



# GUIDE POUR RÉALISER UN PROJET DE VALORISATION DU BIOCO<sub>2</sub> ISSU DE MÉTHANISATION

GUIDE RÉALISÉ EN COLLABORATION AVEC LE GT CO<sub>2</sub> DU CSF,  
PILOTÉ PAR LE CTBM (ATEE CLUB BIOGAZ)

Avec la contribution technique et le financement de



---

# CONTRIBUTIONS & REMERCIEMENTS

Le **Centre Technique national du Biogaz et de la Méthanisation** (CTBM) de l'ATEE anime le réseau recherche et innovation de la filière. Il pilote des groupes de travail sur des thématiques techniques et organise les Journées Recherche Innovation biogaz méthanisation et d'autres événements de diffusion des connaissances.

Le **Comité Stratégique de Filière Nouveaux Systèmes Énergétiques** (CSF NSE) est l'interface entre l'État et les acteurs des nouvelles industries de la transition énergétique. Il est organisé en groupes de travail (GT) dont des GT filière (solaire, éolien, biogaz ...) et des GT transverses (contenu local, recherche...). Le Groupe de Travail Biogaz représente la filière des gaz renouvelables et notamment de la méthanisation au sein du CSF NSE.

Au sein des travaux du **GT Biogaz**, le sous-groupe de travail Industrialisation – Compétitivité vise à accélérer l'industrialisation et la performance économique de la filière.

## CONTRIBUTEURS

**VOLTIGITAL** | Rédaction, études de cas et compléments thématiques

**Yélé Consulting** | Graphisme et ligne éditoriale

**GRDF** | Expertise, données, relecture et financement de la prestation de réalisation du guide

**EasyCO<sub>2</sub>** | Expertise et relecture

**GT CO<sub>2</sub> CSF NSE animé par le CTBM** | Expertise et relecture



# SOMMAIRE

|                                                                                       |                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| AVANT-PROPOS                                                                          | <a href="#">4</a>  |
| INTRODUCTION                                                                          | <a href="#">6</a>  |
| SECTION I - GUIDE PRATIQUE DU PRODUCTEUR                                              | <a href="#">8</a>  |
| SECTION II – ÉTUDES DE CAS                                                            | <a href="#">19</a> |
| I.    LA MÉTHANISATION AUTONOME                                                       | <a href="#">20</a> |
| II.   LA MÉTHANISATION TERRITORIALE                                                   | <a href="#">22</a> |
| III.  LA MÉTHANISATION À LA FERME                                                     | <a href="#">24</a> |
| IV.   TÉMOIGNAGE MÉTHATREIL                                                           | <a href="#">26</a> |
| SECTION III – COMPLÉMENTS THÉMATIQUES                                                 | <a href="#">27</a> |
| I.    LES PRINCIPAUX USAGES DU CO <sub>2</sub> LIQUIDE ISSU DE MÉTHANATION            | <a href="#">28</a> |
| II.   INTÉRÊTS ET ATTENTES DES CONSOMMATEURS                                          | <a href="#">31</a> |
| III.  LES USAGES DIRECTS ET PAR CANALISATION DU CO <sub>2</sub> ISSU DE MÉTHANISATION | <a href="#">33</a> |
| IV.   QUALITÉ ALIMENTAIRE                                                             | <a href="#">35</a> |
| V.    BIOCO <sub>2</sub> DE MÉTHANISATION ET IMPACT CARBONE                           | <a href="#">37</a> |
| VI.   ASPECTS TECHNIQUES D’UNE UNITÉ DE LIQUÉFACTION                                  | <a href="#">39</a> |
| VII.  ASPECTS ÉCONOMIQUES                                                             | <a href="#">41</a> |
| VIII. TRANSPORT ROUTIER DE CO <sub>2</sub>                                            | <a href="#">45</a> |
| IX.   VOIES INNOVANTES ET EN DEVENIR DE VALORISATION DE CO <sub>2</sub>               | <a href="#">50</a> |
| X.    RESSOURCES COMPLÉMENTAIRES                                                      | <a href="#">52</a> |
| GLOSSAIRE ET ANNEXES                                                                  | <a href="#">53</a> |



# AVANT-PROPOS

---

# CONTEXTE ET ACTIONS

---

## EN FAVEUR DE LA VALORISATION DU CO<sub>2</sub> DE MÉTHANISATION

Un guide technique, *Valorisation du CO<sub>2</sub> de méthanisation*<sup>1</sup> est paru en mai 2020, porté par le Centre Technique du Biogaz et de la Méthanisation (CTBM) du Club Biogaz de l'Association Technique Énergie Environnement (ATEE). Ce guide a permis de faire émerger un socle commun de concepts et d'information autour de la possibilité de valoriser le CO<sub>2</sub> et reste une porte d'entrée incontournable pour s'initier au sujet.

Le présent guide a pour objectif de formaliser les informations, questions, retours d'expériences et données glanés par certains acteurs de la filière afin de les mettre à disposition des producteurs de biométhane et contribuer ainsi à l'accélération du déploiement des projets et à la prise en compte des opportunités et contraintes.

<sup>1</sup> [Guide technique de valorisation du CO<sub>2</sub> de méthanisation](#), CTBM – ATEE, Mai 2020

Ce guide vise à appuyer la structuration et le développement de la filière en :

- aidant les exploitants d'unité de méthanisation en injection à appréhender et anticiper les différentes étapes de développement d'un projet de valorisation du bioCO<sub>2</sub> de méthanisation ;
- faisant connaître les enjeux de la valorisation du bioCO<sub>2</sub> issu de méthanisation pour en faciliter la diffusion auprès des consommateurs, des fournisseurs de matériels et des financeurs, et pour inspirer de nouveaux producteurs.

## NOUS PROPOSONS DEUX PARCOURS LECTEURS :



Les producteurs et futurs producteurs de biométhane pourront se reporter au [guide pas à pas](#) (page 9), leur permettant de découvrir les grandes étapes d'un projet de bioCO<sub>2</sub>, ainsi qu'aux [préétudes](#) (page 19) et aux compléments (page 27).



L'ensemble des lecteurs pourra se référer à la section "[Compléments thématiques](#)" (page 27) qui permet d'apporter des précisions sur les points clés d'un projet de valorisation du CO<sub>2</sub> issu de méthanisation.

## NOTA BENE - AVIS DE NON RESPONSABILITÉ

Les informations proposées ici constituent un retour d'expérience sur la filière et certains projets portant sur la valorisation du bioCO<sub>2</sub>. Elles visent à sensibiliser le lecteur aux questions à se poser pour développer un projet de valorisation de bioCO<sub>2</sub>.

Ce guide n'a pas vocation à remplacer une étude technico-économique adaptée à un projet spécifique et il est fortement recommandé de passer par des bureaux d'études, fournisseurs et autres Assistants à Maitrise d'Ouvrage (AMO) pour mener à bien son projet.

Compte tenu de la dynamique du secteur, il est possible que les informations présentées dans ce guide (prix, références, voies de valorisation, contraintes réglementaires) ne soient pas extrapolables à tous les contextes et qu'elles deviennent obsolètes. Au moment de lancer son projet, il est donc recommandé de se renseigner sur le contexte actuel, en sollicitant notamment les ressources du Comité stratégique de filière<sup>2</sup>(CSF), du Centre Technique National du Biogaz et de la Méthanisation<sup>3</sup> (CTBM) et du principal gestionnaire du réseau de distribution de gaz en France (GRDF<sup>4</sup>), et en s'appuyant sur l'expertise d'entreprises spécialisées.



### LA DÉFINITION

"Le CO<sub>2</sub> biogénique est formé à partir de carbone fixé par la plante grâce à la photosynthèse à partir du CO<sub>2</sub> de l'air."

<sup>2</sup> [Nouveaux systèmes énergétiques – Faire de la transition énergétique un levier de réindustrialisation](#) - [www.systemesenergetiques.org](http://www.systemesenergetiques.org)

<sup>3</sup> [CTBM | ATEE](#) - [www.atee.fr/energies-renouvelables/club-biogaz/ctbm](http://www.atee.fr/energies-renouvelables/club-biogaz/ctbm)

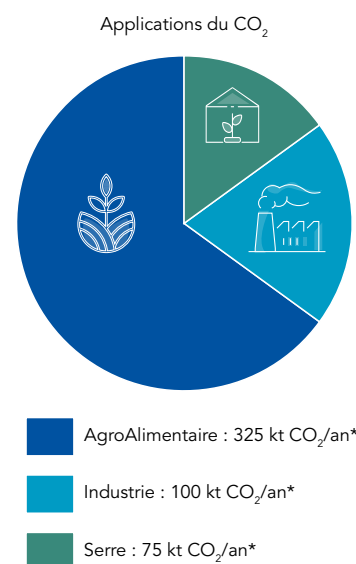
<sup>4</sup> [Gaz Naturel GRDF : le réseau de distribution de gaz naturel](#) - [www.grdf.fr](http://www.grdf.fr)

# INTRODUCTION

## LE BIOCO<sub>2</sub> ISSU DE MÉTHANISATION : UNE RESSOURCE À VALORISER !

Aussi incroyable que cela puisse paraître, on assiste depuis plusieurs années à des pénuries de CO<sub>2</sub>. Non pas le CO<sub>2</sub> atmosphérique diffus, dont les émissions continuent d'augmenter au niveau mondial avec l'utilisation des énergies fossiles, mais le CO<sub>2</sub> enrichi, conditionné et distribué, qui est notamment utilisé pour la production de glace carbonique et dans l'industrie agroalimentaire pour la conservation des aliments, la carbonatation des boissons gazeuses ou la surgélation. Avec un marché français de l'ordre de 500 ktCO<sub>2</sub> et plus de 50 applications, le CO<sub>2</sub> liquéfié est aujourd'hui produit à partir de quelques grands sites et distribué partout dans les territoires.

Taxe carbone, coûts de l'énergie, attentes des consommateurs, beaucoup de facteurs concourent à faire évoluer cet écosystème, et le bioCO<sub>2</sub> de méthanisation peut y jouer un rôle intéressant.



\*Quantités estimées (source : entretien d'acteurs)

## LE BIOCO<sub>2</sub> : UN COPRODUIT DE LA MÉTHANISATION

La méthanisation produit du biogaz, un mélange de méthane (CH<sub>4</sub>) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Dans le cadre des unités d'injection, si le méthane est séparé pour être injecté dans les réseaux, le CO<sub>2</sub> se retrouve disponible à l'évent, fortement concentré.

Il existe plusieurs moyens de valoriser ce CO<sub>2</sub> présent dans les offgaz :

- Le liquéfier et le purifier pour le transporter et le valoriser tel quel chez des utilisateurs<sup>5</sup>. C'est la voie la plus mature, avec de nombreuses réalisations en Europe ;
- Le transporter par canalisation : cette voie prometteuse nécessite des aménagements réglementaires (en cours) et l'existence de consommateurs à proximité ;
- Le transformer et le valoriser sur place via la transformation chimique (méthane, méthanol, kérosène), la minéralisation et le stockage. De nombreuses solutions sont en développement, parfois avec des maturités technologiques élevées, mais de nombreux freins de marché existent. À long terme, cette voie pourrait surpasser en volume les autres voies de valorisation.

## LE BIOCO<sub>2</sub> DE MÉTHANISATION DISPOSE DE NOMBREUX ATOUTS

- Production stable et régulière (peu de saisonnalité), à coût maîtrisé ;
- Production locale, de proximité ;
- Production décentralisée dans les territoires, avec de nombreux sites à travers la France qui garantissent une diversité des sources d'approvisionnement ;
- Concentration élevée à l'évent de l'épurateur ;
- CO<sub>2</sub> biogénique.

<sup>5</sup> Voir "[Les principaux usages du CO<sub>2</sub> liquéfié issu de méthanisation](#)" page 28



## VALORISER LE BIOCO<sub>2</sub> DE MÉTHANISATION C'EST :



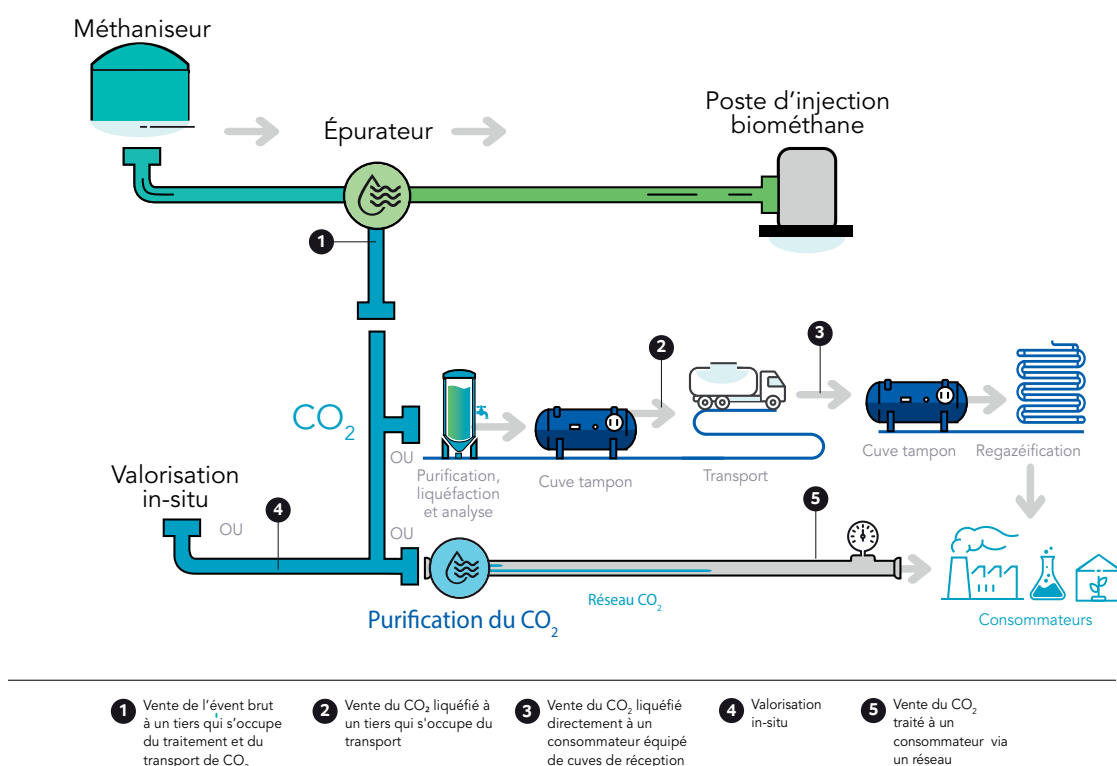
DÉVELOPPER L'ÉCONOMIE  
CIRCULAIRE DANS LES  
TERRITOIRES



RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE  
GAZ À EFFET DE SERRE



AUGMENTER LES REVENUS  
DES PRODUCTEURS DE  
BIOMÉTHANE



Différentes options pour valoriser son CO<sub>2</sub>

## MAIS LA FILIÈRE DOIT SE STRUCTURER

- Manque de retours sur les toutes premières expériences en France ;
- Effet d'échelle : les coûts de production sont plus élevés pour les petites unités que pour les unités centralisées ;
- Difficulté à bien identifier les débouchés qui sont nombreux, mais variés et diffus ;
- Beaucoup de particularités liées au contexte local (présence de consommateurs, d'autres producteurs) ;
- Maîtrise de la qualité alimentaire quand applicable et moyens de logistiques associés au transport du bioCO<sub>2</sub> liquéfié.



## SECTION I

---

# GUIDE PRATIQUE DU PRODUCTEUR

Quelles sont les huit étapes à suivre pour développer votre projet de valorisation du bioCO<sub>2</sub> issu de méthanisation ? Comment évaluer votre potentiel et comment trouver des débouchés adéquats ?

Cette section vous permettra de développer un projet sur-mesure, adapté à votre potentiel, et de n'oublier aucune étape clé.

# I | VOTRE PROJET PAS À PAS



## CONSEILS

Pour un projet réussi,  
cochez toutes les cases !



## 1. CONNAÎTRE SON POTENTIEL

Simplifié :  $100 \text{ Nm}^3/\text{h} \longleftrightarrow 1\,000 \text{ t/an de CO}_2$

Détaillé : Calcul complet, à croiser avec celui du ou des équipementiers (étape 5) et à faire confirmer par un bureau d'étude ou expert indépendant, l'objectif étant de partir d'un potentiel réel avant toute approche de plan d'affaires.

MON POTENTIEL :



## 2. DÉFINIR SON RÔLE SOUHAITÉ

- Mettre à disposition l'offgaz
- Investir (liquéfacteur, citerne)
- Organiser le transport (du  $\text{CO}_2$ )
- Gérer un réseau

Le niveau de risque idéal dépend de la bonne maîtrise des sujets et de l'appétit des porteurs.

Tout au long des étapes qui suivent, le rôle pourra ou devra s'adapter en fonction des partenaires et des enjeux du projet.

☐

RÔLE SOUHAITÉ DÉFINI



## 3. IDENTIFIER LES DÉBOUCHÉS

Lister les principaux débouchés (consommation, qualité, localisation, saisonnalité).

☐

TABLEAU DES DÉBOUCHÉS

LE TABLEAU EST DISPONIBLE  
DANS LE CHAPITRE SUIVANT !

| Famille de débouché | Quantité annuelle et mensuelle                                    | Format  | Qualité     | Distance | Prix    |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------|---------|-------------|----------|---------|
| Serres              | 1 000 tCO <sub>2</sub> /an<br>Min : 30 t/mois<br>Max : 200 t/mois | Liquide | Surveillée  | 60 km    | 100 €/t |
| Minéralisation      | 50 tCO <sub>2</sub> /mois                                         | Liquide | Sans objet  | 30 km    | 80 €/t  |
| Agro alimentaire    | 30 tCO <sub>2</sub> /mois                                         | Liquide | Alimentaire | 50 km    | 150 €/t |
| ...                 |                                                                   |         |             |          |         |



#### 4. REVOIR LES PARAMÈTRES CLÉS

Avant d'engager une étude technico-économique, passer en revue les paramètres clés pour vérifier la faisabilité de principe et éviter les principaux écueils.

- Débouchés pour le CO<sub>2</sub> prêts à s'engager
- Prix d'achat du CO<sub>2</sub> des clients compatibles avec mon profil de projet
- Prix de l'électricité maîtrisé
- Contrat de maintenance (prestations et coûts)

☐ MA CHECKLIST "PARAMÈTRES CLÉS" GO OU NO GO ?



#### 5. RÉALISER UNE ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

L'étude vise à dimensionner le projet et sécuriser des offres de fournisseurs (avec des engagements de performances). Elle permet notamment de détailler le plan d'affaires (CAPEX, OPEX, rentabilité).

☐ ÉTUDE RÉALISÉE ☐ RÉSULTATS CONFORMES AUX ATTENTES



#### 6. NÉGOCIER LES CONTRATS

☐ CONTRAT DE CONSTRUCTION NÉGOCIÉ ☐ CONTRAT(S) DE DEBOUCHÉ(S) NÉGOCIÉ(S)



#### 7. OBTENIR LES AUTORISATIONS

Permis de construire ou déclaration de travaux peuvent être nécessaires. Informer également la DREAL (via porter à connaissance). Pour les débouchés "alimentaires", un dossier sanitaire est nécessaire.

☐ AUTORITÉS INFORMÉES ☐ DOSSIER SANITAIRE CONSTITUÉ (SELON PROJET)



#### 8. DOSSIER DE FINANCEMENT

Pour finaliser le projet, il vous faudra :

- Évaluer les besoins financiers
- Identifier les risques et y répondre
- Rechercher des subventions
- Finaliser le tour de table

☐ FINANCEMENT SÉCURISÉ

DÉMARRAGE DE LA CONSTRUCTION...  
LE PROJET EST DANS LES TUYAUX !



