage thermique et ETES

Le stockage thermique, notamment sous forme de stockage sensible (ballons d'eau chaude), constitue un levier de flexibilité permettant de découpler production et consommation de chaleur. Dans les industries dont les besoins thermiques se situent en dessous de 100 °C, comme Danone ou Lesaffre, ces solutions sont simples, peu coûteuses et efficaces.

En revanche, pour les besoins à haute température et sous forme de vapeur, les solutions de stockage deviennent plus complexes et moins matures. Les ETES à haute température restent aujourd'hui exploratoires et coûteuses, limitant leur déploiement à grande échelle dans l'agroalimentaire. Le stockage thermique apparaît donc comme un levier complémentaire, utile pour maximiser l'efficacité des PAC et réduire les pointes de consommation fossile, mais rarement suffisant seul.

7.2.6. Géothermie et hydrogène bas carbone

La géothermie profonde et l'hydrogène bas carbone sont évoqués comme des solutions de long terme. La géothermie présente un potentiel théorique, mais reste peu déployée dans les Hauts-

de-France en raison des coûts, des risques géologiques et de l'inadéquation avec les besoins de vapeur très haute température. L'hydrogène, quant à lui, pourrait à terme substituer le gaz pour certains usages, mais il demeure aujourd'hui limité par des coûts élevés, une faible disponibilité et une absence de filière industrielle mature pour la chaleur.

Ces technologies doivent donc être considérées comme exploratoires, pertinentes à long terme ou dans des cas très spécifiques, mais non prioritaires à court et moyen terme pour la majorité des sites agroalimentaires.

7.3. Contraintes structurelles et facteurs de résistance à la décarbonation dans les Hauts-de-France

La décarbonation de l'industrie agroalimentaire dans la région des Hauts-de-France se heurte à un ensemble de contraintes d'ordre technique, économique et organisationnel, fortement liées au contexte régional et aux spécificités des filières industrielles locales. Ces facteurs contribuent à expliquer le rythme encore modéré de la transition énergétique, malgré l'existence d'objectifs climatiques ambitieux et une pression croissante liée aux enjeux énergétiques.

L'un des premiers freins réside dans l'héritage industriel de la région, historiquement orientée vers les industries lourdes et minières. Cette trajectoire a conduit au développement d'infrastructures énergétiques largement fondées sur l'usage des combustibles fossiles, en particulier le gaz naturel. Cette dépendance structurelle crée un effet de verrouillage technologique, tant au niveau des équipements que des pratiques d'approvisionnement énergétique.

Par ailleurs, les filières dominantes du territoire, telles que la sucrerie, l'amidonnerie et la transformation céréalière, se caractérisent par une intensité énergétique élevée. Ces activités reposent sur des procédés nécessitant de grandes quantités de vapeur à haute température, ce qui rend leur électrification complexe et limite, à court terme, les possibilités de substitution directe du gaz fossile.

La structure du tissu industriel régional constitue également un facteur limitant. La forte présence de petites et moyennes entreprises ainsi que d'entreprises de taille intermédiaire réduit l'accès aux ressources financières, aux compétences spécialisées en énergie et à la capacité d'investissement nécessaire pour engager des projets de décarbonation impliquant des coûts d'investissement élevés. Cette contrainte financière freine l'adoption de solutions innovantes, pourtant nécessaires à la transition.

Enfin, la variabilité saisonnière de certaines productions, notamment dans les secteurs de la sucrerie et de l'amidonnerie, complexifie la mise en œuvre de solutions énergétiques bas carbone. Les campagnes de production concentrent les consommations sur des périodes limitées de l'année, ce qui rend plus difficile l'intégration de technologies nécessitant un fonctionnement continu ou reposant sur des ressources énergétiques intermittentes.

De manière transversale, ces différents éléments montrent que les obstacles à la décarbonation ne relèvent pas uniquement de considérations financières ou technologiques. Ils s'inscrivent dans un cadre systémique, résultant de l'interaction entre les exigences des procédés industriels, les contraintes opérationnelles, l'héritage industriel régional et la structure

économique du territoire. Dès lors, toute stratégie de sortie du gaz fossile doit s'appuyer sur une analyse approfondie des contraintes propres à chaque site industriel, privilégier des trajectoires progressives et hybrides plutôt qu'un remplacement brutal des technologies existantes, et intégrer une dimension territoriale permettant la mutualisation des risques et des investissements. Cette approche peut notamment s'appuyer sur des logiques d'économie circulaire, telles que la méthanisation ou le développement de réseaux de chaleur.

Ainsi, l'analyse de ces contraintes met en évidence la nécessité de mener des études de faisabilité approfondies, seules capables de concevoir des projets de décarbonation à la fois réalistes, robustes et acceptables pour les industriels, comme cela sera développé dans la section suivante.

7.4. Limites et pistes pour études de faisabilité

La méthodologie développée dans cette pré-étude fournit un cadre d'analyse robuste pour évaluer les pistes de décarbonation de l'industrie agroalimentaire. Toutefois, en tant qu'étape de pré-faisabilité, elle présente certaines limites inhérentes à son niveau d'approfondissement et ouvre la voie à des études complémentaires nécessaires pour valider et concrétiser les scénarios identifiés.

7.4.1. Limites de la pré-étude

Les principales limites de cette approche tiennent avant tout à la nature des données mobilisées, aux choix méthodologiques retenus et au cadre d'analyse adopté. L'étude s'appuie majoritairement sur des données génériques issues de profils-types de consommation, de facteurs d'émission standardisés et de statistiques sectorielles agrégées. Si ces éléments permettent d'appréhender les ordres de grandeur et les enjeux à l'échelle régionale, ils ne reflètent pas pleinement la diversité des situations industrielles. Les spécificités propres à chaque site telles que la configuration des équipements, les taux de fonctionnement réels, les pratiques de maintenance ou encore les pertes énergétiques spécifiques, ne sont que partiellement prises en compte. L'absence de données fines, comme des courbes de charge horaires détaillées ou des rendements mesurés en conditions réelles d'exploitation, limite ainsi la précision des évaluations techniques et économiques proposées.

Par ailleurs, la modélisation technico-économique repose sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices concernant les niveaux de CAPEX, d'OPEX, l'évolution des prix de l'énergie ou encore les trajectoires de décarbonation du mix électrique. Bien que ces hypothèses soient étayées par des sources reconnues et restent cohérentes avec les tendances actuelles, elles demeurent sujettes à des incertitudes susceptibles d'influencer de manière significative la comparaison entre scénarios. De plus, certaines contraintes opérationnelles complexes telles que l'intégration physique des nouvelles technologies, la gestion des arrêts de production nécessaires aux opérations de retrofit ou les risques associés à l'implémentation de solutions encore peu matures industriellement ne peuvent être appréhendées que de façon partielle dans ce cadre d'analyse.

Enfin, cette étude préliminaire, menée selon une approche externe et sectorielle, a été confrontée à un accès limité aux données confidentielles des entreprises industrielles. L'absence de bilans énergétiques détaillés, de schémas d'implantation précis ou de plans d'investissement stratégiques restreint la capacité à évaluer finement les impacts de la décarbonation sur l'ensemble de la performance industrielle. En particulier, les effets potentiels

sur la productivité, la qualité des produits ou les coûts de production globaux ne peuvent être analysés qu'indirectement, au-delà de la seule réduction de la facture énergétique.

7.4.2. Études complémentaires nécessaires

Le passage d'une phase de pré-faisabilité à une faisabilité opérationnelle, puis à un déploiement industriel à l'échelle d'un site réel, suppose la réalisation d'études complémentaires ciblées, destinées à lever les incertitudes identifiées et à sécuriser les décisions d'investissement. Ces études doivent être conduites de manière spécifique pour chaque site ou projet concret, en tenant compte de ses contraintes techniques, économiques et organisationnelles.

En premier lieu, la conduite d'un audit énergétique détaillé et confidentiel constitue une étape indispensable. Réalisé in situ, en étroite collaboration avec l'industriel, ce diagnostic permet de quantifier précisément l'ensemble des flux énergétiques (chaleur, froid et électricité) sur des bases temporelles fines, notamment horaires. Il vise à identifier et caractériser les gisements de chaleur fatale, à mesurer les pertes au niveau des réseaux internes et à établir un bilan énergétique fiable, représentatif du fonctionnement réel du site. Cet audit doit également intégrer une évaluation approfondie de l'état, des rendements et des marges d'amélioration des équipements existants.

En parallèle, une étude process approfondie est nécessaire afin d'analyser finement les procédés industriels et leurs exigences thermodynamiques. Menée en interne ou par un bureau d'études spécialisé, elle permet d'évaluer la compatibilité des solutions de décarbonation envisagées telles que les pompes à chaleur industrielles, la recompression mécanique de vapeur ou les chaudières électriques avec les paramètres critiques de production. Cette analyse porte notamment sur les cycles thermiques, la stabilité des températures et des pressions, la qualité de la vapeur produite, les temps de réponse des installations, ainsi que le respect des normes sanitaires et de sécurité. Elle doit également explorer les leviers d'optimisation énergétique et les possibilités d'intégration thermique avancée au sein du site.