## II | COMPRENDRE CHAQUE ÉTAPE



### 1. CONNAITRE SON POTENTIEL

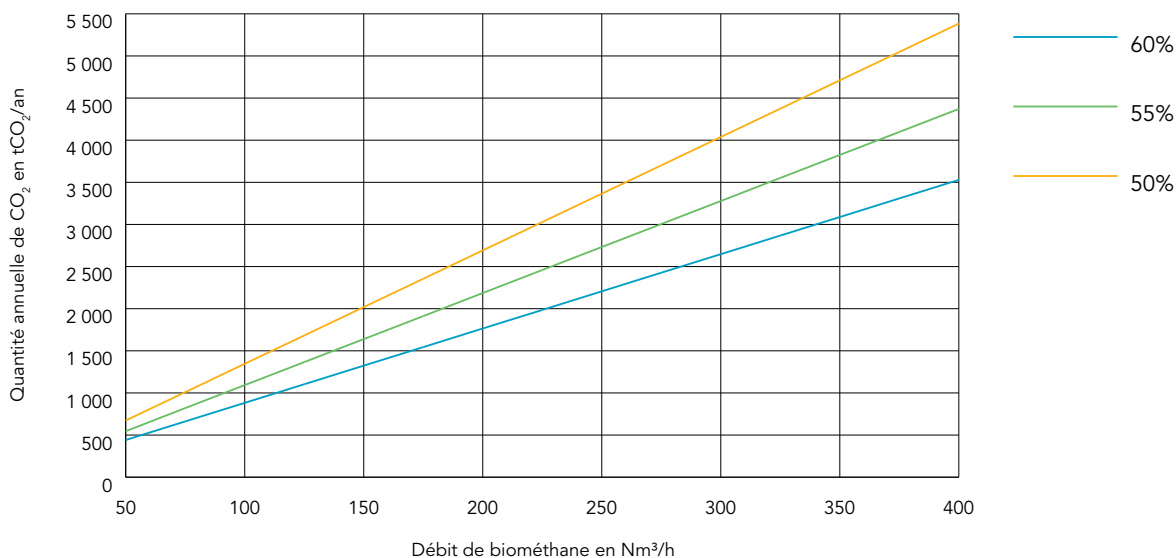
On peut estimer très simplement, mais de manière approximative, le potentiel de production d'une unité de CO<sub>2</sub> avec la règle suivante : une unité de biométhane de 100 Nm<sup>3</sup>/h produit environ 1 000 tCO<sub>2</sub>/an.

Une approche plus complète consiste à prendre en compte l'ensemble des paramètres, dont notamment :

- Le taux de méthane dans le biogaz ;
- Le rendement carbone : dans un liquéfacteur, une partie du CO<sub>2</sub> n'est pas liquéfié et part à l'évent. Le rendement carbone permet de définir la part de CO<sub>2</sub> que l'on liquéfie sur la part de CO<sub>2</sub> disponible. Ce rendement carbone est généralement de l'ordre de 90% (parfois 95%) et ne doit donc pas être oublié. Il augmente toutefois si les gaz d'évent du liquéfacteur sont recirculés dans l'épurateur ;
- La taille type des machines de liquéfaction (300, 400, 500, 600... kgCO<sub>2</sub>/h). Par exemple : pour valoriser 311 kg/h, il n'est pas forcément nécessaire de surinvestir dans un liquéfacteur de 400 kgCO<sub>2</sub>/h.

L'abaque ci-dessous donne rapidement le tonnage attendu en fonction du taux de méthane dans le biogaz (voir en [annexe 5](#) page 57, pour une plage plus grande de débit de biométhane).

Estimation de la quantité de CO<sub>2</sub> liquéfié, en fonction du débit de biométhane en Nm<sup>3</sup>/h, et du taux de CH<sub>4</sub> dans le biogaz (plage 50 - 400 Nm<sup>3</sup>/h)



Par exemple un projet de 100 Nm<sup>3</sup>/h avec un taux de biométhane de 55% permettra de produire environ 1100 tCO<sub>2</sub>/an.

Les hypothèses considérées pour cet abaque sont notamment : un rendement carbone de 90% et un fonctionnement de 8 000 h/an. On peut également réaliser soi-même le calcul détaillé avec quelques hypothèses, via les formules en [annexe 3](#) (page 55).

Enfin, il est recommandé d'exiger des fournisseurs de matériels la fourniture d'un engagement de performance de leur installation (capacité de production, consommation énergétique, maintenance...) et les conditions de ces garanties (en particulier la composition des offgaz). Si cette information n'est pas disponible en début de discussion, il est très fortement conseillé de l'avoir dans la version finalisée de l'offre du fournisseur retenu.



## 2. DÉFINIR SON RÔLE SOUHAITÉ

Il existe plusieurs rôles possibles pour un porteur de projet, avec différents niveaux de complexité.

1. Le premier rôle consiste à mettre l'offgaz à la disposition d'un tiers. Un contrat peut être discuté mettant en avant d'une part le prix de l'offgaz revalorisé et d'autre part les obligations de chacun (dont les obligations à fournir le CO<sub>2</sub> et du terrain par exemple). Des synergies peuvent également être trouvées pour la conduite des installations ou encore la mise à disposition de terrains.  
Si cette option minimise les risques, elle limite aussi la part de la valeur rétrocédée au producteur.
2. Il est aussi possible de s'intéresser uniquement à la construction d'un liquéfacteur de CO<sub>2</sub> et de vendre le CO<sub>2</sub> au départ.  
Dans ce cas-là, on porte l'investissement dans une machine de plusieurs centaines de milliers d'euros et on supporte les risques de marchés (débouchés du CO<sub>2</sub>, variation du prix de l'électricité) ou de fonctionnement (panne). On conserve toutefois son indépendance et la rentabilité peut être plus forte, surtout si le projet dispose d'atouts comme une bonne localisation.
3. Par extension, on peut aussi organiser la livraison du CO<sub>2</sub>, par exemple à quelques clients qui ont des contrats d'approvisionnement régulier. Il n'est pas nécessaire d'avoir son propre chauffeur et son propre camion<sup>6</sup>, ni même sa propre citerne, puisque des entreprises spécialisées proposent ce service. Néanmoins, on peut décider d'investir dans une citerne (jusqu'à environ 200 000 € pour une citerne neuve de grande capacité avec ses accessoires) et la faire tracter par un tiers.
4. On peut avoir plus d'ambition et coordonner une flotte de camions, voire de liquéfacteurs, en investissant avec ou chez les autres. C'est une activité nécessairement plus risquée et qui va demander des compétences spécialisées et dont la rentabilité peut être affectée par de nombreux facteurs.
5. Il convient également de mentionner les valorisations directes par canalisation ou sur site, pour lesquelles des opportunités peuvent exister. Compte tenu de la maturité technique ou marché de ces solutions, une bonne connaissance du sujet est un prérequis pour un porteur de projet qui voudrait investir et exploiter.  
Sinon, l'option 1 de mise à disposition de l'offgaz demeure une solution minimisant les risques industriels et financiers pour l'exploitant de l'unité biométhane.

<sup>6</sup> Le transport de CO<sub>2</sub> nécessite des qualifications et est soumis à la réglementation ADR (transport de matières dangereuses)

6. Enfin, il est possible d'envisager la mise en place d'une société regroupant plusieurs actionnaires dans laquelle chacun d'eux contribue en apportant sa valeur ajoutée. Le producteur de biométhane et de bioCO<sub>2</sub> peut y participer en exerçant un rôle plus complexe, mais entouré d'associés et avec une implication financière plus faible.



### 3. IDENTIFIER LES DÉBOUCHÉS

Identifier les débouchés constitue un des points majeurs d'un projet de valorisation du CO<sub>2</sub>. Les porteurs de projets devront être particulièrement vigilants sur ces aspects.

Il existe plusieurs types de voies de valorisation via :

#### 1. DES SOCIÉTÉS INTERMÉDIAIRES SPÉCIALISÉES DANS LE TRANSPORT ET LE COMMERCE DU CO<sub>2</sub>

Avantages :

- Vente du CO<sub>2</sub> aux bornes de l'installation
- Pas de prise en charge des aspects logistiques et des utilisateurs finaux
- Contrat potentiellement sécurisé sur le long terme
- Les risques liés aux marchés sont limités
- Maîtrise de la situation concurrentielle

Inconvénients et points d'attention :

- Intérêts parfois divergents de ces sociétés et des producteurs
- Partage de la valeur
- Exigences/contraintes contractuelles
- Sécurisation des contrats sur le long terme

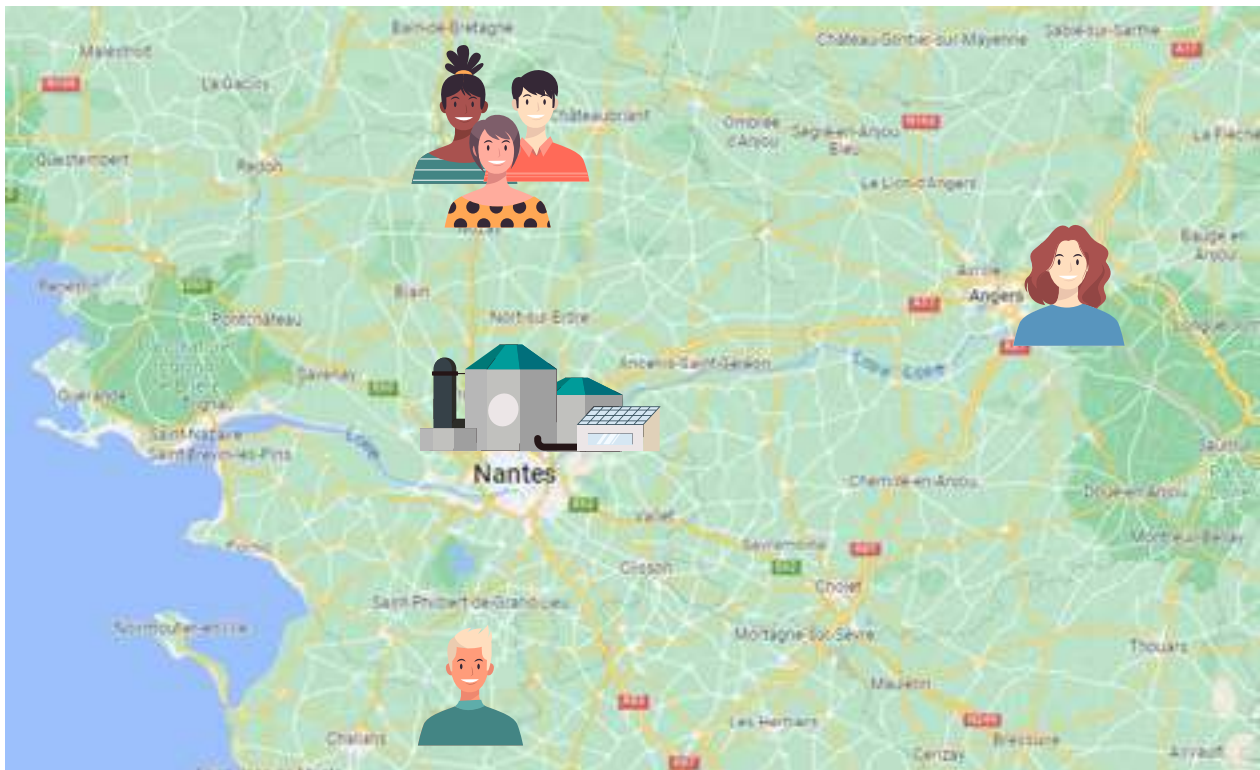
#### 2. L'ACCÈS DIRECT AUX CLIENTS FINAUX

En particulier dans ce cas de figure, il est recommandé d'utiliser plusieurs outils :

- Un tableau de débouchés permet de représenter rapidement le potentiel et les principaux paramètres (voir page 27 dans la section "[Compléments Thématiques](#)" pour plus de détails sur ce sujet).

| Famille de débouché                                                                                  | Quantité annuelle et mensuelle                                    | Format  | Qualité     | Distance | Prix    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------|-------------|----------|---------|
| Serres            | 1 000 tCO <sub>2</sub> /an<br>Min : 30 t/mois<br>Max : 200 t/mois | Liquide | Surveillée  | 60 km    | 100 €/t |
| Minéralisation    | 50 tCO <sub>2</sub> /mois                                         | Liquide | Sans objet  | 30 km    | 80 €/t  |
| Agro alimentaire  | 30 tCO <sub>2</sub> /mois                                         | Liquide | Alimentaire | 50 km    | 150 €/t |
| ...                                                                                                  |                                                                   |         |             |          |         |

- Une cartographie permet également de bien saisir les enjeux de transport puisqu'il peut exister des groupes de consommateurs relativement proches. Leur identification peut permettre d'optimiser les contrats et les coûts de transport.



Représentation géographique des groupes de consommateurs potentiels.

Source carte Google Maps

- Une carte de la situation concurrentielle peut être réalisée, qui permet de localiser les autres producteurs de CO<sub>2</sub>, les volumes produits et de trouver d'éventuels partenaires.

## COMMENT TROUVER DES CONSOMMATEURS DE CO<sub>2</sub> ?

Trouver des consommateurs de CO<sub>2</sub> n'est pas chose aisée. Le réseau local aide fortement. La recherche par code NAF dans la base SIRENE<sup>7</sup> peut être utile (par exemple avec le code NAF 01.13Z : "Culture de légumes, de melons, de racines et de tubercules" pour identifier les maraîchers), mais son utilisation est assez complexe. Il est possible de sous-traiter l'étude à un bureau d'étude spécialisé.

Enfin, les consommateurs de CO<sub>2</sub> disposent généralement d'une cuve de stockage, propriété du fournisseur de CO<sub>2</sub>, qu'ils louent (quelques centaines d'euros par mois, selon la capacité de la cuve).

Il faudra donc prévoir pour le porteur et les consommateurs, le financement d'une cuve fixe de stockage et les loyers associés. Ces montants ne sont généralement pas intégrés dans le prix du CO<sub>2</sub> (le consommateur devra payer en supplément les coûts de stockage sur son site).



### À NOTER

Le potentiel de production d'une unité de CO<sub>2</sub> n'est pas toujours égal à son potentiel de vente.

<sup>7</sup> Le site [www.sirene.fr](http://www.sirene.fr) vous permet de constituer une liste d'établissements selon vos critères.



## 4. REVOIR LES PARAMÈTRES CLÉS

La revue des paramètres clés vise à valider rapidement que le projet a un potentiel de réalisation, notamment avant d'engager des frais d'étude.

Les principaux points à valider sont les suivants :

### 1. EST-CE QUE JE PEUX AVOIR DES ENGAGEMENTS DE REPRISE DU CO<sub>2</sub> ? (BASE DE CONTRAT)

Trois points clés sont à considérer :

- Il est conseillé que ces engagements entraînent des pénalités en cas de baisse trop forte des consommations (mécanismes appelés "take or pay"); attention toutefois, de manière réciproque, des pénalités pourraient être exigées en contrepartie dans le cas d'un défaut de livraison ;
- S'assurer que les acheteurs puissent s'engager sur des durées longues, supérieures au temps de retour brut escompté ;
- Vérifier la solidité financière des acheteurs.

### 2. LE PRIX MOYEN DU CO<sub>2</sub> ACHETÉ EST-IL COMPATIBLE AVEC LA TAILLE DE MON PROJET ?

Il existe une forte variabilité des prix livrés pour les clients, typiquement de 50 à 200 €/tCO<sub>2</sub>. Il est nécessaire de s'accorder sur une gamme de prix adaptée à la taille du projet (voir "[Études de cas](#)" page 19) ;

- Quels sont les atouts de mon projet vis-à-vis de la localisation et aux difficultés locales d'approvisionnement ?

### 3. LE SUJET DE LA QUALITÉ DU CO<sub>2</sub> À PRODUIRE (ET SES SURCÔÛTS) EST-IL DÉFINI ?

Il y a un impact à fournir un CO<sub>2</sub> de qualité alimentaire (voir "[Qualité Alimentaire](#)" dans les Compléments thématiques page 35) et à la date de rédaction du guide, il n'y a pas de projets connus de CO<sub>2</sub> issu de méthanisation de qualité alimentaire. Ce point a-t-il été bien pris en compte ?

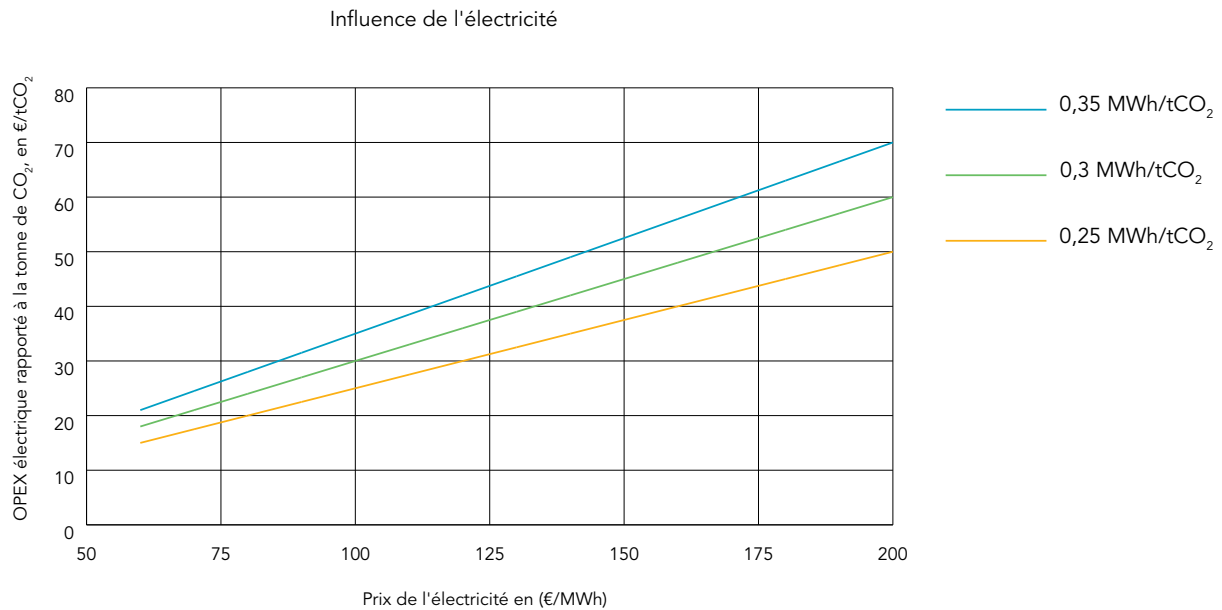
### 4. AI-JE BIEN DÉFINI LES MODALITÉS DE TRANSPORT ?

En premier lieu, on fera bien la distinction entre le prix de départ sur site et le prix livré au consommateur. Le coût du transport du CO<sub>2</sub> liquéfié est généralement compris entre 20 et 50 €/tCO<sub>2</sub> pour des distances inférieures à 200 km. Au-delà des coûts, c'est l'organisation qui est à définir : quelle citerne, quels parcours, quels acteurs ? Pour plus d'information sur les modalités de transport, vous pouvez vous rapporter aux "[Compléments Thématiques](#)" (page 27).

Le transport de CO<sub>2</sub> est régi par des règles à respecter dans le cadre de la directive ADR. Ont-elles été prises en compte ?

### 5. EST-CE QUE JE MAÎTRISE MES COÛTS D'ÉLECTRICITÉ ?

Un liquéfacteur consommant 0,3 MWh/tCO<sub>2</sub> et payant son électricité 100 €/MWh, l'électricité représente 30 €/tCO<sub>2</sub> en termes de coût, soit un impact très important. Plus la facture d'électricité est élevée, plus l'unité devra être performante. Si les coûts sont trop élevés ou susceptibles de varier fortement à la hausse, la piste liquéfaction est peut-être à abandonner.



## 6. AI-JE LA PLACE D'INSTALLER L'UNITÉ ET FAIRE LES AMÉNAGEMENTS DE VOIRIE ?

En amont de la réalisation d'une étude détaillée, il faut vérifier la possibilité de placer les équipements et les parcours camions.

En termes d'espace au sol, une unité de liquéfaction nécessite typiquement :

- Pour l'équipement principal : 10 à 15m de long et 4 à 5m de large auquel il faut rajouter une bande de 1m libre autour pour la maintenance ;
- Pour les armoires de contrôle : 2 à 3m de long et 1m de large ;
- L'emplacement pour la/les cuves de stockage ;
- Les voies d'accès pour les camions et citernes.

## 7. SUIS-JE BIEN AU COURANT DES DERNIÈRES ÉVOLUTIONS EN MATIÈRE DE CO<sub>2</sub> ?

Avant de se lancer, il ne faut pas hésiter à se renseigner sur les dernières tendances et évolutions (concurrences, normes, prix) dans le domaine du CO<sub>2</sub> : webinaires, salons, ressources complémentaires, centres d'expertise... échanger avec les acteurs du secteur permettra de conforter la viabilité du projet ou de l'annuler s'il ne s'avère pas assez solide.

## GO OU NO GO ?

Au vu de cette évaluation, le projet et ses porteurs disposent-ils des bons atouts pour réussir ?

C'est aussi l'occasion de revoir le positionnement initial (étape 2) en fonction des risques et des opportunités qui doivent être identifiés à ce stade ?

Faut-il rechercher des partenaires complémentaires qui maîtriseraient les compétences manquantes ?

Une démarche itérative pour consolider cette phase préliminaire n'est pas à exclure.



## 5. RÉALISER UNE ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

Pour cette étape, il est vivement conseillé d'être accompagné par un spécialiste.

### L'ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE DOIT COUVRIR LES POINTS SUIVANTS :

- Dimensionnement de l'installation ;
- Offres de fournisseurs (au moins 3) et synthèse comparative, avec point de fonctionnement et garanties (engagements) de performance et conditions de ces garanties (spécification des offgaz par exemple) ;
- Prise en compte des externalités positives :
  - Biométhane récupéré ;
  - Conformité réglementaire (émissions de  $\text{CH}_4$  par exemple) ;
  - Le cas échéant, chaleur récupérable sur le compresseur  $\text{CO}_2$  et le groupe froid (par exemple pour alimenter le digesteur) ;
- Prise en compte des variations saisonnières sur les débouchés ;
- Synthèse économique (CAPEX, OPEX, rentabilité), ainsi que le prix cible de la tonne de  $\text{CO}_2$ .

### LA COMPARAISON DES OFFRES DE FOURNISSEURS DOIT INCLURE :

- Les performances : rendement carbone, consommation électrique ;
- La composition garantie : le taux de pureté du  $\text{CO}_2$  (par exemple 99,9% ou 99,3%) et le cas échéant, la conformité à une spécification technique (Annexe 1 de la norme EIGA par exemple) et les conditions de la garantie ;
- La comparaison des investissements sur une même base de périmètre : matériels, services et raccordements (le cas échéant, la nécessité ou non de construire un bâtiment pour abriter les équipements).



## 6. NÉGOCIER LES CONTRATS

Négocier, rédiger et préparer les contrats d'achats et de fournitures c'est-à-dire :

- Ces contrats d'achats et de ventes seront définis sur le modèle d'affaires choisi et l'analyse des risques ;
- Ils devront intégrer les clauses suspensives indispensables (obtentions des autorisations, du financement, etc.) ;
- Il est recommandé d'indexer le prix du  $\text{CO}_2$  au prix de l'électricité, via une formule permettant de protéger, dans une certaine mesure, le producteur des hausses de prix de l'énergie.



## 7. OBTENIR LES AUTORISATIONS

Le liquéfacteur est une installation industrielle soumise aux Directives Européennes : 1) sur les équipements sous pression, 2) machines et 3) compatibilité électromagnétique (voir les [règlements spécifiques](#), page 56).

Un permis de construire ou une déclaration de travaux (demande à formaliser auprès de la mairie) sont nécessaires. Il n'y a pas de rubrique ICPE dédiée à la liquéfaction de CO<sub>2</sub>. Néanmoins un " porter à connaissance " auprès de la DREAL ou des DDPP/DDCSPP peut-être pertinent pour informer de l'ajout du liquéfacteur sur le site de méthanisation.

Le transport de CO<sub>2</sub> liquéfié entre dans le cadre de la réglementation ADR. Le chauffeur doit être habilité et la citerne de transport agréée.

Pour le volet alimentaire (voir "[Qualité Alimentaire](#)" dans les Compléments thématiques page 35) :

- Il est nécessaire de réaliser les études préalables (HACCP) ainsi qu'une déclaration auprès de la Direction Départementale (et de la Cohésion Sociale) de la Protection des Populations;
- Selon les attentes des clients, il peut-être demandé d'être certifié, par exemple FSSC 22000.



## 8. DOSSIER DE FINANCEMENT

À destination des banques et des investisseurs, le dossier de financement doit comporter :

- Une présentation du projet, dont l'étude économique (voir Étape 5 ci-dessus) ;
- L'évaluation des ressources et des besoins ;
- Une présentation du tour de table des investisseurs potentiels ;
- Une évaluation des risques et leur maîtrise ;
- Les éléments sur la négociation des contrats de fourniture de CO<sub>2</sub>.

C'est un dossier similaire à une unité de méthanisation, avec une grande différence néanmoins: contrairement au biométhane injecté sur le réseau, la reprise du CO<sub>2</sub> n'est pas garantie. Il est donc nécessaire d'argumenter sur ce point.

**VOUS ÊTES PRÊTS À LANCER VOTRE PROJET !**



## SECTION II

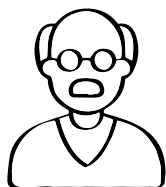
---

# ÉTUDES DE CAS

Comment passer de la théorie, exposée en section 2, à la pratique ? Concrètement, à quoi pourrait ressembler votre projet de valorisation du bioCO<sub>2</sub> issu de méthanisation ?

Nous vous présentons dans cette section trois cas d'usage types, aux potentiels et aux débouchés variés, ainsi qu'un projet pionnier en France : Méthatreil. De quoi trouver de l'inspiration pour votre projet !

# I | MÉTHANISATION AUTONOME



ALBERT EST EXPLOITANT D'UNE UNITÉ DE MÉTHANISATION AVEC ÉPURATEUR MEMBRANAIRE INJECTANT 185 NM<sup>3</sup>/H DE BIOMÉTHANE. IL SOUHAITE VALORISER SON BIOCO<sub>2</sub>. IL ENVISAGE, EN PREMIÈRE APPROCHE, DE METTRE EN PLACE UN LIQUÉFACTEUR ET DE VENDRE LE CO<sub>2</sub> À DES ACTEURS DU TERRITOIRE.



## 1. CONNAITRE SON POTENTIEL

Dans un premier temps, Albert estime son potentiel. Pour cela, il prend en compte le taux de méthane dans le biogaz (50%), le taux de CO<sub>2</sub> dans les offgaz de l'épurateur (98,5%) et fait une hypothèse de rendement carbone de 90% (à vérifier plus tard avec l'offre du fournisseur sélectionné).

Il obtient un débit de 311 kgCO<sub>2</sub>/h de CO<sub>2</sub> liquéfié pouvant être récupéré. Albert sait que les liquéfacteurs ont généralement une taille standardisée (multiple de 100 kgCO<sub>2</sub>/h) et retient donc une unité de 300 kgCO<sub>2</sub>/h, soit 2400 tCO<sub>2</sub>/an.



## 2. DÉFINIR SON RÔLE SOUHAITÉ

Albert maîtrise bien son unité de méthanisation et son épurateur. Il pense que les débouchés de CO<sub>2</sub> seront faciles à sécuriser dans son cas, avec essentiellement un ou deux clients principaux. Il est confiant dans sa capacité technique à financer et exploiter une unité de liquéfaction (pour un montant d'investissement qu'il estime à ce stade entre 1 et 2 M€).

Albert envisage donc son projet de la manière suivante :

- Pour la production : il financera et exploitera un liquéfacteur de CO<sub>2</sub> ;
- Pour le transport : il achètera une citerne de transport et fera appel à un transporteur spécialisé pour le camion et le chauffeur.



## 3. IDENTIFIER LES DÉBOUCHÉS

Dans son entourage, Albert connaît deux grandes serres chauffées à moins de 20 km, qui sont prêtes à acheter chacune 1 000 tCO<sub>2</sub>/an, si le prix est compétitif. Ces serres sont avant tout motivées par la fiabilité d'approvisionnement. Par son réseau, il est également entré en contact avec un producteur de glace carbonique qui cherche à s'installer dans la région. Son besoin est de 500 tCO<sub>2</sub>/an.

A priori, avec un potentiel de 2500 tCO<sub>2</sub>/an, les débouchés seraient suffisants. Cependant, Albert sait que la revente de CO<sub>2</sub> est un point particulièrement important de son projet. Il remarque deux éléments :

1. En discutant avec les serristes et planifiant les livraisons au mois, il comprend que les 2 x 1 000 tCO<sub>2</sub>/an achetées par les serres se répartissent de la manière suivante :
  - Octobre, novembre, décembre : 200 tCO<sub>2</sub> (soit 66 tCO<sub>2</sub>/mois) ;
  - Janvier, février, mars : 400 tCO<sub>2</sub> (soit 133 tCO<sub>2</sub>/mois) ;
  - Avril, mai, juin : 1000 tCO<sub>2</sub> (soit 333 tCO<sub>2</sub>/mois) ;
  - Juillet, août, septembre : 600 tCO<sub>2</sub> (soit 200 tCO<sub>2</sub>/mois).

Sa production étant de 300 kgCO<sub>2</sub>/h (soit environ 200 tCO<sub>2</sub>/mois), il y aura des mois où les serres ne consommeront pas assez, et d'autres où Albert ne pourra pas les fournir complètement.

2. Après plusieurs discussions, avec le producteur de glace carbonique, Albert identifie que celui-ci souhaite une qualité de CO<sub>2</sub> "alimentaire", ce qui va impliquer un surcoût et des précautions complémentaires (voir "[Qualité Alimentaire](#)" dans les Compléments thématiques page 35).

À ce stade de l'analyse, les premiers débouchés ne sont finalement pas suffisants, même si les résultats sont encourageants. Albert doit donc trouver d'autres débouchés (environ 1 000 tCO<sub>2</sub>/an) et revoir son plan de livraison avec ses partenaires serristes. 3 options s'offrent à lui :

- Trouver des débouchés non saisonniers et non alimentaires ;
- Trouver des débouchés alimentaires, en validant que les surcoûts peuvent être pris en charge par un prix plus élevé du CO<sub>2</sub> vendu ;
- Accepter de vendre moins que la capacité maximale de son unité. Albert écarte cette voie, car au vu de la taille de son projet (300 kgCO<sub>2</sub>/h), le "point d'équilibre financier" sera très proche de la capacité nominale.



#### 4. REVOIR LES PARAMÈTRES CLÉS

Ayant résolu le sujet des débouchés de CO<sub>2</sub> en ayant identifié d'autres acheteurs, Albert passe en revue les paramètres clés du projet :

- Il pense pouvoir sécuriser des débouchés suffisants, pour un prix livré entre 120 et 150 €/tCO<sub>2</sub> (communiqué par les clients potentiels). C'est un prix correct pour envisager un projet ;
- Son prix d'électricité est correct (inférieur à 100 €/MWh) ;
- Il dispose de suffisamment de places pour installer son unité et faire circuler les camions ;
- Albert a bien compris les enjeux de qualité alimentaire, il pourra les envisager plus tard ;
- Il a identifié un transporteur (chauffeur + camion) disposant des habilitations pour transporter du CO<sub>2</sub>.



# ALBERT DÉCIDE DE RÉALISER SON ÉTUDE DE FAISABILITÉ



## RÉALISATION DE SON ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

Cette étude doit permettre de :

- Valider la solution technique ;
- Définir les performances : capacité de production, rendement carbone, consommation électrique par tonne de CO<sub>2</sub>, qualité du CO<sub>2</sub> produit ;
- Comparer plusieurs offres de fournisseurs ;
- Étudier les réglementations à appliquer (et en particulier pour la fourniture de CO<sub>2</sub> de qualité alimentaire) ;
- Définir un plan d'implantation préliminaire ;
- Valider le budget d'investissement (skid process et accessoires, aménagements et connexions) ;
- Définir les coûts d'exploitation ;
- Valider le plan d'affaires.

En résumé, les résultats de l'étude sont :

- Une installation de 300 kgCO<sub>2</sub>/h pour un investissement complet d'environ 1300 k€, dont 845 k€ pour le procédé en clé en main et environ 185 k€ de citerne roulante (26 tonnes), la différence correspondant aux coûts de raccordements et de préparation du terrain ;
- Des OPEX de l'ordre de 195 k€/an, dont 83 k€ de service de transport et 67 k€ d'électricité.

À 130 €/tCO<sub>2</sub> livré, le projet a un Temps de Retour brut de 10 ans et un Taux de Rentabilité Interne (TRI) projet de 10%. Pour Albert, son unité de méthanisation a encore 15 ans d'exploitation minimum. C'est un projet viable.

En y regardant de plus près, Albert découvre quelques possibilités d'optimisation :

- Sur le transport : la citerne envisagée ne réaliserait que 1,8 voyage par semaine en moyenne. En la mutualisant avec d'autres producteurs, il pourrait réduire le coût du transport. Il pourrait sinon acheter une citerne plus petite, montée sur la remorque, voire une citerne d'occasion. Attention à ce que celle-ci soit bien conforme avec la réglementation ADR sur le transport de CO<sub>2</sub> liquide.
- Sur l'énergie : le liquéfacteur comporte deux compresseurs à refroidir, sur lesquels de la récupération de chaleur est possible<sup>8</sup>.
- À l'évent du liquéfacteur, le gaz a une composition comprenant 25% CH<sub>4</sub> (majoritairement du CO<sub>2</sub> et un peu de N<sub>2</sub> et de O<sub>2</sub>). Albert envisage de récupérer une partie de ce flux pour le renvoyer en amont de l'épurateur et ainsi améliorer son bilan environnemental et économique. Il faut que l'épurateur soit dimensionné pour reprendre ce flux.

Enfin, l'étude indique un point de vigilance sur le contrôle régulier de la qualité du CO<sub>2</sub> vis-à-vis de petits perturbateurs (éthylène). Un analyseur simple (teneur en CO<sub>2</sub>, détection de seuil d'éthylène) peut être suffisant.



## VOLET RÉGLEMENTAIRE

Albert doit vérifier que l'installation sera bien certifiée "CE".

Il formalisera la construction dans le cadre d'un permis de construire ou d'une déclaration de travaux.

Dans le cadre du volet transport de CO<sub>2</sub>, Albert s'assure que l'entreprise qui réalisera la prestation de transport sera habilitée et que la citerne de transport sera agréée, conformément à la directive ADR.



## SON DOSSIER DE FINANCEMENT

Albert prépare son dossier de financement, avec un point d'attention sur :

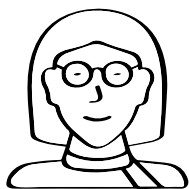
- Les risques, et en particulier :
  - sur les contrats pour les débouchés du CO<sub>2</sub> et la solidité des acheteurs : sont-ils prêts à participer au tour de table ? Que se passe-t-il en cas de défaut de l'un d'eux ? Quelle est la durée d'engagement ? Quelle est l'indexation du prix du CO<sub>2</sub> (ex. : indexation sur le coût de l'électricité) ? Quelles modalités pour sécuriser son contrat ?
  - La fiabilité du fournisseur de l'installation de CO<sub>2</sub> et les garanties de performance ;
  - La maîtrise des consommations et des coûts d'électricité.
- Les subventions accessibles.

<sup>8</sup> Dans le cadre d'un projet neuf méthanisation et liquéfaction, la chaleur pourra être récupérée pour chauffer le digesteur.

C'EST DÉCIDÉ,  
ALBERT SE LANCE !



## II | MÉTHANISATION TERRITORIALE



BÉATRICE TRAVAILLE POUR UN GROUPE INDUSTRIEL QUI DISPOSE DE PLUSIEURS UNITÉS DE MÉTHANISATION EN INJECTION, DONT UNE DE 435 NM<sup>3</sup>/H AVEC 55% DE MÉTHANE, ÉQUIPÉE D'UN ÉPURATEUR DE TYPE PSA. PARMI SES MISSIONS, ELLE DOIT MENER LES DÉMARCHES POUR ÉTUDIER UN PROJET DE LIQUÉFACTION DU CO<sub>2</sub>.



### 1. CONNAITRE SON POTENTIEL

Béatrice estime un potentiel de 4 800 tCO<sub>2</sub>/an liquéfié valorisable.



### 2. DÉFINIR SON RÔLE SOUHAITÉ

La politique de son groupe est de produire un CO<sub>2</sub> départ site, sans en gérer le transport. Béatrice doit donc se rapprocher d'un ou plusieurs acteurs pour gérer la logistique de CO<sub>2</sub>.



### 3. IDENTIFIER LES DÉBOUCHÉS

Béatrice considère les hypothèses suivantes :

- Une montée en régime progressive des ventes. La première année, elle ne considère que 3 600 tCO<sub>2</sub>/an (les débouchés actuellement sécurisés), soit 75% de la capacité ;
- Une installation qui permet de produire dès le départ du CO<sub>2</sub> compatible avec la qualité alimentaire.



### 4. REVOIR LES PARAMÈTRES CLÉS

Béatrice passe en revue les paramètres clés de son projet et notamment :

- Les engagements de reprises du CO<sub>2</sub> sont en cours de discussion / négociation avec son service juridique ;
- Les prix moyens du CO<sub>2</sub> entre 90 et 100 €/t départ discutés semblent compatibles avec son projet ;
- Le prix de l'électricité est un point de vigilance. À 125 €/MWh, Béatrice devra faire attention à la consommation électrique de l'installation.

Sur le volet qualité alimentaire, Béatrice a pris en compte notamment les points suivants :

- L'installation de la liquéfaction devra respecter certaines préconisations techniques, notamment le respect des règlements européens, la présence de deux cuves distinctes, la présence d'un analyseur spécifique pour la qualité alimentaire recherchée ; le risque de contamination par l'huile du compresseur est un point à approfondir ;
- Béatrice sait également que certains polluants minoritaires (alcane, alcools) peuvent être problématiques. Elle a fourni des analyses détaillées de l'offgaz, pour discussion avec des fournisseurs expérimentés, en attendant de voir si des prétraitements dédiés sont nécessaires. (voir le Complément thématique "[Aspects techniques d'une unité de liquéfaction de CO<sub>2</sub>](#)" page 39).

En outre :

- Dès le démarrage de la construction, Béatrice et ses collègues entameront les démarches pour monter le dossier et entrer en contact avec les services de la Direction Départementale de Protection des Populations (DDPP) ;
- Quelques mois après le démarrage, un dossier de certification sera réalisé, avec mise en place d'un système de management de la qualité alimentaire, selon la norme FSSC 22000 ;
- La pureté du CO<sub>2</sub> produit devra être conforme aux exigences de bonnes pratiques (spécifications du CO<sub>2</sub> "EIGA"<sup>9</sup> ou "ISBT"<sup>10</sup>).

Ces points ont fait l'objet de discussions avec le partenaire pressenti pour la commercialisation du CO<sub>2</sub>.

Avec ces précautions et en s'entourant d'un expert de la sécurité alimentaire, Béatrice pense être bien préparée face aux enjeux alimentaires.

## BÉATRICE DÉCIDE DE RÉALISER SON ÉTUDE DE FAISABILITÉ



### RÉALISATION DE SON ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE



Les principaux résultats de l'étude technico-économique sont :

- Un CAPEX total à 1.8 M€, incluant une double cuve de stockage et des analyseurs ;
- Des OPEX à 242 k€, dont 117 k€ d'électricité. L'appartenance à un grand groupe augmente fortement les précautions prises en matière de coûts d'exploitation et de maintenance ;
- Pour atteindre un TRI projet de 11% (Temps de Retour brut de 10 ans), il faut un prix de vente à 103 €/tCO<sub>2</sub>, très proche de la valeur indiquée par les consommateurs potentiels (90 – 100 €/ tCO<sub>2</sub>). Il s'agira de négocier avec l'ensemble des acteurs (fournisseurs, acheteurs, direction) pour finaliser le cadre économique.

L'analyse de ces résultats montre :

- Un fort potentiel d'amélioration en vendant le maximum de la capacité disponible ;
- Une part significative (12% en considérant le réglage de l'épurateur) des revenus considérés provenant de la récupération du biométhane résiduel du gaz d'évent de l'épurateur PSA ; la mise au point de cette voie reste à analyser :
  - avec le fournisseur de l'épurateur afin notamment de déterminer si le matériel est suffisamment dimensionné pour épurer ce débit supplémentaire ;
  - vis-à-vis d'un complément de chaleur à fournir pour le digesteur, s'il n'y a plus de méthane dans les offgaz à brûler dans une chaudière bas Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI).



### VOLET RÈGLEMENTAIRE

Comme pour Albert, Béatrice devra valider les aspects réglementaires.