Par ailleurs, l'intégration de ces nouvelles technologies implique une étude spécifique des réseaux électriques et thermiques. Celle-ci vise à analyser la capacité et la flexibilité des infrastructures existantes, tant internes qu'externes, en évaluant la puissance électrique disponible, la robustesse des réseaux de vapeur et d'eau chaude, ainsi que les interactions avec les réseaux publics. Cette étape est essentielle pour anticiper les besoins en renforcement de réseau, les contraintes de raccordement, les profils de soutirage et d'injection, ainsi que les conditions contractuelles associées à une électrification accrue ou à une production locale d'énergies renouvelables.

Enfin, une analyse financière et économique approfondie doit être menée pour chaque scénario techniquement viable. Cette modélisation, conduite de manière confidentielle, intègre l'ensemble des coûts d'investissement spécifiques (équipements, ingénierie, génie civil) ainsi que les coûts opérationnels révisés liés à l'exploitation et à la maintenance. Elle prend également en compte les économies d'énergie et de carbone recalculées sur des bases réalistes, les dispositifs de financement mobilisables, tels que les subventions, les certificats d'économies d'énergie ou les prêts bonifiés, ainsi qu'une analyse de risques approfondie. Cette dernière inclut notamment des scénarios d'évolution des prix de l'énergie, du coût du carbone et des délais de mise en œuvre, afin d'évaluer la robustesse économique globale du projet et de calculer des indicateurs financiers pertinents tels que la valeur actuelle nette et le taux de rentabilité interne.

La réalisation de ces études complémentaires, fondées sur des données réelles et confidentielles et une analyse technique approfondie, permettra de transformer les pistes prometteuses identifiées en cette pré-étude en projets industriels robustes, chiffrés, adaptés aux réalités opérationnelles et économiques de chaque entreprise, et sécurisés sur le plan de la mise en œuvre.

8.Regards des experts sur la décarbonation énergétique de l'agroalimentaire

Regards d'experts sur la décarbonation énergétique de l'agroalimentaire



Magaly Pennequin

Experte en transition écologique et énergétique, co-gérante chez JPC Partner

Souligne la nécessité d'élargir l'étude (intégration de Danone) et de classer les entreprises selon leur profil d'émissions et la maturité de leurs actions de décarbonation. Elle insiste sur une approche réglementaire, technologique et industrielle globale, mobilisant tous les leviers disponibles. Elle met également en avant l'importance de scénarios spécifiques pour les PME, dont les moyens sont plus limités que ceux des grandes entreprises.

Philippe Vasseur

Ancien ministre de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation,
Président fondateur du World Forum for a Responsible Economy et de la mission Rev3

Aborde la décarbonation sous l'angle économique et politique. Il estime que, malgré l'engagement réel des industriels, la transition reste relativement lente, notamment en raison d'une concurrence jugée inéquitable entre les entreprises produisant localement et les produits importés issus de pays aux réglementations carbone plus souples. Il souligne ainsi l'importance de décarboner dès l'amont agricole. Enfin, il rappelle que notre étude doit s'attacher à identifier les leviers permettant de convaincre les entreprises, puisque ce sont elles, et non l'État, qui assurent l'essentiel du financement des actions de décarbonation.



Cédric Philibert

Ancien analyste à l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE),
Chercheur associé au centre Énergie et Climat de l'IFRI, spécialiste de l'hydrogène vert et des énergies renouvelables.

Il affirme que la décarbonation repose avant tout sur une analyse précise des niveaux de température et des usages spécifiques du gaz pour chaque site industriel. Sur cette base, il met en avant le stockage électrothermique (ETES) comme une solution particulièrement prometteuse, offrant à la fois flexibilité et performance malgré certains défis. Il identifie également plusieurs leviers essentiels pour remplacer les énergies fossiles : les pompes à chaleur, la recompression mécanique de vapeur (MVR), la biomasse et l'électrification. Enfin, il estime qu'une réduction des émissions de CO₂ de 80 à 90 % constitue un objectif ambitieux mais réaliste pour le secteur agroalimentaire.



Claude LENGLET

Architecte de la Troisième Révolution Industrielle (rev3) en Hauts-de-France,
Ancien Directeur Scientifique du groupe Rabot Dutilleul, expert en construction durable et RSE
Fondateur du World Forum Lille Institute.

Selon l'expert, la décarbonation de l'agroalimentaire repose sur une analyse précise des usages du gaz, des équipements et des besoins en température propres à chaque procédé industriel. Il met en avant la sobriété et l'efficacité énergétique comme leviers prioritaires, notamment par l'optimisation des procédés, la réduction des consommations et la récupération de chaleur. Cette démarche vise à réduire durablement les consommations d'énergie et les émissions de CO₂, tout en adaptant les solutions aux spécificités de chaque activité industrielle.



Conclusion et recommandations

Cette pré-étude a permis d'élaborer, d'appliquer et de tester une méthodologie complète d'analyse des voies de décarbonation des procédés énergétiques dans l'industrie agroalimentaire, avec un focus particulier sur la substitution du gaz naturel dans la région des Hauts-de-France. Les travaux menés ont abouti à des résultats structurants, fournissant à la fois un cadre d'analyse robuste et des enseignements opérationnels destinés à orienter les stratégies futures des acteurs industriels et des décideurs publics.

L'analyse croisée de six filières représentatives et de six entreprises agroalimentaires met en évidence l'absence de solution universelle de sortie du gaz fossile. La décarbonation repose au contraire sur la combinaison de leviers complémentaires, à adapter finement aux profils énergétiques, aux contraintes procédés et aux réalités économiques propres à chaque site industriel.

Un premier niveau d'actions prioritaires et immédiatement mobilisables se dégage. Les pompes à chaleur industrielles apparaissent comme une technologie mature et performante pour la décarbonation des besoins thermiques basse et moyenne température, typiquement compris entre 60 et 95 °C. Elles sont particulièrement adaptées à des usages tels que le nettoyage en place, le blanchiment ou le préchauffage, en s'appuyant sur la valorisation de gisements de chaleur fatale internes. La récupération de chaleur fatale constitue par ailleurs un levier transversal incontournable, offrant des retours sur investissement rapides et permettant d'optimiser l'efficacité énergétique globale des sites avant toute substitution énergétique majeure. Dans les procédés d'évaporation et de concentration, la compression mécanique de vapeur se révèle être une solution éprouvée, capable de réduire très significativement la consommation de vapeur d'origine fossile, souvent de l'ordre de 50 % ou plus.

En complément, des leviers plus structurants pour la production de chaleur renouvelable sont identifiés. La méthanisation occupe une place centrale, en particulier pour les sites générant des volumes importants de coproduits organiques ou d'effluents. Elle permet la production de biométhane directement substituable au gaz naturel dans les chaudières existantes, ce qui en fait une solution clé pour les besoins en vapeur à haute température, généralement supérieurs à 120 °C, difficilement électrifiables à court terme. En parallèle, le développement des énergies renouvelables électriques, via le solaire photovoltaïque, l'éolien ou des contrats d'achat d'électricité bas carbone de type CPPA, apparaît indispensable pour décarboner le mix électrique et sécuriser le bilan carbone des solutions d'électrification. Les CPPA constituent à ce titre un outil stratégique de sécurisation à long terme de l'approvisionnement en électricité décarbonée.

Certaines solutions se positionnent davantage comme des options émergentes ou de plus long terme. Le stockage thermique à grande échelle présente un potentiel intéressant pour apporter de la flexibilité aux systèmes énergétiques industriels et optimiser l'intégration des énergies renouvelables intermittentes, bien que son niveau de maturité reste encore limité pour des applications à haute température. De même, l'hydrogène bas carbone et la géothermie profonde offrent des perspectives prometteuses pour certains usages spécifiques, mais leur disponibilité, leur compétitivité économique et leur maturité technologique ne sont pas encore pleinement établies dans le contexte régional étudié.

La méthodologie et les outils de modélisation technico-économique paramétrables développés dans le cadre de cette étude présentent un intérêt majeur. Ils constituent tout d'abord un outil

d'aide à la décision stratégique, permettant aux industriels et aux acteurs territoriaux de comparer de manière cohérente et chiffrée les différentes options de décarbonation, tant en termes de réduction des consommations énergétiques et des émissions de CO₂ que d'impacts économiques, incluant les coûts d'investissement et d'exploitation. Conçue initialement pour les Hauts-de-France, cette approche repose sur un cadre méthodologique reproductible et adaptable à d'autres territoires ou secteurs industriels présentant des profils énergétiques comparables. Elle fournit également une base commune de dialogue entre les directions techniques, financières et RSE des entreprises, ainsi qu'avec les partenaires publics et les financeurs, facilitant ainsi la construction de projets partagés et crédibles.