En complément, pour le volet alimentaire, il sera nécessaire de réaliser une déclaration relative à l'usage alimentaire du CO<sub>2</sub> produit. L'obtention de la certification FSSC 22000 n'est pas obligatoire du point de vue réglementaire, mais est attendue (voire exigée) par les clients.



### SON DOSSIER DE FINANCEMENT

Le dossier de financement sera monté selon les procédures internes. L'analyse des risques réalisée par Béatrice prendra en compte notamment :

- Le risque de retrait du partenaire dans le transport / la commercialisation du CO<sub>2</sub> ;
- Le risque de délai et/ou de surcoût à obtenir la certification FSSC 22000 ; si le processus est classique dans l'industrie alimentaire, il n'est pas répandu pour le CO<sub>2</sub> issu de méthanisation ;
- L'évolution, possiblement à la hausse, des prix de l'électricité et l'impact sur le prix de la tonne vendue.

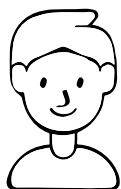


**BÉATRICE  
SE LANCE !**

<sup>9</sup> EIGA : [European Industrial Gases Association](http://www.eiga.eu), représente les vendeurs de gaz. - [www.eiga.eu](http://www.eiga.eu)

<sup>10</sup> ISBT : [International Society of Beverage Technologists](http://www.isbt.com), représente les utilisateurs de boissons. - [www.isbt.com](http://www.isbt.com)

# III | MÉTHANISATION À LA FERME



## CHARLES EXPLOITE UNE UNITÉ DE MÉTHANISATION EN INJECTION DE 135 NM<sup>3</sup>/H ET 55% DE MÉTHANE.

Dans un premier temps, Charles envisage un projet en liquéfaction, ce qui correspondrait à une unité de 185 kgCO<sub>2</sub>/h et 1 500 tCO<sub>2</sub>/an produites. Charles a identifié des débouchés, mais après revue des paramètres clés, le prix du CO<sub>2</sub> livré ne correspond pas au prix acceptable pour le client (> 150 €/tCO<sub>2</sub>).

Par ailleurs, d'autres projets se sont montés dans la région, qui n'est pas spécialement déficitaire en CO<sub>2</sub>. Il y aura donc une forte concurrence pour proposer du CO<sub>2</sub> biogénique sur le marché.

Charles décide alors de ne pas poursuivre dans cette voie, mais ne se laisse pas abattre pour autant et analyse les autres options :

- Il peut commencer par rechercher un partenaire technique et industriel qui s'occuperait de la valorisation du CO<sub>2</sub> pour son propre compte, moyennant une rémunération. Cela semble difficile, mais peut-être qu'un acteur spécialisé pourra dégager des gains de productivité. En faisant cette démarche, Charles prend peu de risques : il met à disposition une partie de son foncier et revend le gaz d'évent de l'épurateur à ce partenaire. C'est ce dernier qui porte alors l'essentiel des risques techniques et de marché pour l'ensemble des étapes (liquéfaction, transport, vente). Charles devra probablement s'engager à fournir les gaz d'évent.
- Une autre solution est de réaliser un projet en valorisation directe de CO<sub>2</sub> :
  - soit pour alimenter une serre chauffée qui viendrait s'installer à proximité et qui serait raccordée par canalisation. Le coût de mise à disposition du CO<sub>2</sub> gazeux étant faible et consommant peu d'électricité, le projet peut avoir du sens si l'installation du maraicher est proche. Charles sait néanmoins qu'il faut prendre en compte les aspects réglementaires sur la nature de la canalisation (voir "[Les usages directs et par canalisation du CO<sub>2</sub> de méthanisation](#)" page 33) et que le biométhane présent dans les offgaz pourra faire l'objet d'un traitement spécifique.
  - Soit dans le cadre d'un projet plus innovant de minéralisation, de méthanation ou autre forme de stockage.
  - Soit en s'appuyant sur les développements dans le domaine des réseaux par canalisation de bioCO<sub>2</sub> / biogaz. Dans cette configuration, plusieurs petits producteurs situés à quelques kilomètres maximums les uns des autres peuvent mutualiser leur bioCO<sub>2</sub> pour réaliser un seul projet, plus important, de liquéfaction et/ou de valorisation.



CHARLES RESTE À L'ÉCOUTE DES OPPORTUNITÉS, CAR IL SAIT QUE LE SUJET DE LA VALORISATION DU CO<sub>2</sub> ÉVOLUE VITE ACTUELLEMENT.

## IV | TÉMOIGNAGE MÉTHATREIL



Située proche de Machecoul, en Pays de la Loire, la SAS MéthaTreil injecte 125 Nm<sup>3</sup>/h de biométhane depuis 2019 et produit depuis septembre 2020 environ 1300 t/an de CO<sub>2</sub> liquéfié avec une pureté supérieure à 99,98%. **C'est le premier projet en France de valorisation de CO<sub>2</sub> issu des offgaz d'un épurateur.**

Le CO<sub>2</sub> issu de l'épuration membranaire est séparé des autres constituants (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>) par un procédé cryogénique (Cryocollect/Verdemobil) et est ensuite stocké dans une citerne verticale de 60 m<sup>3</sup>, avant d'être transporté, par camion-citerne de 20 m<sup>3</sup>, à 15 km du site à destination de serres.

Le CO<sub>2</sub> est stocké à -20°C et 20 bars. Durant les phases de déchargement, la navette est immobilisée. Le chauffeur est salarié de Méthatreil et assure également l'exploitation de la méthanisation (gestion des intrants et surveillance des paramètres).



### ASPECTS FINANCIERS

La SAS Méthatreil a investi 1 M€ dans le procédé de valorisation du CO<sub>2</sub>. Elle a bénéficié de 30% de subvention pour financer ce projet (ADEME, Région, GRDF, GRTGaz).

Pour le transport, Méthatreil a également investi dans une remorque, une cuve mobile avec pompes de transfert intégrées et un camion d'occasion. Il faut ajouter à ces installations la cuve de réception, chez les serristes.



### RETOUR D'EXPÉRIENCE

Après 2 ans de fonctionnement, la SAS Méthatreil est très satisfaite du fonctionnement de l'installation.

À noter cependant que le CO<sub>2</sub> fourni par la méthanisation ne couvre qu'une partie des besoins des serres chauffées (7 000 tCO<sub>2</sub>).



Crédits photos : Agrikomp



## SECTION III

---

# COMPLÉMENTS THÉMATIQUES

Vous avez un projet en tête ? Vous connaissez votre potentiel et avez réfléchi à des débouchés ?

Cette section vous permettra de creuser certains points présentés dans les [8 étapes clés du guide](#) (page 9). Les différents usages du CO<sub>2</sub>, la qualité alimentaire ou encore le transport du CO<sub>2</sub> y sont notamment détaillés.

# I | LES PRINCIPAUX USAGES DU CO<sub>2</sub> LIQUÉFIÉ ISSU DE MÉTHANISATION

Le CO<sub>2</sub> liquéfié trouve de nombreuses applications. Hormis dans les applications industrielles de la chimie, les débouchés sont souvent nombreux et diffus. Les sociétés qui vendent du CO<sub>2</sub> se sont spécialisées dans la fourniture de services, dont le CO<sub>2</sub> en tant que molécule n'est généralement qu'un des éléments. Ainsi, tous les débouchés ne sont pas facilement accessibles pour la méthanisation. Pour le bioCO<sub>2</sub> issu de méthanisation, l'analyse de l'état de l'art fait ressortir les débouchés suivants.



**À  
NOTER**

Sur la base d'informations d'acteurs du secteur et des capacités de production installées, le marché est évalué à environ 500 ktCO<sub>2</sub>/an. Les sources Eurostat indiquent des quantités supérieures (environ 1 MtCO<sub>2</sub>/an), mais qui incluent des ventes entre acteurs et des transformations (carboglance).



## SERRES CHAUFFÉES

Les serres chauffées utilisent le CO<sub>2</sub> pour améliorer la croissance des plantes. Cela concerne en particulier les productions de tomates. En période de chauffe, les maraichers peuvent récupérer le CO<sub>2</sub> sur les fumées de chaudière ou de cogénération gaz.

On note généralement le ratio moyen annuel de 100 à 300 tCO<sub>2</sub>/ha/an, sachant que la consommation de CO<sub>2</sub> liquéfié peut être plus faible, voire nulle, si les prix du CO<sub>2</sub> sont trop élevés. Les serres chauffées sont en particulier fortement présentes à l'Ouest (Bretagne, Pays de la Loire et Sud-Ouest).

## POINTS D'ATTENTION

La demande est saisonnière, particulièrement forte sur les mois de mai à juillet, et faible d'octobre à décembre. Si une qualité alimentaire n'est pas nécessaire, les serres sont sensibles à certains polluants (éthylène, notamment), ce qui peut impliquer la mise en place d'un suivi avec analyseur.

La réduction des consommations de gaz naturel en chaudière dans les serres conduit à augmenter les volumes de CO<sub>2</sub> liquéfié pour ces usages.



## GLACE CARBONIQUE

La glace carbonique est la forme solide du CO<sub>2</sub>, qui existe en dessous de -80°C<sup>11</sup> et dispose de plusieurs utilisations : conservation de produits sensibles (vaccin), nettoyage cryogénique, expérimentation, effets visuels et scéniques.

## POINTS D'ATTENTION

La plupart du temps, une qualité alimentaire est demandée (voir "[Qualité Alimentaire](#)" dans les Compléments thématiques page 35). Selon la localisation du site producteur, et pour un nouveau projet, il pourrait être envisagé de construire une usine de carboglance sur un terrain immédiatement voisin.

<sup>11</sup> -78.5°C à pression ambiante. Le passage de l'état solide à gazeux s'appelle la "sublimation". C'est joli non ?



## INDUSTRIES AGROALIMENTAIRES (HORS BOISSONS)

Le CO<sub>2</sub> est principalement utilisé dans l'industrie agroalimentaire pour permettre la conservation des aliments ou la surgélation.

### POINTS D'ATTENTION

Une qualité "alimentaire" est systématiquement attendue (voir "[Qualité Alimentaire](#)" dans les Compléments thématiques page 35).



## BOISSONS

Les industries de boissons gazeuses (bière, eau gazeuse, soda) sont consommatrices de CO<sub>2</sub>, à hauteur de 4 à 9 gCO<sub>2</sub>/L de boisson, soit des dizaines de milliers de tonnes de CO<sub>2</sub> par an à l'échelle du territoire national.

Les grandes brasseries industrielles sont très souvent équipées d'unité de récupération du CO<sub>2</sub> issu de leur propre procédé, ce qui n'est pas le cas des brasseries artisanales, qui consommeront cependant de petites quantités.

Le CO<sub>2</sub> peut être également utilisé pour la production de vin, mais dans des quantités faibles (avec la possibilité pour les producteurs de vin de récupérer leur CO<sub>2</sub> issu durant la fermentation alcoolique).

### POINTS D'ATTENTION

L'industrie de la boisson est particulièrement exigeante sur la qualité du CO<sub>2</sub> et dispose d'un référentiel propre ISBT<sup>12</sup>.



## ABATTOIRS

Certains abattoirs utilisent des méthodes d'étourdissements avec du CO<sub>2</sub> (typiquement 300 à 350 gCO<sub>2</sub>/porc), possiblement en mélange à 85%.

### POINTS D'ATTENTION

La réalisation d'essais peut être un préalable à l'utilisation du CO<sub>2</sub> de méthanisation pour ces pratiques. La qualité alimentaire peut également être demandée.



## MINÉRALISATION

La minéralisation du CO<sub>2</sub> regroupe un ensemble de technologies émergentes visant à piéger le CO<sub>2</sub> sous une forme chimiquement stable.

Les principaux procédés sont :

- L'utilisation pour le curage du béton : le CO<sub>2</sub> injecté sert à améliorer le durcissement et le séchage des bétons (typiquement 1 kgCO<sub>2</sub> pour 1m<sup>3</sup> de béton) ;
- L'utilisation pour la carbonatation des déchets de béton recyclés. Les restes de pâtes de ciment réagissent pour former du carbonate de calcium. Cela permet de stocker 50 kgCO<sub>2</sub>/t déchets de béton (soit 1 000 tCO<sub>2</sub>/an pour une plateforme de 20 000 t de déchets de béton).

Le caractère biogénique du bioCO<sub>2</sub> de méthanisation sera apprécié pour ces filières.

### POINTS D'ATTENTION

Ces technologies ne sont pas généralisées à ce jour : il s'agit d'initiatives innovantes dont la pérennité n'est pas assurée.

<sup>12</sup> ISBT : [International Society of Beverage Technologists](http://www.isbt.com), représente les utilisateurs de boissons. - [www.isbt.com](http://www.isbt.com)



## ET LES AUTRES DÉBOUCHÉS ?

Cette présentation n'est pas exhaustive. Il existe d'autres utilisations du CO<sub>2</sub> qui peuvent être pertinentes. Chaque porteur doit constituer son évaluation des débouchés en fonction des paramètres de son projet (et de son environnement local).

Synthèse sur les principaux débouchés pour le bioCO<sub>2</sub> issu de méthanisation

| Utilisation                                                                                                    | Qualité                  | Quantité type<br>(pour 1 site conso.)                                          | Remarques                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Serres                        | Surveillée <sup>13</sup> | 500 – 2 000 tCO <sub>2</sub> /an                                               | Variabilité saisonnière, coopérative pour grouper les besoins |
| Glace carbonique              | Alimentaire / Surveillée | 100 à 3 000 tCO <sub>2</sub> /an                                               |                                                               |
| Industries agro-alimentaires  | Alimentaire              | Dès 50 t/an, jusqu'à plusieurs centaines/an                                    |                                                               |
| Boissons                     | Alimentaire              | Variable                                                                       | Très sensible à la qualité                                    |
| Abattoirs                   | Alimentaire / Surveillée | 100 – 2 000 tCO <sub>2</sub> /an                                               |                                                               |
| Minéralisation              | Non sensible             | Curage : 10-100 tCO <sub>2</sub> /an<br>Aggrégats : 1 000 tCO <sub>2</sub> /an | Intérêt pour bioCO <sub>2</sub>                               |

<sup>13</sup> Voir "[points d'attention](#)" des serres chauffées, page 28

## II | INTÉRÊTS ET ATTENTES DES CONSOMMATEURS DE CO<sub>2</sub>

### QUEL EST L'INTÉRÊT, POUR LES CONSOMMATEURS, D'AVOIR RECOURS À DU BIOCO<sub>2</sub> ISSU DE MÉTHANISATION ?

Vous êtes un consommateur de CO<sub>2</sub> et vous interrogez sur la possibilité d'avoir recours à du bioCO<sub>2</sub> pour votre usage ?

La fourniture de bioCO<sub>2</sub> issu de méthanisation sera optimale pour vous dans les cas suivants :

- votre consommation de CO<sub>2</sub> est régulière, typiquement de quelques centaines à quelques milliers de tonnes par an ;
- vous souhaitez avoir un prix stable ;
- vous désirez maîtriser vos approvisionnements, en travaillant avec des acteurs de proximité
- vous voulez éviter de faire rouler des camions qui viennent de très loin ;
- vous avez la volonté de mettre en valeur les filières locales et l'économie circulaire.

### LE PRIX EST-IL COMPÉTITIF ?

Le CO<sub>2</sub> issu des unités de production d'ammoniac ou d'hydrogène est un CO<sub>2</sub> d'origine fossile, produit en grande quantité et soumis à la "taxe carbone". L'augmentation de celle-ci et des prix de l'énergie influe donc sur le prix du CO<sub>2</sub>.

Il est possible en revanche d'être approvisionné en bioCO<sub>2</sub> livré dès 100 €/tCO<sub>2</sub>, et plus généralement entre 120 et 150 €/tCO<sub>2</sub>.

### COMMENT PROCÉDER ?

- Identifier les sources de bioCO<sub>2</sub> : sur la page "[Points d'injection de Biométhane en France en service](http://www.odre.opendatasoft.com)" (onglet "Carte") du site [www.odre.opendatasoft.com](http://www.odre.opendatasoft.com) vous pourrez localiser l'unité de biométhane la plus proche de votre site. Vous pouvez aussi échanger avec les interlocuteurs nationaux (CTBM, GRDF) ou locaux (chambres d'agriculture, associations d'acteurs de la méthanisation).
- Entrez en contact avec les exploitants de biométhane en précisant votre besoin :
  - Quelle est la quantité souhaitée ?
  - Quelle est la qualité envisagée ? (Alimentaire ? Selon quel référentiel ?)
  - Quel est le niveau de prix souhaité ?



#### POUR ALLER PLUS LOIN

Pourquoi ne pas participer au projet, par exemple en investissant dans les moyens de production ou de transport ? Vous pouvez aussi fédérer un petit groupe d'utilisateurs et bénéficier des avantages du bioCO<sub>2</sub> à l'échelle du territoire.

## POUR UN PRODUCTEUR, CONNAÎTRE ET RÉPONDRE AUX ATTENTES DES CONSOMMATEURS

Dans le cadre de plusieurs études menées par la filière, les consommateurs de CO<sub>2</sub> qui seraient susceptibles d'acheter du bioCO<sub>2</sub> issu de méthanisation ont exprimé les attentes suivantes :

- La fiabilité d'approvisionnement : c'est une des raisons évoquées pour changer d'interlocuteur et se tourner vers le bioCO<sub>2</sub> de méthanisation ;
- Un prix cohérent avec le prix du marché ;
- La réactivité du fournisseur ;
- Le bon niveau de service avec une fourniture clé en main ;
- La qualité du CO<sub>2</sub> est souvent de type alimentaire, mais les points clés de composition, traçabilité, etc. peuvent être différents d'un client à l'autre ;
- L'aspect local et circulaire peut avoir un intérêt environnemental.



**À  
NOTER**

L'origine biogénique du CO<sub>2</sub> va être valorisée de manière très différente selon les consommateurs : les projets de e-fuel, e-méthane et minéralisation seront très attentifs à ce caractère (qui impacte directement la valeur du produit fabriqué à partir de CO<sub>2</sub>).

Concernant la sensibilité à la qualité (composition) du CO<sub>2</sub>, il existe différents référentiels et notamment :

- Les utilisations alimentaires directes ou indirectes (contrôle du PH des eaux potables, carboglace pour application alimentaire) ;
- Les extincteurs (norme propre) ;
- Les serres (présence de phytohormone à éviter) ; de nombreuses serres utilisent toutefois du CO<sub>2</sub> issu de la combustion de gaz en chaudière, ou après catalyseur, de moteur gaz.

Au démarrage de la valorisation de bioCO<sub>2</sub> de méthanisation, certaines unités pourraient fonctionner selon un mode dit "épicerie" ce qui permet de gommer les effets de saisonnalité. Ce mode de fonctionnement qui consiste à approvisionner en "back-up" sans avoir à s'engager sur les pics de consommations permet de charger l'unité au mieux. Sur le moyen long terme cependant, ce mode de fonctionnement pourrait ne pas être représentatif d'un développement de la filière.



# III | LES USAGES DIRECTS ET PAR CANALISATION DU CO<sub>2</sub> DE MÉTHANISATION

Il est possible d'envisager la valorisation sans liquéfaction sur site des offgaz d'épuration (riche en CO<sub>2</sub>). Cette voie prometteuse, qui nécessite néanmoins des aménagements réglementaires (en cours), peut permettre d'atteindre plusieurs types d'objectifs :

- permettre le raccordement de sources proches (quelques kilomètres) en vue de la mise en place d'une unité de liquéfaction de taille plus importante et la mutualisation des coûts de liquéfaction (CAPEX & OPEX) ;
- Distribuer du CO<sub>2</sub> sous forme gazeuse à des consommateurs situés à proximité. Une purification supplémentaire peut s'avérer nécessaire dans certains cas.

## LES PRINCIPAUX USAGES CONCERNÉS

- **Les serres** : la consommation de CO<sub>2</sub> n'est pas constante dans la journée (typiquement de 50 à 150kg/h/an, pendant 5h – 8h/jour<sup>14</sup>) et un stockage peut être nécessaire. Des précautions sur les composés présents (éthylène, méthane) de l'offgaz sont à prévoir, avec une vigilance plus grande que pour le CO<sub>2</sub> liquéfié. Une purification est à étudier. À titre indicatif, une serre de 10ha représente environ 500 k€ d'investissement pour le maraîcher.
- **Les cultures d'algues** : les consommations à l'hectare sont similaires aux serres (environ 200 t/ha/an), mais avec peu de surface de cultures (typiquement 1 000 m<sup>2</sup> pour la culture de spiruline), soit 20 t/an par exploitation. Des développements sont en cours pour cette filière.
- **La production de bicarbonate** : dans un réacteur dédié, on peut produire du bicarbonate de sodium (NaHCO<sub>3</sub> ou bicar) à partir de CO<sub>2</sub> et de soude (NaOH). 1 t de CO<sub>2</sub> produit 2 t de bicarbonate. Le bicarbonate est utilisé dans de nombreux procédés, dont le traitement des fumées des incinérateurs (1 t bicar pour 100 tonnes de déchets). L'équilibre économique est lié au prix de marché du bicar par rapport à la soude (et peut être négatif). Exemple de projets : alimentation en bicarbonate de 2 incinérateurs représentant 100 000 tonnes de déchets (totaux) par an, soit un besoin de 1 000 tCO<sub>2</sub>/an de bicar, correspondant à une consommation de 500 tCO<sub>2</sub>/an.
- **La méthanation** : la méthanation du CO<sub>2</sub> par ajout d'hydrogène (H<sub>2</sub>) permet la production d'un méthane de synthèse très proche du biométhane. Cette voie technologique est soutenue par la filière, mais des conditions économiques favorables (hydrogène ou électricité très compétitifs) sont nécessaires. Le potentiel de déploiement est important à l'horizon 2050<sup>15</sup>.  
50 Nm<sup>3</sup>/h de CO<sub>2</sub> permettent la production de 50 Nm<sup>3</sup>/h de e-méthane. La valorisation du CO<sub>2</sub> d'une unité de 150 Nm<sup>3</sup>/h de biométhane (environ 1 800 tCO<sub>2</sub> gazeux/an) permet la production de 120 Nm<sup>3</sup>/h de e-méthane, en consommant l'hydrogène produit par un électrolyseur de 2 MWe).

<sup>14</sup> 100kg/h/an x 6h/jour x 365jours/an = ~219 t/ha/an

<sup>15</sup> Source ADEME, trajectoires 2050

- **La minéralisation** (carbonatation d'agrégats) : l'introduction des offgaz riches en  $\text{CO}_2$  dans un réacteur comprenant des déchets de béton concassés donne lieu à la carbonatation de ceux-ci. Environ 50 kg de  $\text{CO}_2$  sont piégeables par tonne de déchets de béton, mais le taux de capture peut être faible si les offgaz passent en continu sur les granulats (beaucoup de  $\text{CO}_2$  n'est pas capturé et repart à l'atmosphère). Cette voie est également prometteuse et en devenir.
- **Le regroupement d'exploitations** : les effets d'échelle sur les unités de liquéfaction (équipements et analyseurs) peuvent jouer en faveur du développement de réseaux bio $\text{CO}_2$  (ou de biogaz) par des canalisations, afin d'atteindre une taille critique.

## TRANSPORT PAR CANALISATION

Pour un usage direct du bio $\text{CO}_2$  de méthanisation à courte distance (typiquement quelques kilomètres), on peut envisager un transport par canalisation. L'installation comportera les éléments suivants :

- Un stockage tampon, typiquement sous la forme d'un gazomètre ;
- Un réseau de canalisation ;
- Un surpresseur ;
- Un système de contrôle et de régulation.

Pour un passage hors du domaine privé, la réglementation actuelle impose des contraintes similaires à celles applicables aux réseaux de transport gaz naturel (dont l'utilisation de canalisation acier), rendant les projets de canalisations de  $\text{CO}_2$  onéreux. La filière biogaz a constitué un groupe de travail pour proposer aux services des ministères concernés des conditions plus adaptées, dont l'utilisation de canalisation en Polyéthylène (PE). L'ATEE porte aujourd'hui la réalisation de ce référentiel qui sera soumis à la DGPR (voir [Glossaire](#) page 53) fin 2023. Il semble compliqué d'envisager des canalisations  $\text{CO}_2$  en PE d'ici là.

- Canalisation en PE : 80 - 120 €/m linéaire posé (hors contraintes spécifiques)
- Surpresseur : investissement de 5 000 € – 7 500 € pour 100 – 200 kg $\text{CO}_2$ /h
- Gazomètre 25 mbar : Capacité de 0,5 t $\text{CO}_2$  : 100 k€, capacité de 1,5 t $\text{CO}_2$  : 200 k€

## POINTS D'ATTENTION

Pour les courtes distances et/ou les petites capacités, la valorisation directe du bio $\text{CO}_2$  (sans liquéfaction) peut permettre des économies importantes de CAPEX et d'OPEX. Cependant, plusieurs points de vigilance sont à garder en tête :

- La présence de méthane dans le bio $\text{CO}_2$  peut représenter un obstacle (prise en compte de la réglementation ATEX, impact environnemental et qualité). Il existe des dispositifs de destruction ;
- La valorisation directe ne permet pas la récupération du biométhane des offgaz (sauf dans le cas de la méthanation) ;
- Un stockage peut être nécessaire pour l'équilibre économique du projet, mais également pour des raisons techniques et de régulation ;
- Beaucoup de filières de valorisation sont encore à un niveau de développement faible, pour des raisons de marché et/ou pour des raisons technologiques.

## IV | QUALITÉ ALIMENTAIRE

Beaucoup de clients indiquent souhaiter un "CO<sub>2</sub> de qualité alimentaire" et il s'agit d'un sujet complexe, pouvant générer de nombreuses confusions. Qu'en est-il ?

### QU'EST-CE QUE LA QUALITÉ ALIMENTAIRE ?

La notion de qualité alimentaire regroupe plusieurs aspects.

D'une part, le volet **règlementaire, obligatoire**, incluant notamment :

- Le respect des règlements européens (CE), et notamment le règlement 1333/2008 additifs (CO<sub>2</sub>=E290) et les spécifications additionnelles mentionnées au Règlement CE 231/2012 ;
- La déclaration aux autorités compétentes (service de la DDPP ou DDCSPP) et la constitution d'un dossier, incluant notamment :
  - Le respect des programmes prérequis en matière de bonnes pratiques alimentaires ;
  - Un plan HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point), soit, en français, un "système d'analyse des dangers et points critiques pour leur maîtrise" ; il s'agit d'une méthode d'analyse de risque particulièrement utilisée en sécurité alimentaire ;
  - La traçabilité et la maîtrise des non-conformités.

Le respect du volet réglementaire est, par nature, obligatoire. Le non-respect des normes d'hygiène et de sécurité alimentaire peut entraîner de graves sanctions pour l'entreprise et ses dirigeants.

D'autre part, ce qui peut être attendu des clients, est la mise en place d'un système de **management de la qualité alimentaire**, avec certification par un tiers. **C'est le volet contractuel**, qui n'est pas obligatoire, mais souvent demandé.

Parmi les exigences spécifiques, les clients peuvent attendre une qualité du CO<sub>2</sub> conforme au référentiel EIGA.

En matière de systèmes de management de la qualité, on citera le référentiel FSSC 22000, l'un des plus reconnus.

Ces attentes contractuelles peuvent nécessiter, entre autres, la mise en place d'analyseurs onéreux.



**À  
NOTER**

La co-existence d'usages alimentaires et non alimentaires posera un problème pour les transporteurs. Actuellement, par défaut, les acteurs choisissent de n'avoir qu'une seule qualité (la qualité alimentaire) pour simplifier les chaînes logistiques.

### QUELLE QUALITÉ ALIMENTAIRE POUR MON PROJET ?

Tout dépend des attentes des consommateurs identifiés et des exigences qu'ils s'imposent. On veillera également à ce que les citernes de transport soient compatibles avec la qualité du CO<sub>2</sub> transporté.

Il est recommandé de s'assurer que le projet a la capacité d'évoluer vers une qualité alimentaire si les besoins du marché le nécessitent ultérieurement.

## EST-IL "FACILE" DE PRODUIRE DU CO<sub>2</sub> DE QUALITÉ ALIMENTAIRE ISSU DE MÉTHANISATION ? QUELLES SONT LES BARRIÈRES ?

Il manque encore du recul sur la production de CO<sub>2</sub> alimentaire issu de méthanisation en France. Il existe des projets de ce type en Europe (au Royaume-Uni depuis 2016 notamment), mais sur des cultures végétales dites "énergétiques" qui n'entrent pas dans la catégorie "déchets" et avec peu de variabilité d'intrants.

Les principales barrières sont les suivantes :

- malgré la qualité a priori compatible du bioCO<sub>2</sub>, il n'existe pas (à notre connaissance, à la date de rédaction du guide) de projets en France d'usage direct de ce bioCO<sub>2</sub> dans l'alimentation (ex. : boisson gazeuse) qui pourraient servir de référence ;
- certains opérateurs ont exprimé des réserves sur les contaminants possibles ; au niveau des analyseurs, on ne trouve que ce que l'on cherche ; dès lors, comment s'assurer que des composants que l'on n'a pas encore identifiés comme nocifs ne seront pas un jour présents ?
- le modèle français de méthanisation (effluents, possibilité de traiter des déchets hygiénisés) ne facilite pas la réponse à cette question ;
- à date, l'EIGA<sup>16</sup> ne s'est pas positionnée spécifiquement en faveur de ces projets ; la recommandation de "refaire une analyse de risques à chaque changement des intrants"<sup>17</sup> est difficilement applicable à la plupart des unités de méthanisation en France ; de même, le choix d'un périmètre incluant le digesteur (et pas uniquement l'épurateur) complique les projets de CO<sub>2</sub> alimentaire.

Les principaux points d'opportunité sont les suivants :

- le bioCO<sub>2</sub> issu d'un épurateur... est déjà bien épuré et sous forme gazeuse. Il subit dans le liquéfacteur une deuxième épuration, avec les étapes de compression, passage au charbon actif et liquéfaction sélective, ce qui en fait un produit très pur et réduit les risques de contamination alimentaire (bactéries, etc.). Les craintes d'avoir des débris (verre, acier notamment) sont également particulièrement faibles ;
- des essais réalisés à l'étranger sur la purification du bioCO<sub>2</sub> issu de méthanisation de fraction **fermentescible d'ordure ménagère** (par exemple en Italie sur le site de Montello<sup>18</sup>) ont montré que les contaminants (de type bactérie, polluants, etc..) étaient bien inférieurs aux seuils de dangerosité.

## COMMENT ABORDER UN PROJET DE PRODUCTION DE CO<sub>2</sub> DE QUALITÉ ALIMENTAIRE ?

Voici quelques recommandations aux porteurs de projets :

- il est nécessaire de bien **réfléchir aux impacts** (coûts, délais, charge de travail) de ce type de projet. Certes, il y a plus de débouchés et le prix vendu du CO<sub>2</sub> est plus élevé, mais c'est un sujet complexe. À noter qu'il y a peu / pas de projet en cours en France pour le CO<sub>2</sub> issu de méthanisation, ce qui peut entraîner des délais dans l'appréciation des projets par l'administration ;
- **Il faut se faire accompagner** : toutes les entreprises qui fournissent des denrées alimentaires doivent réaliser de telles démarches et il existe un écosystème facilement accessible (conseils, experts) dans le domaine de la sécurité alimentaire ;
- Il est important de **comprendre les attentes réelles des clients envisagés** (actuels et futurs) en matière de qualité alimentaire, en échangeant longuement avec eux. Une certification type FSSC 22000 est-elle nécessaire ? Quelle est la pureté du CO<sub>2</sub> attendu ?

<sup>16</sup> Voir [DOC 70 / 17 - Carbon Dioxide Food and Beverages Grade, Source Qualification, Quality Standards and Verification](#) - [www.eiga.eu](http://www.eiga.eu)

<sup>17</sup> 5.1.3.2 Biogas (methane) carbon dioxide sources (Anaerobic digestion) : "Any change of feedstock will require approval and revision of the risk assessment" (page 6 [DOC 70 / 17](#) - [www.eiga.eu](http://www.eiga.eu))

<sup>18</sup> Esposito et al., [Simultaneous production of biomethane and food grade CO<sub>2</sub> from biogas: an industrial case study](#), 2019 - [www.pubs.rsc.org](http://www.pubs.rsc.org)

- Lors de la conception, il faut spécifier une unité de liquéfaction compatible avec la qualité alimentaire et en particulier, veiller au respect des règlements CE applicables (voir les [règlements spécifiques](#), page 56) :
  - aux matériaux au contact des denrées alimentaires (1935/2004) ;
  - aux matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires (10/2011).

Le règlement (CE) n°1935/2004 (ou "règlement cadre") du Parlement européen et du Conseil du 27 octobre 2004 définit les exigences générales qui s'appliquent aux matériaux et objets destinés à entrer en contact directement ou indirectement avec les denrées, produits et boissons alimentaires mis sur le marché<sup>19</sup>.

## V | BIOCO<sub>2</sub> DE MÉTHANISATION ET IMPACT CARBONE

La notion de "CO<sub>2</sub> biogénique" est intimement liée à la notion d'émissions de gaz à effet de serre et permet de différencier les différents "parcours" du CO<sub>2</sub>.

| Biogénique                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Fossile                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Le CO<sub>2</sub> biogénique est formé à partir de carbone présent dans l'atmosphère et fixé par les plantes ou les organismes vivants.</p> <p>La biomasse se comporte comme un grand aspirateur à CO<sub>2</sub>.<br/>Émettre du CO<sub>2</sub> biogénique ne contribue que marginalement à l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère : c'est la part nécessaire au traitement de la biomasse, à la capture, au conditionnement et à la logistique du CO<sub>2</sub> avant ré-émission.</p> <p>Pour aller plus loin, on peut piéger* du CO<sub>2</sub> biogénique. Cela peut permettre de réduire la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.</p> | <p>Le CO<sub>2</sub> fossile est formé à partir de carbone présent dans le sol, issu de la décomposition d'organismes vivants il y a des millions d'années.</p> <p>En émettant du CO<sub>2</sub> fossile (par exemple par combustion de pétrole ou de charbon), on déplace du carbone présent dans le sol vers l'atmosphère, augmentant la concentration de CO<sub>2</sub>.</p> <p>On peut aussi piéger du CO<sub>2</sub> fossile pour éviter qu'il ne soit émis dans l'atmosphère.</p> |

\*On parle aussi de séquestration du CO<sub>2</sub>

Une analyse de cycle de vie permet de prendre en compte l'ensemble des flux de carbone, d'énergie, de ressources sur un périmètre donné. L'utilisation faite du CO<sub>2</sub> compte, mais c'est principalement l'origine et la destination qui vont permettre de comparer les procédés.

<sup>19</sup> La lubrification à l'huile peut être un point de vigilance pour la qualité alimentaire

On peut schématiser les différents cas de figure dans le tableau suivant :

|             |                                            | Origine                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             |                                            | Biogénique<br>(Atmosphère)                                                                                                                                                                                                                                                                  | Fossile<br>(Sous-Sol)                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Destination | Atmosphère<br>(usage «non séquestrant»)    | <p>1 / Le CO<sub>2</sub> retourne à l'atmosphère, mais il y a quelques émissions pour le traitement de la biomasse. Le bilan est faible mais pas nul.</p> <p>Exemple : consommation de bioCO<sub>2</sub> dans les serres</p>                                                                | <p>2/ Les émissions de CO<sub>2</sub> fossile font augmenter la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.</p> <p>Exemple : utilisation de CO<sub>2</sub> issu de la combustion de ressources fossiles pour les boissons gazeuses</p>                                                           |
|             | Sous-sol ou piégé<br>(usage «séquestrant») | <p>3/ Globalement, on a extrait du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère (même si un peu de carbone a été émis pour cette action). On parle de Carbon Direct Removal ou d'émissions négatives. C'est un procédé très vertueux.</p> <p>Exemple : la minéralisation de CO<sub>2</sub> biogénique</p> | <p>4/ On parle de CCS (Carbon Capture et Storage). Ce procédé permet de réduire très fortement les émissions de CO<sub>2</sub>, sans les annuler complètement. Globalement, on a émis un peu de CO<sub>2</sub> pour l'ensemble du traitement et de la logistique. Le bilan est faible mais pas nul.</p> |

Ainsi, l'utilisation de CO<sub>2</sub> biogénique en remplacement de CO<sub>2</sub> fossile a un impact globalement vertueux sur les émissions à effet de serre.

- Valoriser du CO<sub>2</sub> biogénique, c'est réduire les émissions de gaz à effet de serre dès lors qu'il remplace une quantité équivalente de CO<sub>2</sub> d'origine fossile qui n'est plus émise à l'atmosphère ;
- Valoriser du CO<sub>2</sub> biogénique de méthanisation, c'est aussi bien souvent réduire le transport du CO<sub>2</sub> ;
- Si le CO<sub>2</sub> biogénique est utilisé puis ré-émis (par exemple en ouvrant une boisson gazeuse ou en contrôlant le pH d'une station d'épuration), seules les émissions de traitement (énergie, transport, conditionnement) auront un impact sur les changements climatiques ; un impact non nul, mais faible ;
- Si le CO<sub>2</sub> biogénique est piégé (par exemple en minéralisation ou en séquestration), alors il contribue à réduire le stock de carbone atmosphérique ; il peut alors être extrêmement vertueux du point de vue de son impact sur le climat, si toutefois les émissions de traitement (énergie, transport, conditionnement) demeurent maîtrisées.



**BON À  
SAVOIR &  
POUR ALLER  
PLUS LOIN**

Le soutien public aux projets (ADEME, Régions) est souvent conditionné à des valorisations permettant une séquestration à moyen-long terme du carbone. Cela correspond à des usages peu matures pour l'instant. Les débouchés actuels du CO<sub>2</sub> issu de méthanisation (serre, carboglace, etc.) ne constituent pas un usage séquestrant. Une Analyse de Cycle de Vie peut être nécessaire pour bénéficier de financement public.

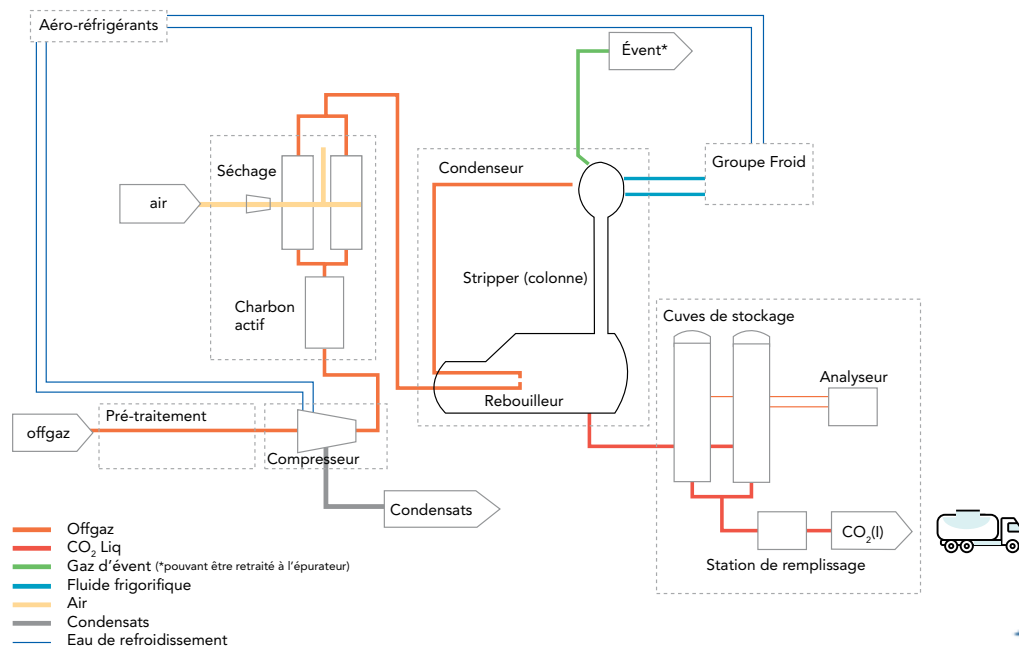
Pour aller plus loin : "Étude ADEME Valorisation du CO<sub>2</sub> Quels bénéfices ? Sous quelles conditions ?" - La librairie ADEME<sup>20</sup>

<sup>20</sup> "Étude ADEME Valorisation du CO<sub>2</sub> Quels bénéfices ? Sous quelles conditions ?" - [www.librairie.ademe.fr](http://www.librairie.ademe.fr)

# VI | ASPECTS TECHNIQUES D'UNE UNITÉ DE LIQUÉFACTION DE CO<sub>2</sub>

L'objectif d'une unité de liquéfaction de CO<sub>2</sub> est double : produire un CO<sub>2</sub> de grande pureté (avec une concentration > 99 %vol CO<sub>2</sub>) et rendre le CO<sub>2</sub> à l'état liquide pour faciliter son transport ( 1t de CO<sub>2</sub> gazeux prend 1 000 fois plus de place qu'1t de CO<sub>2</sub> liquide).