Enfin, plusieurs perspectives de déploiement industriel se dégagent de cette analyse. Il apparaît essentiel d'encourager un passage à l'action progressif, en engageant en priorité des études de faisabilité détaillées sur les leviers identifiés comme les plus matures et les plus rentables à court terme, notamment les pompes à chaleur industrielles, la récupération de chaleur fatale et la compression mécanique de vapeur. La sortie du gaz doit s'inscrire dans des feuilles de route hybrides et évolutives, combinant électrification, amélioration de l'efficacité énergétique et recours aux gaz renouvelables, afin de s'adapter aux contraintes techniques et à la maturité des technologies. Par ailleurs, le développement d'écosystèmes territoriaux apparaît comme un facteur clé de succès, en particulier pour la méthanisation et certaines solutions renouvelables, qui gagnent en pertinence lorsqu'elles sont pensées à l'échelle d'un territoire et reposent sur des partenariats entre industriels, agriculteurs et collectivités. Enfin, un accompagnement public ciblé est indispensable pour accélérer la transition, notamment par le soutien financier aux études de faisabilité et aux premiers déploiements, la simplification des procédures administratives pour les projets d'énergies renouvelables thermiques, et l'encouragement de modèles de financement innovants, facilitant l'accès des PME à des dispositifs tels que les CPPA mutualisés.

En conclusion, cette pré-étude démontre que la décarbonation de l'industrie agroalimentaire est techniquement envisageable et économiquement accessible par une combinaison de leviers dont la maturité est déjà acquise. La clé du succès réside désormais dans la capacité des acteurs à prioriser, à planifier et à investir dans des projets concrets, en s'appuyant sur des outils d'analyse robustes et une collaboration renforcée entre l'industrie, les territoires et les pouvoirs publics.

Bilan personnel

La réalisation de ce projet de recherche sur la décarbonation de l'agro-alimentaire et plus spécifiquement la substitution de gaz a constitué une expérience très enrichissante tant sur le plan technique que professionnel. Les travaux confiés nous ont permis de comprendre concrètement les enjeux énergétiques et environnementaux de l'industrie, et d'évaluer l'impact de différentes technologies bas carbone sur la réduction des émissions de CO₂. Cette démarche a renforcé notre capacité à analyser les besoins énergétiques, identifier les leviers de décarbonation et proposer des solutions adaptées aux contraintes industrielles.

Au-delà de l'aspect technique, le projet nous a permis de développer des compétences essentielles pour un ingénieur en énergie et environnement. Nous avons appris à rechercher et synthétiser des informations pertinentes, à interagir avec des experts et professionnels du secteur pour valider nos choix, et à participer activement à la gestion d'un projet, en planifiant les étapes, organisant les réunions et assurant le suivi des tâches de l'équipe.

Par ailleurs, la rédaction des comptes rendus, synthèses techniques et rapports d'avancement nous a permis de perfectionner nos compétences en communication professionnelle et en transmission d'informations techniques. Enfin, ce projet nous a offert une vision concrète de la décarbonation industrielle, de ses enjeux économiques et environnementaux, et des besoins spécifiques de l'industrie agro-alimentaire, tout en consolidant notre aptitude à travailler en équipe et à coordonner des activités complexes.

En résumé, ce projet a été l'occasion de mettre en pratique nos connaissances théoriques, de développer de nouvelles compétences techniques et organisationnelles, et de nous préparer efficacement à des missions d'ingénierie énergétique et environnementale dans le secteur industriel.

L'étude, bien que rigoureuse, présente une limite inhérente à tout travail de pré-faisabilité dans un secteur en pleine mutation : elle offre une photographie des technologies et de leurs coûts à un instant T, alors que le paysage industriel évolue à une vitesse accélérée. Les performances des équipements s'améliorent continuellement (rendements, températures atteignables, fiabilité), tandis que les courbes d'apprentissage font chuter les prix d'investissement, en particulier sur des technologies encore émergentes comme le stockage thermique haute température ou l'hydrogène vert. Cette dynamique peut modifier rapidement les équilibres économiques : ce qui apparaît aujourd'hui comme une solution complémentaire ou exploratoire pourrait devenir un levier structurant dans un horizon de 3 à 5 ans.

L'été 2026 a brutalement rappelé aux industriels et aux décideurs que la transition énergétique n'est pas une option, mais une nécessité vitale. Avec quatre vagues de canicule successives, des températures atteignant localement 40°C et plus de 52 jours sous conditions de canicule depuis la mi-juin, la France a connu un été climatique sans précédent. L'impact l'économie française est estimé entre 10 et 15 milliards d'euros par an, affectant l'agriculture, l'énergie, la logistique et la productivité des travailleurs. Dans ce contexte, l'évolution rapide des technologies de décarbonation apparaît comme une lueur d'espoir. Les baisses de coûts anticipées sur des solutions comme le stockage thermique, les pompes à chaleur haute température, le solaire PV ou l'hydrogène vert pourraient rendre accessibles, dans un horizon proche, des options aujourd'hui encore marginales. Ce que les canicules de 2026 ont rendu palpable, c'est l'urgence d'une transformation profonde du modèle énergétique industriel. Les difficultés techniques et financières d'aujourd'hui peuvent s'effacer demain sous l'effet de l'innovation et des gains d'échelle, tandis que les coûts de l'inaction, eux, ne feront que croître à chaque nouvel épisode caniculaire. De plus, le gaz fossile venu du Qatar ou de Russie, longtemps perçu comme disponible et bon marché, ne peut plus être pris comme acquis.

Cette dynamique est une promesse : la décarbonation n'est pas un objectif figé, mais un processus continu d'adaptation, où chaque avancée technologique rapproche un peu plus l'industrie d'un avenir durable et compétitif, à la hauteur des défis climatiques posés par un été 2026 qui restera dans les mémoires comme un point de bascule.

Références

- [1] Observatoire Énergie-Climat Hauts-de-France, Émissions de gaz à effet de serre.
<https://observatoire-energieclimat-hautsdefrance.org/donnees/analyses-thematiques/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/3f7bcdfa-af6f-4e10-b7b6-8ebfc80fdfe1>
- [2] Direction Générale des Entreprises, Feuille de route de décarbonation de la filière agroalimentaire.
<https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/Priorites-et-actions/Transition-ecologique/feuille-de-route-agroalimentaire.pdf>
- [3] Agreste, Données statistiques sur l'agriculture et l'agroalimentaire.
<https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Chd2410/detail/>
- [4] Commission européenne, Guidance on the implementation of the revised Renewable Energy and Energy Efficiency Directives, 2024.
https://energy.ec.europa.eu/news/commission-adopts-guidance-eu-countries-implementing-revised-directives-renewable-energy-and-energy-2024-09-02_en
- [5] Commission européenne, Net-Zero Industry Act.
https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/green-deal-industrial-plan/net-zero-industry-act_en
- [6] Concertation Stratégie Énergie-Climat, Le contexte français en matière de politique climatique et énergétique.
<https://concertation-strategie-energie-climat.gouv.fr/le-contexte-francais-en-matiere-de-politique-climatique-et-energetique>
- [7] European Environment Agency, Zero pollution, decarbonisation and circular economy in energy-intensive industries.
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/zero-pollution-decarbonisation-and-circular-economy-in-energy-intensive-industries>
- [8] INSEE, Données statistiques.
<https://www.insee.fr/fr/statistiques/7728843>
- [9] IPCC, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change – Summary for Policymakers.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/summary-for-policymakers/>
- [10] IPCC, AR4 – Working Group III: Mitigation of Climate Change.
https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch7s7-4-7-1.html
- [11] ADEME, Pacte Industrie – Replays et webinaires.
<https://pacte-industrie.ademe.fr/actualites/replays-webinaires/>
- [12] CTCPA, Étude décarbonation de l'industrie agroalimentaire, 2024.
<https://www.ctcpa.org/en/2024/07/24/etude-decarbonation-industrie-agroalimentaire/>
- [13] Enertherm Engineering, Industrial electrification – Steering decarbonization in food and beverage production.
<https://enertherm-engineering.com/industrial-electrification-steering-decarbonization-in-food-and-beverage-production/>