Schéma représentant les étapes successives d'une unité de liquéfaction de CO<sub>2</sub>



Une unité de liquéfaction de CO<sub>2</sub> réalise les fonctions successives suivantes :

- **Compression** : les gaz d'évent (offgaz) issus de l'épurateur et riches en CO<sub>2</sub> sont comprimés jusqu'à environ 20bar.  
Les compresseurs peuvent être de type piston sec ou à l'huile. Certains acteurs proposent des compresseurs lubrifiés<sup>21</sup>. C'est l'un des deux principaux postes consommateurs d'électricité.
- **Purification** : ensuite, les gaz comprimés passent par une étape de purification optionnelle (sur charbon actif) selon l'analyse des offgaz.
- **Séchage** : on élimine toute trace d'eau.
- **Liquéfaction** : les gaz entrent dans le rebouilleur. C'est un échangeur de chaleur qui mêle d'un côté des offgaz comprimés, chauds (à refroidir) et de l'autre un volume de CO<sub>2</sub> liquéfié froid (à faire "bouillir" à basse température). Les offgaz gazeux ainsi refroidis entrent dans un échangeur : "le condenseur". Exposé à des températures froides (< - 20°C), le CO<sub>2</sub> sous pression va se liquéfier, mais les autres gaz présents (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) vont rester gazeux et s'échapper par l'évent.

<sup>21</sup> La lubrification à l'huile peut être un point de vigilance pour la qualité alimentaire

Le CO<sub>2</sub> liquéfié descend par gravité le long de la colonne. En bas, dans le volume du rebouilleur, un peu de CO<sub>2</sub> revaporisé remonte le long de la colonne. Cela a pour effet d'améliorer la purification du CO<sub>2</sub>.

Au fond du rebouilleur, le CO<sub>2</sub> liquide, froid (environ -20°C), sous pression (environ 20bar) est purifié.

- **Groupe froid** : un groupe froid est nécessaire pour fournir la température (<-25°C) dans le condenseur. Différentes technologies existent (groupe froid au CO<sub>2</sub>, aux alcanes, à l'ammoniac, au réfrigérant industriel). On veillera à ce que le fluide de travail ne soit pas visé par la réglementation F-gas<sup>22</sup>.
- **Cuve de stockage et station de remplissage** : une fois le CO<sub>2</sub> produit, il est stocké avant d'être chargé dans un camion de transport.
- **Prétraitement** : certains composés (alcool, alcanes) même en très faibles quantités peuvent nécessiter des prétraitements (lavage à l'eau par exemple) pour obtenir une qualité alimentaire.
- **Recyclage des gaz d'évent** : à l'évent du liquéfacteur, le mélange gazeux comprenant majoritairement du biométhane et du CO<sub>2</sub>, peut être recyclé en amont de l'épurateur, afin de réduire les pertes de biométhane et d'augmenter le rendement carbone. C'est un gain économique et environnemental à rechercher, sous réserve du dimensionnement adéquat de l'épurateur (qui verra une augmentation des débits traités).

## QUELS SONT LES POINTS DE VIGILANCES DANS LE CADRE D'UNE CONSULTATION DE LIQUÉFACTEUR ?

- Les performances sont clés : avant de passer commande, il faut demander au fournisseur de réaliser un tableau de performance (attendues et garanties) de l'installation qu'il propose et les conditions de référence. Cela comprend notamment :
  - la qualité du CO<sub>2</sub> produit (typiquement 99,9%) ;
  - Le rendement carbone ;
  - La consommation d'électricité de l'installation (recommandée autour de 0,26 et 0,28 MWh/tCO<sub>2</sub>) ;
  - La capacité maximum (et minimum) de traitement (en kgCO<sub>2</sub>/h).
- Il est également souhaitable de définir la plage de fonctionnement (débit d'offgaz min/max et teneur en CO<sub>2</sub> min/max) ;
- Pour une qualité alimentaire, il est nécessaire de faire valider le projet sur la base d'une analyse d'offgaz et mettre en place le cas échéant des étapes de prétraitement. Celles-ci peuvent augmenter les CAPEX, de 10 à 15% parfois.

Certains points de vigilance permettent de comparer les offres :

- Est-ce que l'installation nécessite un bâtiment ?
- Quel est le type de compresseur installé ?
- Quel est le fluide de travail utilisé dans le groupe froid ?

Enfin, l'installation doit respecter les normes en vigueur :

- L'ensemble des règlements CE applicables, dont la Directive des Équipements Sous pression DESP (Pression), CEM (compatibilité électromagnétique), Machine (directive Machine) ;
- Pour la qualité alimentaire, les [règlements spécifiques](#) (page 56).

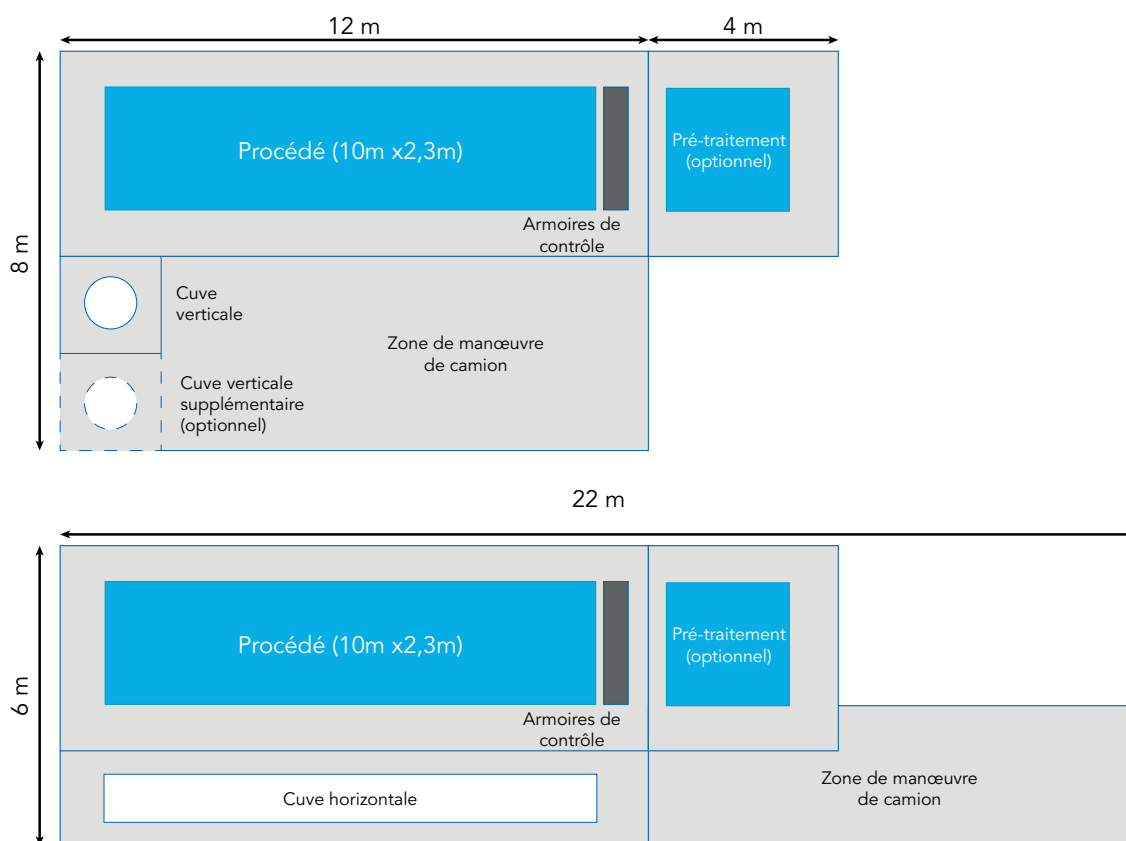
<sup>22</sup> La réglementation F-gas vise à bannir les fluides réfrigérants à haut pouvoir effet de serre (comme par exemple le R134a). Elle induit un bannissement progressif des fluides (jusqu'à 2030).

## QUELLE EST LA SURFACE OCCUPÉE PAR UNE UNITÉ DE LIQUÉFACTION DU CO<sub>2</sub>?

Souvent autour de 100 – 150 m<sup>2</sup>. Il faut :

- Prévoir de la place pour les équipements process : soit typiquement un conteneur de 2,5m x 10m et un espace pour circuler autour et réaliser les opérations de maintenance ;
- Penser aux équipements électriques et de raccordement ;
- Prendre en compte la (ou les) cuve(s) de stockage : verticales (1,5m x 1,5m) ou horizontale (2 x 10m) ;
- Et enfin, prévoir des voiries pour la circulation des camions.

Exemple d'emprise au sol pour un projet de 400 kgCO<sub>2</sub>/h



### POINTS D'ATTENTION

En particulier dans le cas d'un projet visant une qualité alimentaire du CO<sub>2</sub>, il est recommandé de fournir une analyse des offgaz (ou si possible plusieurs analyses) pour pouvoir vérifier la nécessité ou l'absence de nécessité de certains prétraitements (lavage pour éliminer des alcools ou des alcanes en très faible quantité par exemple).

### SYNERGIES EN VUE DE LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE BIOMÉTHANE

L'arrêté<sup>23</sup> du 17 juin 2021 stipule, à l'article 47 bis que "Les systèmes d'épuration du biogaz en biométhane sont conçus, exploités, entretenus et vérifiés afin de limiter l'émission du méthane dans les gaz d'effluents...". Dans le cas d'un projet de liquéfaction, la fraction de méthane résiduelle dans les offgaz peut être recyclée de manière pertinente dans l'épurateur et permettre de mieux aborder les dispositions réglementaires.

<sup>23</sup> Voir références

## SYNERGIES LIÉES À LA RÉALISATION D'UNITÉ MÉTHANISATION + LIQUÉFACTION

Dans le cas de projets neufs méthanisation en injection + liquéfaction, il peut exister des synergies pertinentes, dont notamment :

- Dimensionnement optimal de l'ensemble du procédé intégrant la recirculation des gaz d'évent du liquéfacteur, de manière à maximiser le rendement carbone et réduire au maximum les fuites de méthane
- Optimisation du nombre d'étages de séparation de l'épurateur (réduisant investissement et/ou consommation)
- Optimisation des armoires électriques et des coûts de raccordement
- Optimisation thermique, par récupération de chaleur sur les compresseurs du liquéfacteur

Cette liste non exhaustive pourra être étudiée en détail lors des études technico-économiques.

## VII | ASPECTS ÉCONOMIQUES D'UN PROJET DE VALORISATION DE BIOCO<sub>2</sub> ISSU DE MÉTHANISATION



**À  
NOTER**

Les aspects économiques ont été évalués sur la base d'une analyse détaillée de projets ayant été présentés sur la période 2020-2021. Les données suivantes pourront donc être obsolètes par rapport au contexte d'inflation des prix de matériaux, services et énergie connus à la date de rédaction du guide. Il appartient aux porteurs de projets de vérifier la mise à jour de ces valeurs dans le contexte de leurs projets.

Nous nous inscrivons ici dans le cadre d'un projet de liquéfaction.

### LES MONTANTS D'INVESTISSEMENT (CAPEX)

Ils incluent la fourniture de l'équipement de liquéfaction et des services (ingénierie, montage, mise en service), les cuves de CO<sub>2</sub> et la station de remplissage de camion, les coûts de raccordement et d'aménagement du site, les frais administratifs (terrain, maîtrise d'ouvrage, assurance). L'analyse de différents projets (voir Annexe) a permis d'estimer un montant indicatif pour les équipements de liquéfaction.

À droite, un tableau des coûts d'investissement (indicatif) dans un équipement de liquéfaction (valeurs 2021).

Ces montants ne permettent pas de distinguer les différences de performance ou d'étendue de prestation entre les solutions. Ils sont communiqués à titre d'information, de manière anonymisée et sur la base des retours collectés. Ces montants ne constituent pas un plancher ou un plafond, les coûts pouvant évoluer à la hausse ou à la baisse dans le futur.

| Capacité<br>(kgCO <sub>2</sub> /h) | CAPEX<br>(procédé)(k€) |
|------------------------------------|------------------------|
| 100                                | 600                    |
| 200                                | 700                    |
| 300                                | 800                    |
| 400                                | 900                    |
| 500                                | 1 000                  |
| 600                                | 1 100                  |
| 700                                | 1 200                  |
| 800                                | 1 250                  |

Les autres coûts (notamment : raccordements électriques, raccordement offgaz, génie civil, voirie réseaux divers) dépendent fortement des caractéristiques du projet et représentent typiquement de l'ordre de 20% des coûts de liquéfaction.

## LES COÛTS D'EXPLOITATION (OPEX)

Les coûts d'exploitation varient selon la solution choisie, le prix de l'électricité et les pratiques de l'entreprise en matière d'exploitation et maintenance.

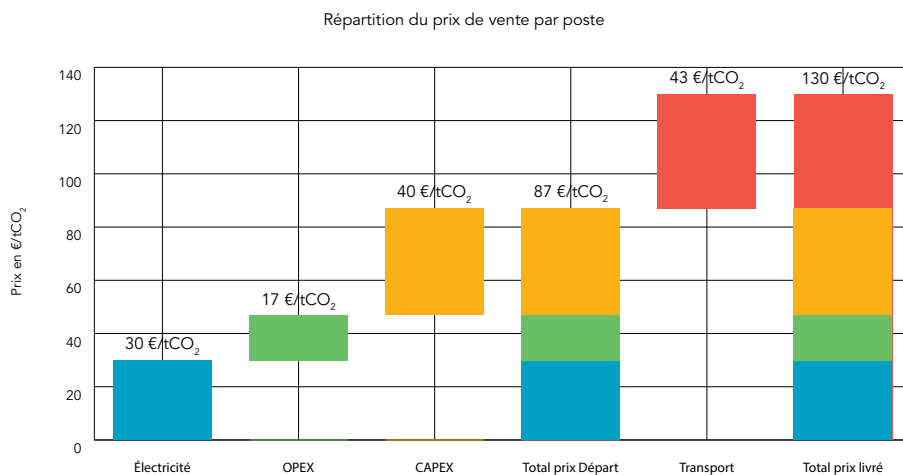
Le formulaire suivant peut accompagner les porteurs de projet dans leur réflexion.

| Item                          | Indications                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Valeurs de référence                                               | Exemple                                                                       | Valeur retenue par le porteur |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Électricité</b>            | Ratio_consommation_electrique x tonnage_produit x Prix_electricité<br><br>Le ratio de consommation électrique est la consommation en MWh/tCO <sub>2</sub> (Energie électrique par tonne de CO <sub>2</sub> ). Pour l'obtenir, il faut lister l'ensemble des consommations annuelles (y compris pour les accessoires tels que refroidissement des compresseurs, groupe froid etc.. Il est recommandé de demander un engagement du fournisseur                                                                                                                                             | Ratio_consommation_electrique = 0,26 ... 0,28 MWh/tCO <sub>2</sub> | 0,28 MWh/tCO <sub>2</sub> x 2 400 tCO <sub>2</sub> /an x 100 €/MWh = 67 000 € |                               |
| <b>Consommables</b>           | Les consommables sont essentiellement les consommables des compresseurs, sécheurs et filtres à charbon, groupe froid                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1 à 5 k€/an                                                        | 5 000 €                                                                       |                               |
| <b>Exploitation (humain)</b>  | Temps humain (en ETP) x salaire annuel chargé et environné<br><br>L'unité de liquéfaction nécessite un peu de temps humain pour fonctionner : ronde et surveillance, vérification des données de production, vérification des consommations, accueil des camions                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,1 à 0,25 ETP /an                                                 | 0,25 ETP/an x 50 k€/an/ETP = 12 500 €                                         |                               |
| <b>Frais administratifs</b>   | Les Frais administratifs incluent l'ensemble des coûts administratifs de type :<br>- assurance<br>- frais de comptabilité et gestion<br>- frais de facturation<br>- frais bancaires etc...<br>Selon le portage, ils peuvent être mutualisés en partie avec ceux de l'unité de méthanisation.                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1 à 5 000 €/an                                                     | 2 000 €                                                                       |                               |
| <b>Maintenance préventive</b> | Le matériel du procédé peut faire l'objet d'un contrat long terme de maintenance, pouvant inclure:<br>- la révision annuelle<br>- l'intervention en cas de panne<br>- la fourniture des pièces de rechange<br>- le maintien d'un stock de pièces de rechange pour le porteur de projet<br>- l'assistance au suivi des performances<br>- le cas échéant, l'assistance et/ou la réalisation des essais réglementaires en lien avec les équipements sous pression<br><br>Ce contrat de maintenance est généralement proposé par le fournisseur des équipements procédé (skid liquéfacteur). | 15 à 40 000 €/an, selon l'étendue de prestation                    | 20 000 €                                                                      |                               |

| Item                                                           | Indications                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Valeurs de référence                                                              | Exemple                  | Valeur retenue par le porteur |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| <b>Gros entretien renouvellement et maintenance corrective</b> | On considère une provision pour maintenance en fonction des montants d'investissement dans les équipements. Cette provision sert à :<br>- la maintenance corrective (en cas de panne) ;<br>- les travaux de maintenance lourde (typiquement à 5, 10 et 15 ans sur les compresseurs, pompes et/ou groupe froid).<br>Il s'agit d'une provision mais lisser ces coûts permet d'avoir plus de marge de manoeuvre lors de ces opérations.<br><br>Un bon entretien des équipements et des choix judicieux lors de la construction réduiront les coûts réellement dépensés. | 1 à 2% du CAPEX des équipements                                                   | 1% x 843 k€<br>= 8 430 € |                               |
| <b>Frais analyseurs</b>                                        | Selon la qualité du CO <sub>2</sub> souhaité, un analyseur pourra être nécessaire. Selon les objectifs de l'analyseurs (qualité du CO <sub>2</sub> conforme à la norme ELGA, référentiel propre convenu entre le porteur et les clients), des coûts additionnels sont à prendre en compte. On distinguera :<br>- des analyseurs "standards"<br>- des analyseurs plus performants (utilisés notamment pour les consommateurs de CO <sub>2</sub> alimentaires les plus exigeants).                                                                                     | - analyseur standard : 1 à 5 000 €/an<br>- analyseur de pointe : 15 à 20 000 €/an | 15 000 €                 |                               |
|                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Coûts d'exploitation complet                                                      | ~ 130 000€               |                               |
|                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Coûts d'exploitation, hors électricité et hors analyseurs                         | ~ 48 000 €               |                               |

## LA DÉCOMPOSITION DES COÛTS

En reprenant le cas d'Albert et de son unité de 300 kgCO<sub>2</sub>/h (voir page 20), on arrive à la décomposition suivante (la marge est répartie dans les différents postes) :



Exemple illustratif, prix base 2021, pour une rentabilité donnée (TRI de 8% à 20 ans).  
Il est fortement conseillé pour chaque projet de réaliser sa propre analyse économique.

## L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ

L'analyse de sensibilité comporte plusieurs aspects et permet de montrer la variation de rentabilité quand les paramètres changent.

## LA CARTOGRAPHIE

La cartographie (ici TRI projet en fonction du prix départ VS la quantité vendue) permet de mieux caractériser le domaine dans lequel un projet est économiquement possible.

| Les cases en couleurs indiquent le TRI du projet à 15 ans, selon les hypothèses |      |       | Prix Départ en €/tCO <sub>2</sub> |    |     |     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|------|-------|-----------------------------------|----|-----|-----|-----|
|                                                                                 |      |       | 80                                | 90 | 100 | 110 | 120 |
| Quantité vendue en tCO <sub>2</sub> /an                                         | 100% | 2 400 | 6%                                | 9% | 12% | 14% | 17% |
|                                                                                 | 88%  | 2 100 | 4%                                | 7% | 9%  | 12% | 14% |
|                                                                                 | 75%  | 1 800 | 1%                                | 4% | 6%  | 9%  | 11% |
|                                                                                 | 63%  | 1 500 | 0%                                | 1% | 3%  | 6%  | 7%  |
|                                                                                 | 50%  | 1 200 | 0%                                | 0% | 0%  | 2%  | 4%  |

Cas 300 kgCO<sub>2</sub>/h (185 Nm<sup>3</sup>/h de biométhane @ 50% CH<sub>4</sub>)

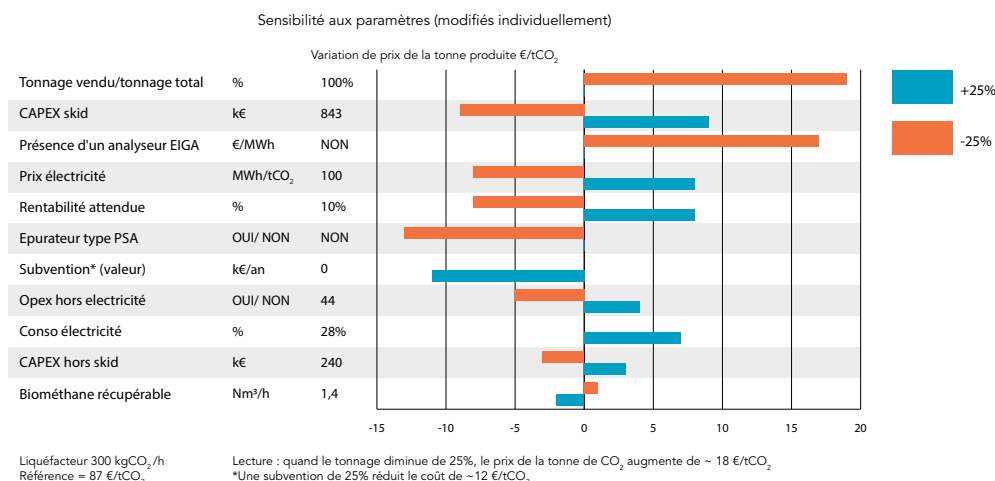
Lecture : un projet d'une capacité de production de 2 100 tCO<sub>2</sub>/an et un prix de départ à 80 €/tCO<sub>2</sub> aura une même rentabilité, de 4%, qu'un projet d'une capacité de production de 1 800 tCO<sub>2</sub>/an et un prix de départ de 90 €/tCO<sub>2</sub>.

## L'ANALYSE TORNADE

L'analyse tornade permet de voir l'impact des paramètres pris un par un (les autres restants fixes). Ici, c'est le tonnage vendu qui a le plus d'impact sur le prix de la tonne CO<sub>2</sub>.

Grille de lecture : quand le tonnage diminue (orange) de 25%, le prix de la tonne de CO<sub>2</sub> augmente d'environ 18 €/tCO<sub>2</sub>. Quand le CAPEX procédé augmente (bleu) de 25% le prix du CO<sub>2</sub> augmente de 8 €/tCO<sub>2</sub>.

Nota pour les subventions\* (valeur) : une subvention de 25% (bleu) réduit le coût du CO<sub>2</sub> de 12 €/tCO<sub>2</sub>



## ET POUR LES PROJETS EN VALORISATION DIRECTE

Il existe peu d'éléments de coûts sur ces filières. On peut noter tout de même :

- La possible nécessité d'un surpresseur ;
- Une canalisation de CO<sub>2</sub> en Polyéthylène (PE) peut-être estimée à 80 - 120 €/m linéaire ;
- Un stockage de CO<sub>2</sub> (gazomètre) pour un tonnage de 0,5 tCO<sub>2</sub>, un volume de 270 m<sup>3</sup> et un diamètre de 8 m est estimé à 50 - 100 k€ (voir [page 34](#)).

# VIII | TRANSPORT ROUTIER DE CO<sub>2</sub>

Le transport routier de CO<sub>2</sub> se fait en citerne roulante pour du CO<sub>2</sub> liquéfié. Sous cette forme, le CO<sub>2</sub> a une température d'environ -22°C, une pression d'environ 18 bar(g) et dispose d'une densité d'environ 1 t/m<sup>3</sup>. La citerne est équipée de ses accessoires (pompe, instrumentation) pour transférer le CO<sub>2</sub> vers la citerne (fixe) du client. Dans certaines utilisations sensibles et afin de limiter les risques de rétropollution, l'équilibrage des pressions via le raccordement de la phase gazeuse est prohibé.

Pour des raisons de qualité/traçabilité, une citerne de CO<sub>2</sub> transporte une seule qualité de CO<sub>2</sub> (alimentaire ou industriel) ou doit être requalifiée s'il y a transport de CO<sub>2</sub> non alimentaire ou déclassé.

Le transport de CO<sub>2</sub> liquide est soumis à la réglementation ADR afférente au transport de matière dangereuse qu'il est indispensable de prendre en compte avec toutes les contraintes et les coûts associés.

## LES MODÈLES D'ORGANISATION DU TRANSPORT ROUTIER DE CO<sub>2</sub>

Il existe plusieurs configurations pour le transport de CO<sub>2</sub>.

Dans le "**modèle centralisé**" classique du transport de CO<sub>2</sub>, quelques (grosses) usines approvisionnent des consommateurs, parfois situés très loin. Les coûts de transports sont très importants.

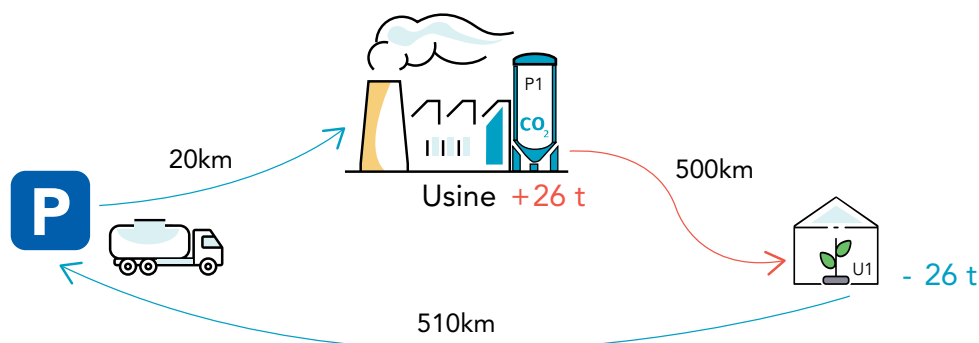


Schéma représentant le modèle "centralisé" classique du transport de CO<sub>2</sub>



## À NOTER

On évoque souvent une distance maximum de livraison de 250 km entre la source et le client, mais c'est un paramètre indirect : l'idée clé est plutôt de pouvoir réaliser au moins une tournée dans la journée (le chauffeur peut faire l'aller / retour dans la journée). Dans le modèle centralisé, il arrive que certains consommateurs soient approvisionnés à partir d'usines situées bien plus loin.

Pour le transport de CO<sub>2</sub> issu de biométhanisation, il existe d'autres modèles.

Dans le **modèle "autonome"**, un producteur approvisionne un petit nombre de consommateurs, nécessairement sur des distances très courtes.

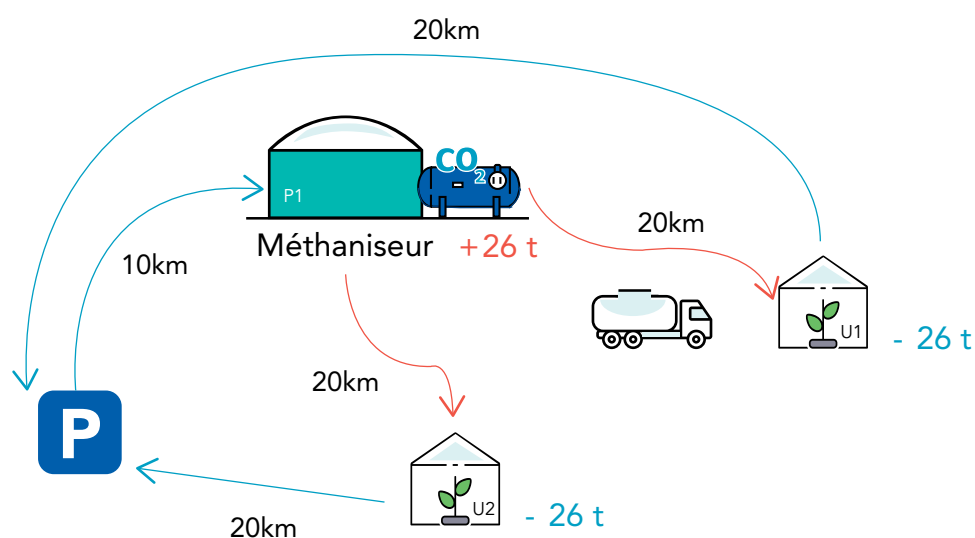


Schéma représentant le modèle "autonome" de transport du CO<sub>2</sub>

En synergie avec les grands acteurs du marché du CO<sub>2</sub>, il existe le **modèle "relais local" ou "proxy"**, un camion provenant d'une usine de CO<sub>2</sub> peut étendre sa tournée en rechargeant dans une unité de méthanisation.

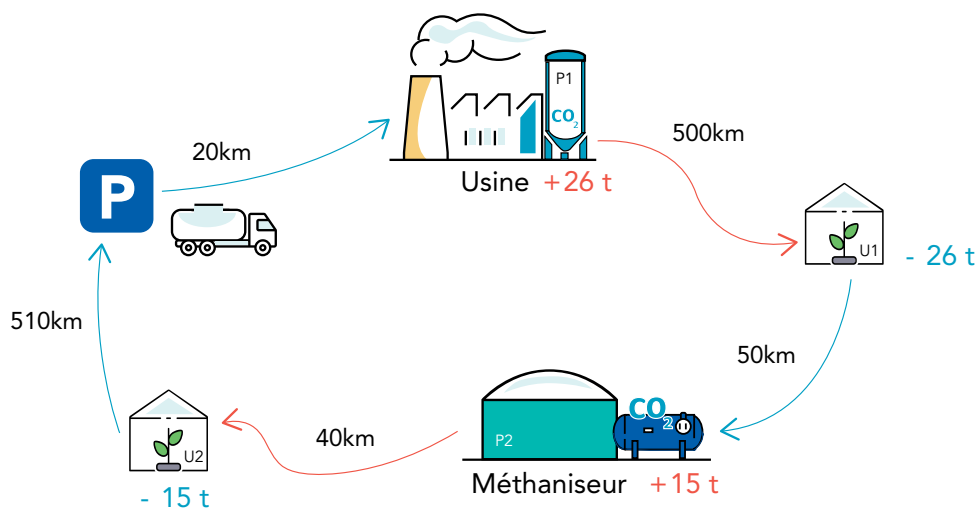


Schéma représentant le modèle "relais local" de transport du CO<sub>2</sub>

## TRANSPORT ET QUALITÉ ALIMENTAIRE

Les producteurs de bioCO<sub>2</sub> peuvent également se regrouper entre eux pour former **des coopératives, de type boucle mixte**, où un camion peut combiner chargement et déchargement dans la même tournée.

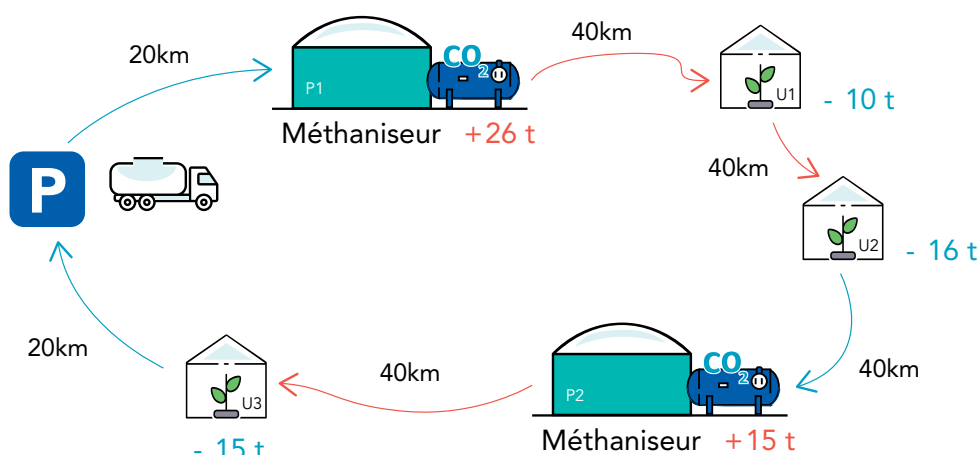


Schéma représentant le modèle "coopérative"

Le cas échéant, un modèle de type "boucles de collecte" peut mutualiser des équipements tels qu'un analyseur.

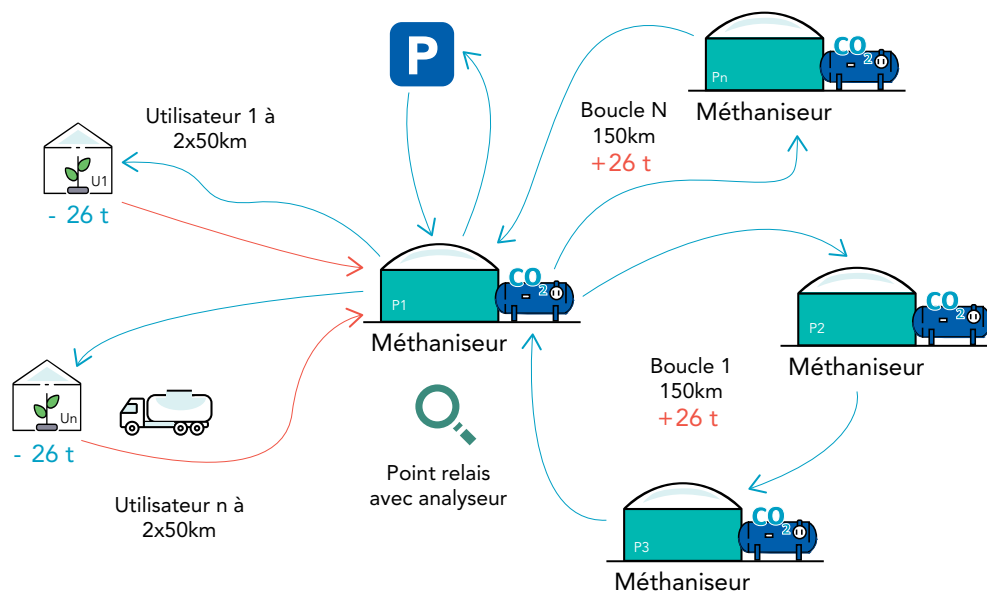


Schéma représentant le modèle "boucles de collecte"

## POINTS D'ATTENTION

Requalifier une citerne roulante qualité alimentaire après avoir été polluée peut être une étape coûteuse et impactant la logistique. Tout projet devant mutualiser les moyens de transport entre plusieurs producteurs de CO<sub>2</sub> devra faire l'objet d'une analyse fine de la qualité du CO<sub>2</sub> et des moyens de contrôle.



### À NOTER

Certains acteurs préfèrent travailler avec des prises d'échantillons envoyés à des laboratoires. L'avantage de cette pratique est qu'elle permet de ne pas contaminer les citernes de transport avec un CO<sub>2</sub> qui ne respecterait pas la qualité des autres membres du réseau.

La difficulté réside dans la fiabilité de la prise d'échantillon : dispose-t-on d'un moyen fiable de ne pas contaminer les récipients et de ne pas altérer la qualité du CO<sub>2</sub> ?

## LES COÛTS DU TRANSPORT ROUTIER DE CO<sub>2</sub>

Pour les projets de valorisation du bioCO<sub>2</sub> issu de méthanisation, le coût de transport du CO<sub>2</sub> varie typiquement entre 15 et 50 €/tCO<sub>2</sub> et peut représenter un coût significatif des projets.

Ce coût de transport prend en compte :

- les investissements dans la ou les citernes. Une citerne neuve de capacité maximale (28 000L) vaut typiquement de l'ordre de 180 à 200 k€. Des citernes plus petites (18 000 – 20 000L) peuvent valoir beaucoup moins.
- les coûts chauffeurs + camions + mise en place des exigences de la réglementation ADR (Transport de matières dangereuses). Les porteurs de projet peuvent acheter un camion et embaucher un chauffeur, mais en pratique il existe des sociétés spécialisées qui mettent à disposition au jour ou au mois leurs équipes et matériels (typiquement au tarif de 600 – 1 000 €/jour ou 8 000 – 10 000 €/mois).
- les coûts au kilomètre : ils incluent les dépenses de carburants et l'usure des matériels (pneumatiques).
- D'autres coûts annexes (assurance, maintenance des équipements) sont aussi à considérer.

## QUELS CONSEILS POUR RÉDUIRE LES FRAIS DE TRANSPORT ?

**Le premier conseil est de maximiser les infrastructures mobilisées.**

Ainsi, une citerne qui fonctionnera un jour par semaine sera sous-utilisée : pourquoi ne pas la mutualiser avec un autre producteur ?

Si vous pouvez contractualiser pour louer le service, avez-vous besoin d'acheter le camion et d'avoir votre propre chauffeur ?

Un client situé à une distance trop éloignée va monopoliser une citerne pendant longtemps : il vaut mieux privilégier les circuits courts.

La gestion d'une logistique dynamique est complexe et l'affaire de professionnels du secteur.

**Préférez la livraison de quelques clients autour d'un planning bien établi.** Cela n'empêche pas de travailler en collaboration avec d'autres producteurs.

**Le choix de la citerne est important.** Si vous avez l'opportunité d'acquérir une citerne d'occasion, il peut y avoir un gain. Attention cependant, une grande capacité permet de diminuer le nombre de voyages (et donc de livrer plus de clients à moindre coût).

**La taille des stockages sur les sites clients** est également un élément clé. En effet, cela permet d'envisager des livraisons dites "complètes" et d'optimiser la durée et le coût des tournées. Cela permet également d'amortir les variations journalières et saisonnières des consommations clients et ainsi d'améliorer le taux de charge des usines.

## IX | VOIES INNOVANTES ET EN DEVENIR DE VALORISATION DU CO<sub>2</sub>

Il existe de très nombreux projets d'innovation concernant la valorisation du CO<sub>2</sub> et un grand nombre est applicable au bioCO<sub>2</sub> de méthanisation. Compte tenu de leur maturité commerciale ou technologique, ces solutions n'ont pas vocation (à la date de rédaction de ce guide) à être achetées par les producteurs de bioCO<sub>2</sub>, mais peuvent faire l'objet de partenariats pour faire progresser la recherche et développement.

### TRANSFORMATION AVEC AJOUT D'ÉNERGIE

**Objectif :** reconstruire un vecteur énergétique ou chimique (méthane, méthanol, acide formique) en utilisant de l'électricité ou de l'hydrogène.

**Quelques exemples :**

- La méthanation permet de générer du méthane de synthèse à partir de CO<sub>2</sub> de méthanisation et d'hydrogène. La synergie entre méthanisation et méthanation est forte, mais les coûts de l'hydrogène sont encore très élevés. En 2021, GRDF a réalisé un appel à projets pour des projets vitrines pour soutenir cette filière et a retenu 3 lauréats.
- L'électrolyse du CO<sub>2</sub> permet de produire un gaz de synthèse (ou syngaz) riche en monoxyde de carbone et en hydrogène, pouvant ensuite être transformé en différents produits comme le méthanol, l'éthylène, etc.  
En France, les start-up CARBONEO, DIOXYCLE, E-MA (projet SOLARVI) travaillent sur ce procédé très innovant (l'électrolyse du CO<sub>2</sub>).

### POINTS D'ATTENTION

- La maturité économique de certains procédés peut ne pas être atteinte si un des ingrédients coûte cher (cas de la méthanation avec l'hydrogène renouvelable).
- On transforme le CO<sub>2</sub> en un autre produit, mais bien souvent la question des débouchés demeure : qui seront les acheteurs d'acide formique, d'éthylène ou des autres vecteurs ?