- [14] SLR Consulting, Energy decarbonisation in food & beverage.
<https://www.slrconsulting.com/insights/Energy-decarbonisation-food-beverage/>
- [15] MDPI, Energy, 17(12), 3051.
<https://www.mdpi.com/1996-1073/17/12/3051>
- [16] WWF France, Méthanisation.
<https://www.wwf.fr/champs-daction/climat-energie/transition-energetique/methanisation>
- [17] Ministère de l'Agriculture, Volet méthanisation – Questions-réponses.
<https://agriculture.gouv.fr/volet-methanisation-questions-reponses>
- [18] WattValue, Méthanisation.
<https://www.wattvalue.fr/methanisation/>
- [19] Le Monde, Biogaz : forte accélération attendue de la méthanisation, 2024.
https://www.lemonde.fr/economie/article/2024/04/05/biogaz-forte-acceleration-attendue-de-la-methanisation_6226163_3234.html
- [20] Les Énergies Renouvelables, Méthanisation.
<https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/methanisation/>
- [21] EDF, Cogénération.
<https://www.edf.fr/groupe-edf/comprendre/production/thermique/cogeneration>
- [22] Armstrong International, Chauffage de l'eau au gaz ou à la vapeur.
<https://armstronginternational.com/fr/produits/solutions-pour-les-installations-deau-chaude/chauffage-de-leau-au-gaz-ou-a-la-vapeur/>
- [23] Zephytec, Déshydrateur alimentaire CSA-i9.
<https://www.zephytec.com/n/deshydrateur-alimentaire/CSA-i9.html>
- [24] Roots Blower Tech, Application of Mechanical Vapor Recompression Technology in Evaporation.
<https://www.rootsblowertech.com/application-of-mechanical-vapor-recompression-technology-in-evaporation/>
- [25] Triple Performance, Méthanisation agricole.
https://wiki.tripleperformance.fr/wiki/M%C3%A9thanisation_agricole
- [26] Exergo, Géothermie : comprendre ses avantages et son fonctionnement.
<https://exergo.com/fr/geothermie-comprendre-ses-avantages-et-son-fonctionnement/>
- [27] Guide Artisan, Différences entre capteurs solaires thermiques et panneaux photovoltaïques.
<https://www.guide-artisan.fr/actualites/chauffagiste/energies-renouvelable/quelles-differences-entre-des-capteurs-solaires-thermiques-et-des-panneaux-photovoltaïques>
- [28] Bpifrance, Chaleur fatale : décarbonation et valorisation énergétique en entreprise et dans l'industrie.
<https://bigmedia.bpifrance.fr/nos-dossiers/chaleur-fatale-la-decarbonation-et-la-valorisation-energetique-en-entreprise-et-dans-lindustrie>

[29] EnergyCrew, Chaleur fatale dans l'industrie.

<https://energycrew.org/chaleur-fatale-industrie/>

[30] Wattco, Avantages des chaudières électriques pour les applications industrielles à grande échelle.

<https://www.wattco.com/fr/2022/08/avantages-des-chaudieres-electriques-pour-les-applications-industrielles-a-grande-echelle/>

[31] Batirama, Produire de l'hydrogène décarboné : enjeu industriel ou véritable leurre ?

<https://www.batirama.com/article/40937-produire-de-l-hydrogene-decarbone-enjeu-industriel-ou-veritable-leurre.html>

[32] OCHSNER, Pompes à chaleur industrielles.

<https://www.ochsner.com/fr-fr/ochsner-produits/pompes-a-chaleur-industrielles/>

[33] NREL, Electro-Thermal Energy Storage (ETES).

<https://samrepo.nrelcloud.org/help/etes.html>

[34] Toute l'Europe, L'Europe en région : les Hauts-de-France.

<https://www.touteurope.eu/l-europe-en-region/l-europe-en-region-les-hauts-de-france/>

[35] AZprocede, Introduction aux techniques de la vapeur.

https://www.azprocede.fr/Cours_GC/techvapeur_introduction.html

[36] Techni-Contact, Générateur d'air chaud gaz industriel.

<https://www.techni-contact.com/produits/9557-16333213-generateur-air-chaud-gaz-industriel.html>

[37] Merlo Energy, Production d'eau chaude.

<https://www.merloenergy.com/products/hot-water/>

[38] Énergie Plus, Machine frigorifique à absorption.

<https://energieplus-lesite.be/techniques/climatisation8/production-de-froid/machine-frigorifique-a-ab-adsorption/>

[39] DirectIndustry, Fours à gaz industriels.

<https://www.directindustry.fr/fabricant-industriel/four-gaz-114520.html>

[40] Dalkia Froid Solutions, Pompes à chaleur haute température.

<https://www.dalkiafroidsolutions.com/notre-expertise-dans-les-pompes-chaleur-haute-temperature>

[41] Dametis, Les PPA : avantages clés face à la hausse des prix de l'énergie.

<https://www.dametis.com/les-ppa-avantages-cles-face-a-la-hausse-des-prix-de-lenergie/>

[42] Solstor Energy, Technology.

<https://solstorenergy.com/technology/>

[43] Fuji Electric, Comment améliorer le rendement et prolonger la durée de vie de votre chaudière industrielle ?

<https://www.fujielectric.fr/applications/comment-ameliorer-le-rendement-et-prolonger-la-duree-de-vie-de-votre-chaudiere-industrielle/>

[44] Bonduelle, Site officiel.

<https://www.bonduelle.com/>

[45] Danone, Site officiel.

<https://www.danone.com/fr>

[46] Lesaffre, Site officiel.

<https://www.lesaffre.com/fr/>

[47] Tereos, Site officiel.

<https://tereos.com/fr/>

[48] Roquette, Site officiel.

<https://www.roquette.com/fr>

[49] Délifrance, Site officiel.

<https://delifrance.com/fr/>

[50] Agroalimentaire.e-pro.fr, Industrie alimentaire en région Hauts-de-France.

<https://agroalimentaire.e-pro.fr/industrie-alimentaire/region-haut-de-france.html>

[51] Wikipédia, Anaerobic digestion.

https://en.wikipedia.org/wiki/Anaerobic_digestion

[52] Wikipédia, Climat des Hauts-de-France.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_des_Hauts-de-France

[53] France 24.

<https://www.france24.com/en/live-news/20260825-the-summer-climate-change-became-scorching-reality-for-europe>

[54] Économie Matin.

<https://www.economiematin.fr/canicule-2026-quatrieme-vague-facture-economique-hausse-france#1>

[55] Économie Matin.

<https://www.economiematin.fr/canicule-facture-10-15-milliards-euros-france#1>

[56] Franceinfo.

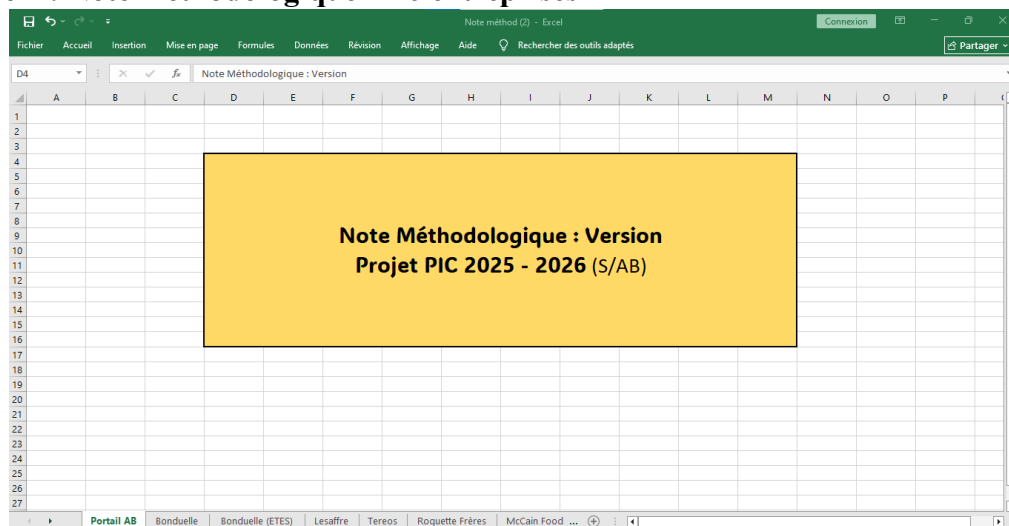
https://www.franceinfo.fr/environnement/evenements-meteorologiques-extremes/vagues-de-chaaleur-canicules/direct-canicules-secheresse-incendies-suivez-l-emission-speciale-de-franceinfo-consacree-a-l-ete-qui-a-tout-change_8160917.html#xtor=RSS-3-%5Blestitres%5D

[57] TV5MONDE.