### AUTRES TRANSFORMATIONS

**Objectif :** transformer le CO<sub>2</sub> en un autre produit, sans ajout majeur d'énergie.

**Un exemple :** La production de bicarbonate de soude à partir de CO<sub>2</sub> et de soude (NaOH).

### POINTS D'ATTENTION

- Ces voies technologiques sont souvent connues, mais les enjeux portent sur les aspects marchés.
- Il faut être vigilant au coût des intrants. Par exemple, le coût de la soude pour le bicarbonate peut être plus élevé que le cours du bicarbonate.
- Pour un projet donné, la recherche des débouchés est encore un sujet.

## STOCKAGE

**Objectif :** piéger le CO<sub>2</sub> dans des matériaux.

**Quelques exemples :**

- Lauréate d'un appel à projets GRDF, la start-up WAYS propose une solution innovante de séchage accéléré de bois, permettant le piégeage du CO<sub>2</sub>. Les essais sont en cours.
- Il existe des projets de minéralisation du CO<sub>2</sub> par carbonatation. Ce CO<sub>2</sub> est ensuite piégé de manière très stable. Plusieurs projets sont en cours, dans des tailles compatibles avec les projets de méthanisation.

## POINTS D'ATTENTION

- Il faut envisager des projets à une échelle locale et éviter de transporter de grandes quantités de bois ou de ressource minérale.
- Certaines solutions fonctionnent avec du CO<sub>2</sub> liquéfié, mais ne sont pas adaptables à des offgaz de méthanisation.

# X | RESSOURCES COMPLÉMENTAIRES

- [Biogenic CO<sub>2</sub> from the biogas industry, septembre 2022, European Biogas Association - www.europeanbiogas.eu](http://www.europeanbiogas.eu)
- [Guide pour l'élaboration des documents techniques de consultation et d'offres d'une unité de "traitement du CO<sub>2</sub>" issu du biogaz en vue de sa valorisation, août 2022, Comité Stratégique de Filière Nouveaux Systèmes Énergétiques - www.systemesenergetiques.org](http://www.systemesenergetiques.org)
- [Présentation Valoriser le bioCO<sub>2</sub> de l'épuration du biogaz, Expobiogaz 2022 Bordeaux, Rigou et Praz, juin 2022 - www.projet-methanisation.grdf.fr](http://www.projet-methanisation.grdf.fr)
- [Avis d'expert : valorisation du CO<sub>2</sub> - Quels bénéfices ? Sous quelles conditions ? septembre 2021, ADEME - www.librairie.ademe.fr](http://www.librairie.ademe.fr)
- [Catalogue des solutions d'épuration de biogaz et de purification du CO<sub>2</sub> de méthanisation, décembre 2021, Travaux du CSF - www.systemesenergetiques.org](http://www.systemesenergetiques.org)
- [Appel à projets power-to-gas : GRDF soutient la dynamique hydrogène dans les territoires, Communiqué de Presse de GRDF du 20 Mai 2021, mai 2021, GRDF - www.grdf.fr](http://www.grdf.fr)
- [Valorisation du CO<sub>2</sub> de méthanisation, Webinaire, 9 juin 2021, Centre Technique Biogaz et Méthanisation \(CTBM\) - www.atee.fr](http://www.atee.fr)
- [Guide technique Valorisation du CO<sub>2</sub> de méthanisation, 8 septembre 2020, Centre Technique Biogaz et Méthanisation \(CTBM\)](#)
- [DOC 70 / 17 - Carbon Dioxide Food and Beverages Grade, Source Qualification, Quality Standards and Verification, 2016, EIGA \(voir paragraphe 5.1.3.2 "Biogas \(methane\) carbon dioxide sources \(Anaerobic digestion\)"\) - www.eiga.eu](http://www.eiga.eu)

---

# GLOSSAIRE

- **ADR** : il s'agit de l'"Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route". L'ADR contient des directives concernant le transport routier, l'emballage, l'arrimage du chargement, la classification et l'étiquetage des marchandises dangereuses.
- **ATEX** : la réglementation dite "ATEX" (pour atmosphère explosive) demande à tous les chefs d'établissement de maîtriser les risques relatifs à l'explosion dans leur entreprise. Une atmosphère explosive est un lieu de travail où le risque d'explosion est possible en raison de la présence de matières inflammables et combustibles.
- **CAPEX** : ce sont les dépenses d'investissement, tournées davantage vers la croissance à long terme de l'entreprise.
- **DREAL** : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
- **DDPP/DDCSPP** : Direction Départementale de la Protection des Personnes / Direction Départementale de la Cohésion Sociale et de la Protection des Personnes
- **DGPR** : Direction Générale de la Prévention des risques
- **EIGA** : European Industrial Gas association et référentiel du même nom
- **HACCP** : Hazard Analysis Critical Control Point, en français, un "système d'analyse des dangers et points critiques pour leur maîtrise". Il s'agit d'une méthode d'analyse de risque particulièrement utilisée en sécurité alimentaire. Les exploitants du secteur alimentaire ont pour obligation de mettre en place, appliquer et maintenir des procédures fondées sur les principes de l'HACCP.
- **ISBT** : international Society of beverage Technologists
- **Norme FSSC 22000** : Food Safety System Certification. La certification FSSC 22000, basée sur la norme ISO 22000, combine les exigences mutualisées des distributeurs et des industriels en matière de sécurité des aliments.
- **OPEX** : ce sont les dépenses d'exploitation, les charges courantes pour exploiter une entreprise ou un produit.
- **PCI** : Pouvoir Calorifique Inférieur. Le rendement d'une chaudière à condensation s'exprime en % sur PCI du combustible.
- **Projet de bioCO<sub>2</sub>** : dans le guide, la référence à un projet de valorisation du bioCO<sub>2</sub> de la méthanisation est parfois raccourcie en "projet de bioCO<sub>2</sub>" ou autre ; tous ces termes renvoient bien au même sujet.
- **Rendement carbone** : il s'agit de la performance épuratoire de l'installation, soit la quantité (kg) de CO<sub>2</sub> capturée en sortie par rapport à la quantité présente en entrée de l'installation.
- **SNG** : Gaz Naturel de Synthèse également appelé e-méthane dans le cadre des procédés de méthanation.

# ANNEXE 1 - ANALYSE DES CAPEX LIQUÉFACTION

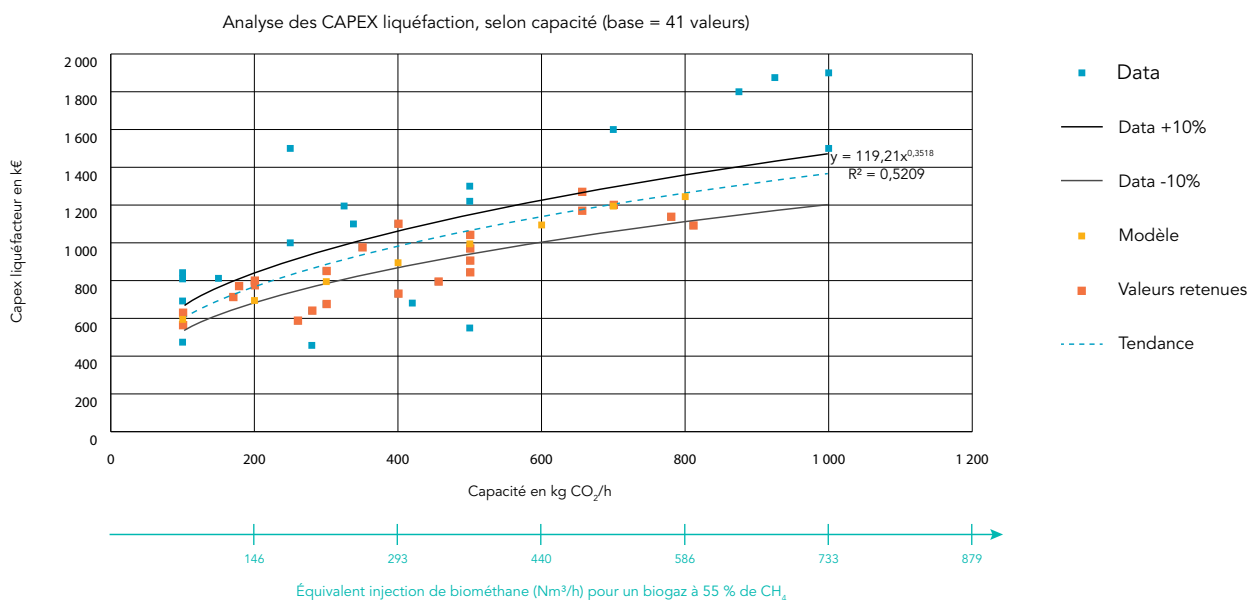


**À  
NOTER**

Les aspects économiques ont été évalués sur la base d'une analyse détaillée de projets ayant été présentés sur la période 2020-2021. Les données suivantes pourront donc être obsolètes par rapport au contexte d'inflation des prix de matériaux, services et énergie connus à la date de rédaction du guide. Il appartient aux porteurs de projets de vérifier la mise à jour de ces valeurs dans le contexte de leurs projets.

Le graphique ci-dessous présente une analyse des CAPEX de liquéfaction (partie "procédé" seulement, hors raccordement et cuves).

Les points bleus représentent les données recueillies (CAPEX en fonction de la capacité en kgCO<sub>2</sub>/h).



La méthodologie employée a été la suivante :

- Récupération de données, dont majoritairement les données issues des appels à projets GRDF
- Réalisation d'un graphique CAPEX de liquéfacteur = fonction (capacité) (points bleus, 41 valeurs)
- Réalisation d'une courbe de tendance et de l'enveloppe +10% / - 10%
- Réduction de l'échantillon (carrés oranges, 21 valeurs) pour exclure les projets aux valeurs extrêmes
- Proposition d'un modèle (carrés jaunes)
- Modélisation du modèle (tableau ci-joint) selon la loi de puissance  $y = 103,69 \cdot x^{0,3675}$

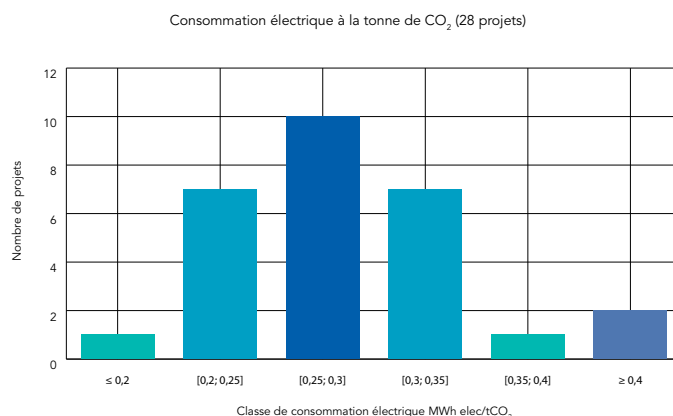
avec y = coût du liquéfacteur en k€ et x = capacité du liquéfacteur en kgCO<sub>2</sub>/h

| Capacité (kgCO <sub>2</sub> /h) | CAPEX (procédé)(k€) |
|---------------------------------|---------------------|
| 100                             | 600                 |
| 200                             | 700                 |
| 300                             | 800                 |
| 400                             | 900                 |
| 500                             | 1 000               |
| 600                             | 1 100               |
| 700                             | 1 200               |
| 800                             | 1 250               |

## ANNEXE 2 - ANALYSE DES PERFORMANCES (CONSOMMATION ÉLECTRIQUE)

L'analyse des projets (28 valeurs) issus des bases de données GRDF a permis de dresser le panorama suivant d'une consommation électrique typiquement entre 0,25 et 0,3 MWh/tCO<sub>2</sub>, avec des variations selon les fournisseurs.

On rappelle que pour un porteur de projet payant son électricité 100 €/MWh, l'écart de prix du CO<sub>2</sub> entre un projet à 0,35 et un projet à 0,25 MWh/tCO<sub>2</sub> sera de ... 10 €/tCO<sub>2</sub>. C'est un écart important.



## ANNEXE 3 - FORMULE DE CALCUL DÉTAILLÉ DU POTENTIEL DE CO<sub>2</sub> (POUR LES MATHEUX)

### • Formule complète

$$\dot{Q}_{biogaz} = \dot{Q}_{biométhane} * \frac{x\%CH_4_{biométhane} - x\%CH_4_{offgaz}}{x\%CH_4_{biogaz} - x\%CH_4_{offgaz}}$$

$$\dot{Q}_{biogaz} = 178 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\dot{Q}_{total,offgaz} = \dot{Q}_{biogaz} - \dot{Q}_{biométhane}$$

$$\dot{Q}_{total,offgaz} = 78 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\dot{m}CO_{2total,offgaz} = \dot{Q}_{total,offgaz} * x\%CO_2_{offgaz} * \rho_{CO_2}$$

$$\dot{m}CO_{2total,offgaz} = 149 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}CO_{2capture} = \dot{m}CO_{2total,offgaz} * \eta_{carbone}$$

$$\dot{m}CO_{2capture} = 134 \text{ kg/h}$$

$$mCO_{2capture,annuel} = \dot{m}CO_{2capture} * \text{disponibilité}$$

$$mCO_{2capture,annuel} = 1072 \text{ tCO}_2/\text{an}$$

$$\dot{Q}_{biométhane} = 100 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$x\%CH_4_{biométhane} = 97,3\%$$

$$x\%CH_4_{biogaz} = 55\%$$

$$x\%CH_4_{offgaz} = 0,7\%$$

$$x\%CO_2_{offgaz} = 0,9885\%$$

$$\rho_{CO_2} = 1,93 \text{ kg/Nm}^3$$

$$\eta_{carbone} = 90\%$$

$$\text{disponibilité} = 8000 \text{ h/an}$$

Pour rappel, les Conditions Normales de Température et de Pression (CNTP) sont une température de 0°C et une pression de 1 atm.

# ANNEXE 4 - LISTE NON EXHAUSTIVE DE RÈGLEMENTATIONS APPLICABLES

## Liste (non exhaustive) des règlements CE à respecter pour les équipements industriels unités de liquéfaction

- Directive 2014/68/UE portant sur les Équipements sous Pression
- Directive 2006/42/CE "machines"
- Directive 2014/35/UE, matériel électrique basse tension

Plus d'informations sur : [www.entreprises.gouv.fr/](http://www.entreprises.gouv.fr/)

## Autre réglementation

Arrêté du 17 juin 2021 modifiant l'arrêté du 12 août 2010 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées de méthanisation relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n° 2781 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.

Art. 47 bis. - Systèmes d'épuration du biogaz.

*"Les systèmes d'épuration du biogaz en biométhane sont conçus, exploités, entretenus et vérifiés afin de limiter l'émission du méthane dans les gaz d'effluents à :*

- *2% en volume du biométhane produit, pour les installations d'une capacité de production de biométhane inférieure à 50 Nm<sup>3</sup>/h. À compter du 1<sup>er</sup> janvier 2025, cette valeur est ramenée à 1% en volume du biométhane produit.*
- *1% en volume du biométhane produit, pour les installations d'une capacité de production de biométhane supérieure à 50 Nm<sup>3</sup>/h. À compter du 1<sup>er</sup> janvier 2025, cette valeur est ramenée à 0,5% en volume du biométhane produit.*

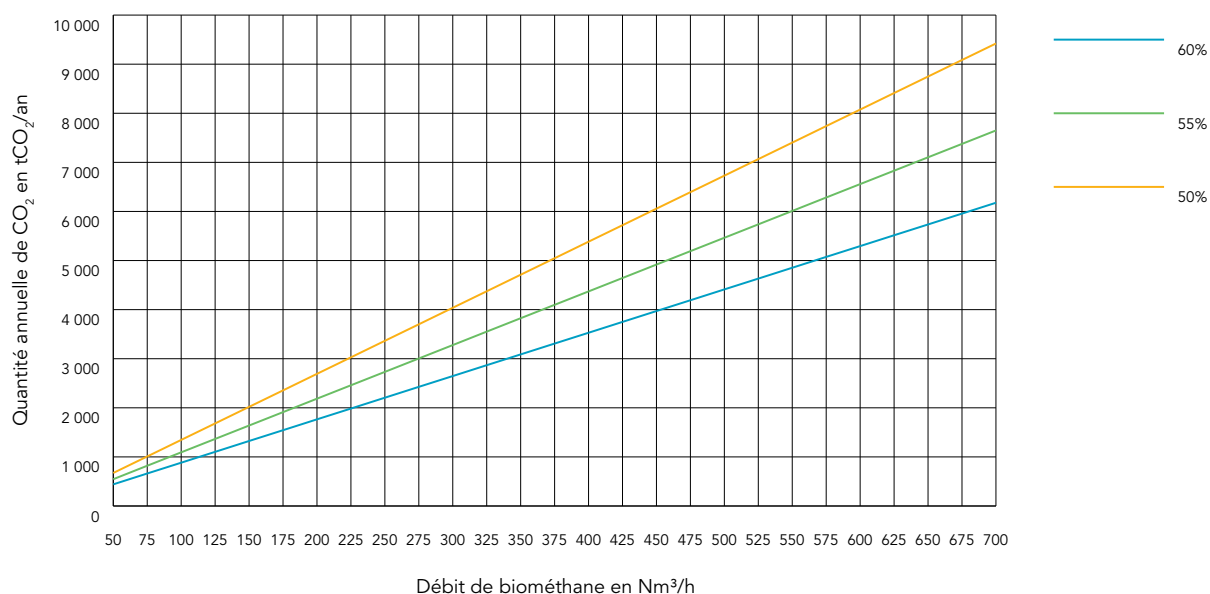
*Le respect de ces valeurs fait l'objet d'une évaluation annuelle."*

## Liste (non exhaustive) des règlements CE à respecter pour le CO<sub>2</sub> de qualité alimentaire :

- **à retrouver sur [www.eur-lex.europa.eu](http://www.eur-lex.europa.eu) :**
  - [Règlement \(CE\) 852/2004 relatif à l'hygiène des denrées alimentaires](#) ;
  - [Règlement \(CE\) 2073/2005 : concernant les critères microbiologiques applicables aux denrées alimentaires](#);
  - [Règlement \(CE\) 2023/2006 : relatif aux bonnes pratiques de fabrication des matériaux et objets destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires](#);
  - [Règlement \(CE\) 1333/2008 sur les additifs alimentaires \(CO2 = E290\)](#) ;
  - [Règlement \(CE\) 10/2011 : concernant les matières plastiques destinées au contact des aliments](#);
  - [Règlement \(CE\) 231/2012 : spécifications additionnelles au 1333/2008](#) ;
  - [Règlement \(CE\) 382/2021 sur la gestion des allergènes alimentaires la redistribution des denrées alimentaires et la culture de la sécurité alimentaire](#).
- **à retrouver sur [www.economie.gouv.fr](http://www.economie.gouv.fr) :**
  - [Règlement \(CE\) 1935/2004 : définissant les exigences générales qui s'appliquent aux matériaux et objets destinés à entrer en contact directement ou indirectement avec les denrées, produits et boissons alimentaires mis sur le marché](#)
- **à retrouver sur [www.agriculture.gouv.fr](http://www.agriculture.gouv.fr) :**
  - [Règlement \(CE\) 178/2002, établissant les principes généraux et les prescriptions générales de la législation alimentaire](#)
- **à retrouver sur [www.ecologie.gouv.fr](http://www.ecologie.gouv.fr) :**
  - [Accord ADR sur la circulation de marchandises dangereuses, via transport routier](#)

# ANNEXE 5 - ABAQUE DE PRODUCTION DE CO<sub>2</sub> LIQUÉFIÉ EN FONCTION DU DÉBIT DE BIOMÉTHANE INJECTÉ

Estimation de la quantité de CO<sub>2</sub> liquéfié, en fonction du débit de biométhane en Nm<sup>3</sup>/h, et du taux de CH<sub>4</sub> dans le biogaz (plage 50 - 750 Nm<sup>3</sup>/h)





Avec la contribution technique et le financement de



Ne pas jeter sur la voie publique - Tous droits réservés

Crédits photo : ©animaflora-picsstock, ©DiedovStock, ©William et ©Cornel Putan pour Adobe Stock / ©Victorine Alisse, ©Grégory Brandel pour GRDF / Jan Kopriva, Thomas Reaumont, Daniel Fazio, MediaModifier, Sonika Agarwal, Aleksa-ndr Buynitskiy pour Unsplash / Agrikomp

Crédits design : GRDF / good ware, juicy\_fish, pikisuperstar et macrovector pour Freepik / Mélanie Ferreira pour Yélé Consulting / Fabien Michel pour VOLTIGITAL