<https://information.tv5monde.com/france/ete-2026-quand-la-belle-saison-se-transforme-en-enfer-climatique-2834784>

Annexes :

Annexe 1 : Note méthodologique – 16 entreprises





</

MACHINES SPECIFIQUES PAR ETAPE DE PRODUCTION				
Étape de production	Machines utilisées	Type d'énergie	Saisonnalité d'utilisation	% d'utilisation annuelle
Réception/Tri	Convoyeurs réception, Tris optiques	Électricité	Haute saison seulement	25-40%
Nettoyage/Épluchage	Tambours rotatifs, Machines abrasives	Électricité	Haute saison seulement	25-40%
Blanchiment	Cuves blanchiment, Échangeurs	Gaz + Électricité	Haute saison seulement	25-40%
Conditionnement	Remplisseuses, Soudeuses	Électricité	Haute saison seulement	25-40%
Stérilisation	Autoclaves	Vapeur (gaz)	Haute saison seulement	25-40%
Surélévation	Tunnels surgélation	Électricité	Selon ligne de produit	Variable
Expédition	Palettiseurs, Chariots	Électricité/Diesel	Toute l'année	60-80%
ESTIMATION CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE SAISONNIÈRE				
Période	% de capacité	Consommation gaz (estimé)	Consommation électrique (estimé)	Machines principales en fonctionnement
Pleine campagne (juillet-octobre)	100%	100%	100%	Toutes les machines de production
Campagne moyenne (juin, novembre)	60-80%	70-90%	60-80%	Machines principales réduites
Hors campagne (décembre-mai)	10-30%	10-40% (chauffage)	20-40% (services)	Services, maintenance, stockage
ESTIMATION CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE SAISONNIÈRE				
Type de machine	Coefficient campagne	Coefficient hors campagne	Facteur de variation	
Chaudières vapeur	1	0.1-0.3	70-90%	
Autoclaves	1	0.0-0.1	90-100%	
Groupes frigorifiques	1	0.3-0.5	50-70%	
Pompes process	1	0.0-0.2	80-100%	
Éclairage production	1	0.1-0.3	70-90%	
Chauffage bâtiments	0.2-0.5 (été)	0.8-1.0 (hiver)	Inverse saisonnier	
CALENDRIER DE PRODUCTION TYPIQUE PAR LÉGUME				
Légume	Période de campagne	Machines spécifiques utilisées	Intensité énergétique	
Petits pois	Mai-Juillet	Lignes de tri spécifiques; blanchiment rapide	Élevée (process intensif)	
Haricots verts	Juin-Septembre	Équeuteuses, lignes de conditionnement	Très élevée (débit important)	
Carottes	Toute l'année (pic été)	Éplucheuses abrasives; lignes de coupe	Moyenne à élevée	Moyenne à élevée
Épinards	Avril-Juin, Sept-Oct	Lignes de lavage intensif; pressage	Moyenne	
Gammes de Températures par Type de Consommation				
Processus / Équipement	Gamme de Températures	Type de Consommation Principale	Énergie Finale / Usage	
Stérilisation (Appertisation)	> 130 °C	Thermique (Gaz)	Vapeur haute pression dans les autoclaves pour la conservation longue durée.	
Blanchiment	85 °C à 95 °C (standard industriel)	Thermique (Gaz)	Eau chaude ou vapeur pour inactiver les enzymes. Préparation avant conditionnement.	
Lavage / Nettoyage	50 °C à 80 °C (estimé)	Thermique (Gaz)	Eau chaude sanitaire et nettoyage des lignes (CIP).	
Surélévation (Tunnel)	-35 °C à -40 °C	Électrique (Froid)	Air froid cryogénique ou mécanique pour gel rapide et préservation de la structure cellulaire.	
Stockage Produits Surgelés	-18 °C (standard)	Électrique (Froid)	Maintenance de la température en chambre froide ou entrepôt frigorifique.	
Chaîne du Frais (4ème Gamme)	+1 °C à +4 °C	Électrique (Froid)	Réfrigération continue de la préparation au stockage et transport.	
Salles de Préparation	+15 °C à 18 °C (contrôlé)	Électrique (Autres)	Climatisation et ventilation pour la qualité hygiénique et le confort.	
Moteurs & Compresseurs	Refroidissement à < 40 °C	Électrique (Autres)	Électricité pour le fonctionnement, avec besoin de refroidissement pour éviter la surchauffe.	
Résultats du processus (données obtenues en sortie)				
CARTOGRAPHIE THERMIQUE : CASCADE ÉNERGÉTIQUE				
Pyramide des températures				
Niveau	Température	Procédés	Besoin actuel (MWh)	Solutions alternatives
Niveau 4	>130 °C	Stérilisation	64,680	Chaudière électrique, Biomasse
Niveau 3	85-95 °C	Blanchiment	113,190	PAC HT, Solaire thermique
Niveau 2	50-80 °C	Lavage, CIP	32,340	PAC MT, Récupération
Niveau 1	15-50 °C	Chauffage bâtiments	64,680	PAC LT, Géothermie
Niveau 0	-40 °C à +4 °C	Froid	155,680	Groupes froid optimisés
Diagramme en cascade				
Sources à haute température ↓ Niveau 4: >130 °C (Stérilisation) → Pertes ↓ Réutilisation chaleur Niveau 3: 85-95 °C (Blanchiment) → Pertes ↓ Réutilisation chaleur Niveau 2: 50-80 °C (Lavage) → Pertes ↓ Réutilisation chaleur Niveau 1: 15-50 °C (Chauffage) → Pertes ↓ Rejet environnement				
ANALYSE DES POINTS CRITIQUES				
Catégorie	Usage	Consommation Gaz	Substitution	Commentaire
INCONTOURNABLE	Stérilisation (>130 °C)	20% du gaz	Technologie HT requise	Besoin vapeur haute pression
DIFFICILE	Blanchiment (85-95 °C)	35% du gaz	PAC HT possible	Charge thermique élevée
SUBSTITUABLE	Lavage/Nettoyage	10% du gaz	Élec/PAC/ST	Température modérée
SUBSTITUABLE	Chauffage bâtiments	15% du gaz	Récupération/PAC	Surtout hors campagne

PROFIL SAISONNIER DÉTAILLÉ					
Période	Durée	% Capacité	Cons. Gaz	Cons. Elec	Processus actifs
Pleine campagne	Juil-Oct (4 mois)	100%	100%	100%	Tous procédés
Campagne moyenne	Juin, Nov (2 mois)	70%	60%	50%	Procédés principaux
Hors campagne	Déc-Mai (6 mois)	20%	15%	25%	Services, stockage

POTENTIEL DE RÉCUPÉRATION DE CHALEUR					
Source	Température	Quantité estimée	Usage potentiel		
Condensats vapeur	90-100 C	30-40% énergie chaudières	Préchauffage eau blanchiment		
Groupes frigorifiques	40-50 C	50% énergie compresseurs	Chauffage bâtiments, eau chaude		
Eaux de refroidissement	25-35 C	Variable	Préchauffage eau de process		

SCÉNARIOS PROSPECTIFS SANS GAZ					
TECHNOLOGIES DE SUBSTITUTION PAR PROCÉDÉ					
procédé actuel	Température	Technologies alternatives	Source énergie	COP/Efficacité estimée	
Stérilisation	> 130 C	1. Chaudière électrique vapeur	Élec renouvelable	90-95%	
		2. Chaudière biomasse	Biomasse locale	80-85%	
		3. PAC à absorption (si <130 C possible)	Chaleur fatale + élec	COP 1.5-2.0	
Blanchiment	85-95 C	1. PAC haute température	Élec + source thermique	COP 3.0-4.0	
		2. Solaire thermique + appoint	Soleil + stockage	40-60% couverture	
		3. Géothermie moyenne température	Chaleur sol/souterraine	COP 4.0-5.0	

MIX ÉNERGÉTIQUE CIBLE					
Scénario	Électricité	Biomasse	Solaire thermique	Géothermie	Récupération
100% Électrification	95%	0%	5%	0%	Intégrée
Mix Diversifié	60%	20%	10%	5%	5%
Biomasse Prioritaire	40%	50%	5%	0%	5%

IMPACTS QUANTIFIÉS					
Paramètre	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3		
Consommation électrique	79	39,4	19,6		
Investissement estimé	Élevé	Moyen-Élevé	Moyen		
Réduction CO2	90-95%	85-90%	80-85%		
Coût énergétique annuel	14,75	±5-10%	-5,05		
Dépendance réseau	Haute	Moyenne	Basse		

ADÉQUATION SAISONNIÈRE					
Technologie	Performance été	Performance hiver	Adéquation campagne		
Solaire thermique	Excellente	Faible	Très bonne (campagne été)		
PAC air/eau	COP élevé	COP réduit	Bonne		
Géothermie	Stable	Stable	Excellente		
Biomasse	Stable	Stable	Excellente		
Récupération	Abondante	Limitée	Excellente		

TABLEAU DE BORD SYNTHÈSE					
COMPARAISON ÉTAT ACTUEL vs CIBLE					
Indicateur	État Actuel	Scénario Cible	Variation		
Émissions CO2 (t/an)	65,300*	3,265-6,530	-90 à -95%		
Coût énergétique (k€/an)	calcul	calcul	calcul		
Indépendance gaz	0%	100%	100%		

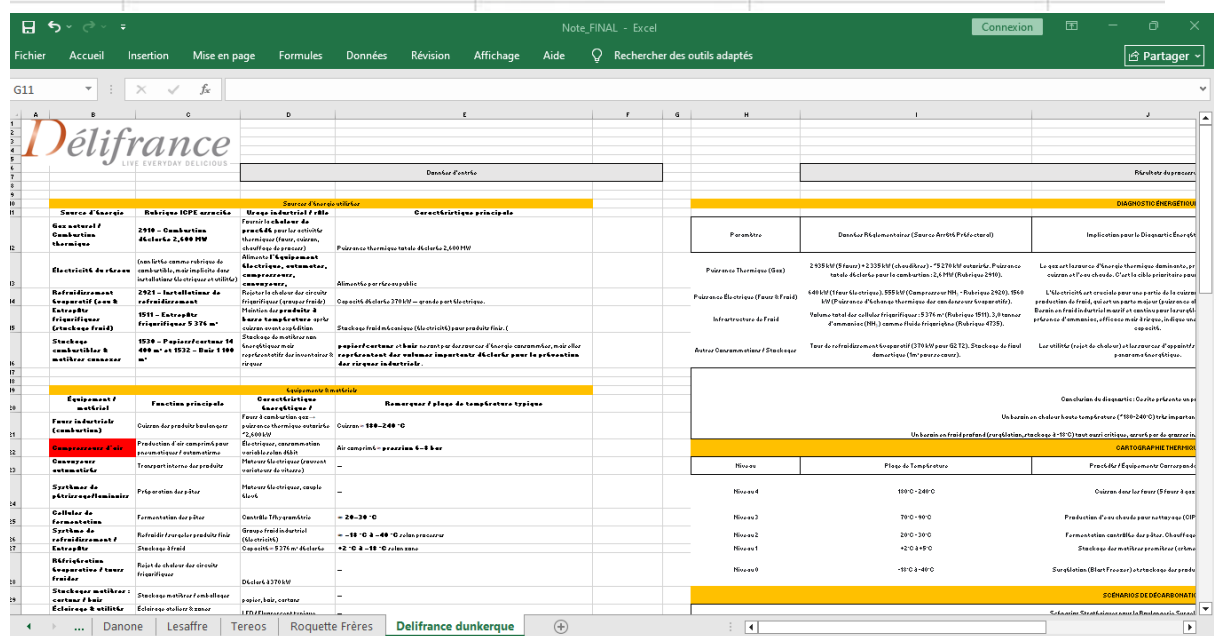
TABLEAU DE BORD SYNTHÈSE					
COMPARAISON ÉTAT ACTUEL vs CIBLE					
Indicateur	État Actuel	Scénario Cible	Variation		
Émissions CO2 (t/an)	65,300*	3,265-6,530	-90 à -95%		
Coût énergétique (k€/an)	calcul	calcul	calcul		
Indépendance gaz	0%	100%	100%		
Part EnR	6% (biomasse)	95-100%	88,06		
Intensité énergétique	calcul	-20 à -30%	Amélioration		
*Calcul basé sur 1,164,240 GJ gaz x 58,1kg CO2/GJ					

FEUILLE DE ROUTE PRIORISÉE					
Priorité	Action	Gain estimé	Investissement	ROI	
1 (Court terme)	Récupération chaleur groupes froid	5-10% énergie totale	Faible-Moyen	<2 ans	
2 (Court terme)	Optimisation procédés (isolation, régulation)	5-15% consommation	Faible	<1 an	
3 (Moyen terme)	PAC HT pour blanchiment	30-40% économie vs gaz	Moyen	3-5 ans	
4 (Moyen terme)	Solaire thermique eau chaude	20-30% besoins eau chaude	Moyen	4-7 ans	
5 (Long terme)	Chaudière biomasse/élec pour vapeur	90% réduction CO2	Élevé	5-8 ans	

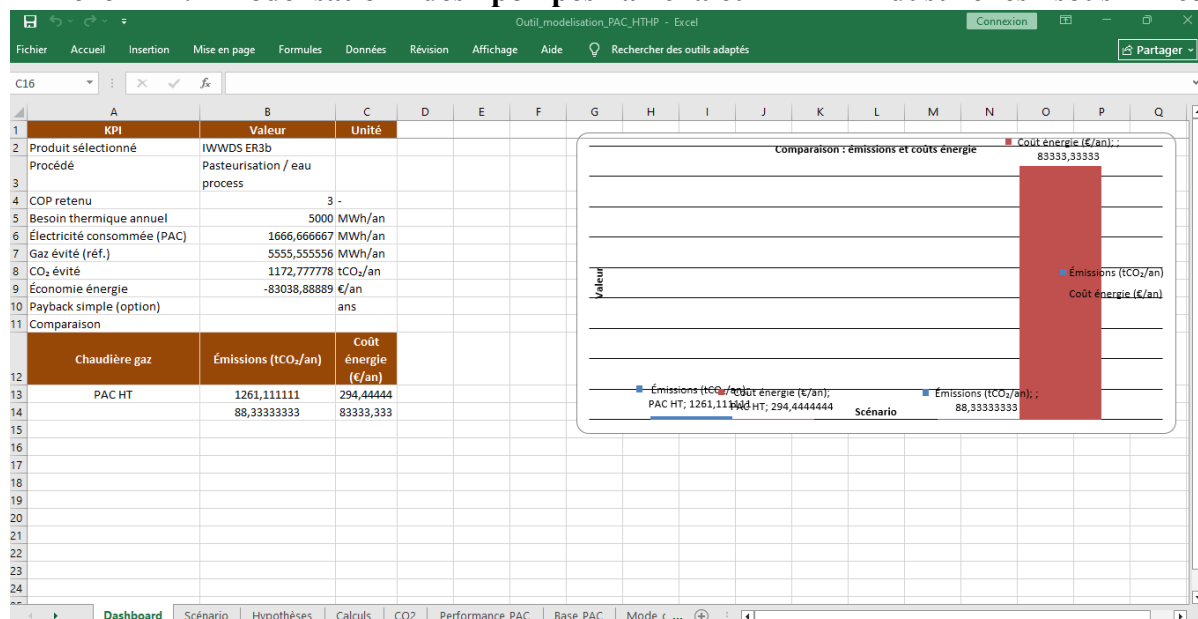
RECOMMANDATIONS SPÉCIFIQUES PAR PROCÉDÉ					
Zone	Recommandation principale	Solution alternative	Contraintes		
Stérilisation	Électrification progressive (chaudière électrique)	Biomasse si approvisionnement local	Coût élec, puissance nécessaire		
Blanchiment	PAC haute température (source: eau glycolée récupérée)	Solaire thermique + stockage journalier	Surface disponible pour capteurs		
Chauffage locaux	PAC air/eau + récupération chaleur process	Réseau de chaleur biomasse	Température de sortie PAC		
Eau chaude sanitaire	Solaire thermique + appoint PAC	Géothermie superficielle	Investissement initial		

INDICATEURS DE SUIVI			
Indicateur	Formule de calcul	Cible 2025	Cible 2030

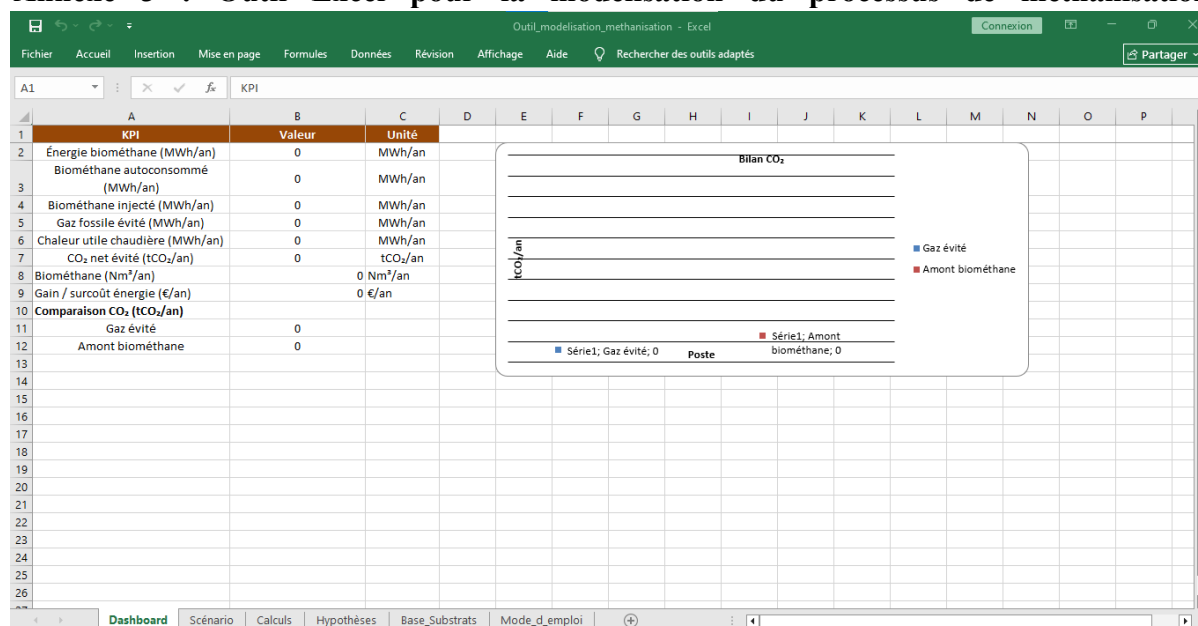
(1 = Cons Gaz / Cons Gaz initial)



Annexe 2 : Modélisation des pompes à chaleur HT industrielles sous Excel



Annexe 3 : Outil Excel pour la modélisation du processus de méthanisation



Annexe 4 : Envoi d'emails dans le cadre de l'étude

Discussion sur le projet de décarbonisation de l'agro-alimentaire.



BADER BOUYSK <baderbouysk02@gmail.com>
À a.laurin ▾

jeu. 15 janv. 05:34 ☆ 😊 ↩ ⋮

Madame, Monsieur,

Nous nous permettons de vous contacter en tant qu'étudiants en troisième année de la spécialité Génie Énergétique et Environnement à l'EILCO – École d'Ingénieur du Littoral Côte d'Opale, établissement public d'enseignement supérieur implanté à Dunkerque.

Dans le cadre de notre formation, nous menons actuellement un projet d'étude consacré à l'analyse des leviers de décarbonation des industries agroalimentaires en région Hauts-de-France, avec un focus particulier sur les usages du gaz naturel, les trajectoires de sortie du gaz et les alternatives énergétiques bas carbone envisageables à moyen et long terme.

Ce travail s'inscrit dans une démarche académique visant à confronter l'analyse théorique aux retours d'expérience des acteurs institutionnels, territoriaux et industriels impliqués dans la transition énergétique et la réindustrialisation des territoires. À ce titre, le rôle du Commissariat Spécial pour la revitalisation et la réindustrialisation des Hauts-de-France nous apparaît particulièrement pertinent.

Nous souhaiterions ainsi savoir s'il vous serait possible de nous orienter vers des interlocuteurs ou partenaires compétents (institutionnels, industriels ou experts) susceptibles d'échanger avec nous autour de cette thématique, ou, le cas échéant, de nous indiquer le service approprié au sein de votre structure.

Les échanges envisagés pourraient notamment porter sur :

Figure 31 : CCI haut de france

Discussion sur le projet de décarbonisation de l'agro-alimentaire.

Boîte de réception x ✕ 🖨 📧



Bader Bouysk <bader.bouysk@etu.eilco.univ-littoral.fr>
À Roxane ▾

jeu. 15 janv. 05:27 ☆ ↩ ⋮

Bonjour Madame,

Nous avons l'honneur de vous adresser la présente demande en tant qu'étudiants en troisième année de la spécialité Génie Énergétique et Environnement à EILCO – Campus de Dunkerque.

Dans le cadre de notre cursus académique, nous réalisons actuellement un projet d'étude portant sur l'analyse et l'identification des solutions de décarbonation applicables aux industries agroalimentaires de la région Hauts-de-France, avec une attention particulière accordée aux usages du gaz naturel et aux alternatives énergétiques bas carbone.

Ce travail s'inscrit dans une démarche pédagogique et scientifique, reposant sur des échanges avec des acteurs industriels et des experts du secteur. À ce titre, nous souhaiterions savoir si vous seriez disposés à nous accompagner en nous communiquant, dans la mesure du possible, certaines informations ou en nous orientant vers d'autres contacts qui peuvent nous aider dans ce projet.

Figure 32 : Prof filière agro-alimentaire

Discussion sur le projet de décarbonisation de l'agro-alimentaire.



Bader Bouysk <bader.bouysk@etu.eilco.univ-littoral.fr>
À Lina ▾

jeu. 15 janv. 05:31 ☆ ↩ ⋮

Bonjour Madame,

Nous avons l'honneur de vous adresser la présente demande en tant qu'étudiants en troisième année de la spécialité Génie Énergétique et Environnement à EILCO – Campus de Dunkerque.

Dans le cadre de notre cursus académique, nous réalisons actuellement un projet d'étude portant sur l'analyse et l'identification des solutions de décarbonation applicables aux industries agroalimentaires de la région Hauts-de-France, avec une attention particulière accordée aux usages du gaz naturel et aux alternatives énergétiques bas carbone.

Ce travail s'inscrit dans une démarche pédagogique et scientifique, reposant sur des échanges avec des acteurs industriels et des experts du secteur. À ce titre, nous souhaiterions savoir si vous seriez disposés à nous accompagner en nous communiquant, dans la mesure du possible, certaines informations ou en nous orientant vers d'autres contacts qui peuvent nous aider dans ce projet.

Figure 33 : Prof filière agro-alimentaire



Bader Bouysk <bader.bouysk@etu.eilco.univ-littoral.fr>
À Cedric ▾

mer. 14 janv. 08:00 ☆ ↶

Bonjour Monsieur,

attente

Nous avons l'honneur de vous adresser la présente demande en tant qu'étudiants en troisième année de la spécialité Génie Énergétique et Environnement à EILCO – Campus de Dunkerque.

Dans le cadre de notre cursus académique, nous réalisons actuellement un projet d'étude portant sur l'analyse et l'identification des solutions de décarbonation applicables aux industries agroalimentaires de la région Hauts-de-France, avec une attention particulière accordée aux usages du gaz naturel et aux alternatives énergétiques bas carbone.

Ce travail s'inscrit dans une démarche pédagogique et scientifique, reposant sur des échanges avec des acteurs industriels et des experts du secteur. À ce titre, nous souhaiterions savoir si vous seriez disposés à nous accompagner en nous communiquant, dans la mesure du possible, certaines informations ou en nous orientant vers d'autres contacts qui peuvent nous aider dans ce projet.

À titre indicatif, les informations susceptibles de nourrir notre réflexion concernent notamment :

Figure 34 : Prof filière agro-alimentaire

Sollicitation d'informations dans le cadre d'un projet académique – Décarbonation industrielle



Hamza Safi <hamza.safi@etu.eilco.univ-littoral.fr>
À contact ▾

jeu. 15 janv. 21:35 ☆ ↶ ⋮

Madame, Monsieur,

Nous avons l'honneur de vous adresser la présente demande en tant qu'étudiants en troisième année de la spécialité Génie Énergétique et Environnement à EILCO – École d'Ingénieur du Littoral Côte d'Opale, établissement public d'enseignement supérieur situé à Dunkerque.

Dans le cadre de notre cursus académique, nous réalisons actuellement un projet d'étude portant sur l'analyse et l'identification des solutions de décarbonation applicables aux industries agroalimentaires de la région Hauts-de-France, avec une attention particulière accordée aux usages du gaz naturel et aux alternatives énergétiques bas carbone.

Ce travail s'inscrit dans une démarche pédagogique et scientifique, reposant sur des échanges avec des acteurs industriels et des experts du secteur. À ce titre, nous souhaiterions savoir si vous seriez disposés à nous accompagner en nous communiquant, dans la mesure du possible, certaines informations non confidentielles ou en nous orientant vers le service ou le responsable compétent au sein de votre organisation.

À titre indicatif, les informations susceptibles de nourrir notre réflexion concernent notamment :

- Des données globales ou agrégées relatives à la consommation de gaz,
- Les actions et stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre déjà mises en œuvre,
- Les technologies ou solutions de décarbonation actuellement déployées ou envisagées.

Nous sommes pleinement conscients des contraintes de confidentialité propres au secteur industriel et restons naturellement ouverts à toute forme d'échange que vous jugerez appropriée.

Nous vous remercions par avance pour l'attention que vous porterez à notre sollicitation. Votre contribution constituerait un soutien précieux aux travaux académiques des étudiants et des chercheurs, participant à la diffusion des connaissances, à l'intérêt général et à la formation des futurs ingénieurs.

Nous vous prions d'agréer, Madame, Monsieur, l'expression de nos salutations distinguées.

Hamza SAFI

Bader BOUYSK

Abderrahim ELHAFI

Figure 35 : ladunkerquoise

Sollicitation d'informations – Projet académique sur la réduction de la consommation de gaz et la décarbonation industrielle



Hamza Safi <hamza.safi@etu.eilco.univ-littoral.fr>
À nmasquelet ▾

jeu. 15 janv. 21:26 ☆ ↶ ⋮

Monsieur,

Nous avons l'honneur de vous adresser la présente demande en tant qu'étudiants en troisième année de la spécialité Génie Énergétique et Environnement à EILCO – École d'Ingénieur du Littoral Côte d'Opale, établissement public d'enseignement supérieur situé à Dunkerque.

Dans le cadre de notre cursus académique, nous réalisons actuellement un projet d'étude portant sur l'analyse et l'identification des solutions de décarbonation applicables aux industries agroalimentaires de la région Hauts-de-France, avec une attention particulière accordée aux usages du gaz naturel et aux alternatives énergétiques bas carbone.

Ce travail s'inscrit dans une démarche pédagogique et scientifique, reposant sur des échanges avec des acteurs industriels et des experts du secteur. À ce titre, nous souhaiterions savoir si vous seriez disposés à nous accompagner en nous communiquant, dans la mesure du possible, certaines informations non confidentielles ou en nous orientant vers le service ou le responsable compétent au sein de votre organisation.

À titre indicatif, les informations susceptibles de nourrir notre réflexion concernent notamment :

- Des données globales ou agrégées relatives à la consommation de gaz,
- Les actions et stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre déjà mises en œuvre,
- Les technologies ou solutions de décarbonation actuellement déployées ou envisagées.

Nous sommes pleinement conscients des contraintes de confidentialité propres au secteur industriel et restons naturellement ouverts à toute forme d'échange que vous jugerez appropriée.

Nous vous remercions par avance pour l'attention que vous porterez à notre sollicitation. Votre contribution constituerait un soutien précieux aux travaux académiques des étudiants et des chercheurs, participant à la diffusion des connaissances, à l'intérêt général et à la formation des futurs ingénieurs.

Nous vous prions d'agréer, Monsieur, l'expression de nos salutations distinguées.

Hamza SAFI

Figure 36 : Lesieur

Sollicitation d'informations – Projet académique sur la réduction de la consommation de gaz et la décarbonation industrielle



Hamza Safi <hamza.safi@etu.eilco.univ-littoral.fr>
À contactrgpd ▼

jeu. 15 janv. 21:25 ☆ ↶ ⋮

Madame, Monsieur,

Nous avons l'honneur de vous adresser la présente demande en tant qu'étudiants en troisième année de la spécialité Génie Énergétique et Environnement à EILCO – École d'Ingénieur du Littoral Côte d'Opale, établissement public d'enseignement supérieur situé à Dunkerque.

Dans le cadre de notre cursus académique, nous réalisons actuellement un projet d'étude portant sur l'analyse et l'identification des solutions de décarbonation applicables aux industries agroalimentaires de la région Hauts-de-France, avec une attention particulière accordée aux usages du gaz naturel et aux alternatives énergétiques bas carbone.

Ce travail s'inscrit dans une démarche pédagogique et scientifique, reposant sur des échanges avec des acteurs industriels et des experts du secteur. À ce titre, nous souhaiterions savoir si vous seriez disposés à nous accompagner en nous communiquant, dans la mesure du possible, certaines informations non confidentielles ou en nous orientant vers le service ou le responsable compétent au sein de votre organisation.

À titre indicatif, les informations susceptibles de nourrir notre réflexion concernent notamment :

- Des données globales ou agrégées relatives à la consommation de gaz,
- Les actions et stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre déjà mises en œuvre,
- Les technologies ou solutions de décarbonation actuellement déployées ou envisagées.

Nous sommes pleinement conscients des contraintes de confidentialité propres au secteur industriel et restons naturellement ouverts à toute forme d'échange que vous jugerez appropriée.

Nous vous remercions par avance pour l'attention que vous porterez à notre sollicitation. Votre contribution constituerait un soutien précieux aux travaux académiques des étudiants et des chercheurs, participant à la diffusion des connaissances, à l'intérêt général et à la formation des futurs ingénieurs.

Nous vous prions d'agréer, Madame, Monsieur, l'expression de nos salutations distinguées.

Hamza SAFI

Figure 37 : Cemio

Sollicitation d'informations – Projet académique sur la réduction de la consommation de gaz et la décarbonation industrielle



Hamza Safi <hamza.safi@etu.eilco.univ-littoral.fr>
À mbac ▼

jeu. 15 janv. 21:23 ☆ ↶ ⋮

Madame, Monsieur,

Nous avons l'honneur de vous adresser la présente demande en tant qu'étudiants en troisième année de la spécialité Génie Énergétique et Environnement à EILCO – École d'Ingénieur du Littoral Côte d'Opale, établissement public d'enseignement supérieur situé à Dunkerque.

Dans le cadre de notre cursus académique, nous réalisons actuellement un projet d'étude portant sur l'analyse et l'identification des solutions de décarbonation applicables aux industries agroalimentaires de la région Hauts-de-France, avec une attention particulière accordée aux usages du gaz naturel et aux alternatives énergétiques bas carbone.

Ce travail s'inscrit dans une démarche pédagogique et scientifique, reposant sur des échanges avec des acteurs industriels et des experts du secteur. À ce titre, nous souhaiterions savoir si vous seriez disposés à nous accompagner en nous communiquant, dans la mesure du possible, certaines informations non confidentielles ou en nous orientant vers le service ou le responsable compétent au sein de votre organisation.

À titre indicatif, les informations susceptibles de nourrir notre réflexion concernent notamment :

- Des données globales ou agrégées relatives à la consommation de gaz,
- Les actions et stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre déjà mises en œuvre,
- Les technologies ou solutions de décarbonation actuellement déployées ou envisagées.

Nous sommes pleinement conscients des contraintes de confidentialité propres au secteur industriel et restons naturellement ouverts à toute forme d'échange que vous jugerez appropriée.

Nous vous remercions par avance pour l'attention que vous porterez à notre sollicitation. Votre contribution constituerait un soutien précieux aux travaux académiques des étudiants et des chercheurs, participant à la diffusion des connaissances, à l'intérêt général et à la formation des futurs ingénieurs.

Nous vous prions d'agréer, Madame, Monsieur, l'expression de nos salutations distinguées.

Hamza SAFI

Figure 38 : Délifrance

Sollicitation d'informations – Projet académique sur la réduction de la consommation de gaz et la décarbonation industrielle



Hamza Safi <hamza.safi@etu.eilco.univ-littoral.fr>
À group-communications ▼

jeu. 15 janv. 21:11 ☆ ↶ ⋮

Madame, Monsieur,

Nous avons l'honneur de vous adresser la présente demande en tant qu'étudiants en troisième année de la spécialité Génie Énergétique et Environnement à EILCO – École d'Ingénieur du Littoral Côte d'Opale, établissement public d'enseignement supérieur situé à Dunkerque.

Dans le cadre de notre cursus académique, nous réalisons actuellement un projet d'étude portant sur l'analyse et l'identification des solutions de décarbonation applicables aux industries agroalimentaires de la région Hauts-de-France, avec une attention particulière accordée aux usages du gaz naturel et aux alternatives énergétiques bas carbone.

Ce travail s'inscrit dans une démarche pédagogique et scientifique, reposant sur des échanges avec des acteurs industriels et des experts du secteur. À ce titre, nous souhaiterions savoir si vous seriez disposés à nous accompagner en nous communiquant, dans la mesure du possible, certaines informations non confidentielles ou en nous orientant vers le service ou le responsable compétent au sein de votre organisation.

À titre indicatif, les informations susceptibles de nourrir notre réflexion concernent notamment :

- des données globales ou agrégées relatives à la consommation de gaz,
- les actions et stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre déjà mises en œuvre,
- les technologies ou solutions de décarbonation actuellement déployées ou envisagées.

Nous sommes pleinement conscients des contraintes de confidentialité propres au secteur industriel et restons naturellement ouverts à toute forme d'échange que vous jugerez appropriée.

Nous vous remercions par avance pour l'attention que vous porterez à notre sollicitation. Votre contribution constituerait un soutien précieux aux travaux académiques des étudiants et des chercheurs, participant à la diffusion des connaissances, à l'intérêt général et à la formation des futurs ingénieurs.

Nous vous prions d'agréer, Madame, Monsieur, l'expression de nos salutations distinguées.

Hamza SAFI

Figure 39 : Tereos

Sollicitation d'informations – Projet académique sur la réduction de la consommation de gaz et la décarbonation industrielle



Hamza Safi <hamza.safi@etu.eilco.univ-littoral.fr>
À webmaster ▾

jeu. 15 janv. 21:07 ☆ ↶ ⋮

Madame, Monsieur,

Nous avons l'honneur de vous adresser la présente demande en tant qu'étudiants en troisième année de la spécialité Génie Énergétique et Environnement à EILCO – École d'Ingénieur du Littoral Côte d'Opale, établissement public d'enseignement supérieur situé à Dunkerque.

Dans le cadre de notre cursus académique, nous réalisons actuellement un projet d'étude portant sur l'analyse et l'identification des solutions de décarbonation applicables aux industries agroalimentaires de la région Hauts-de-France, avec une attention particulière accordée aux usages du gaz naturel et aux alternatives énergétiques bas carbone.

Ce travail s'inscrit dans une démarche pédagogique et scientifique, reposant sur des échanges avec des acteurs industriels et des experts du secteur. À ce titre, nous souhaiterions savoir si vous seriez disposés à nous accompagner en nous communiquant, dans la mesure du possible, certaines informations non confidentielles ou en nous orientant vers le service ou le responsable compétent au sein de votre organisation.

À titre indicatif, les informations susceptibles de nourrir notre réflexion concernent notamment :

- des données globales ou agrégées relatives à la consommation de gaz,
- les actions et stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre déjà mises en œuvre,
- les technologies ou solutions de décarbonation actuellement déployées ou envisagées.

Nous sommes pleinement conscients des contraintes de confidentialité propres au secteur industriel et restons naturellement ouverts à toute forme d'échange que vous jugerez appropriée.

Nous vous remercions par avance pour l'attention que vous porterez à notre sollicitation. Votre contribution constituerait un soutien précieux aux travaux académiques des étudiants et des chercheurs, participant à la diffusion des connaissances, à l'intérêt général et à la formation des futurs ingénieurs.

Nous vous prions d'agréer, Madame, Monsieur, l'expression de nos salutations distinguées.

Hamza SAFI

Figure 40 : Roquette