



DOSSIER

Création d'une petite unité
de purification du biogaz

Table des matières

Table des matières.....	2
1 Introduction.....	3
1.1 Présentation du biogaz.....	3
1.2 Utilisation du biogaz.....	4
1.3 Compression du gaz.....	5
2 Analyse de la situation actuelle.....	6
2.1 Présentation des producteurs.....	6
2.2 Présentation des technologies de purification du biogaz.....	7
2.3 Application du méthane et du dioxyde de carbone.....	9
3 Potentiel d'une petite unité de purification du biogaz.....	10
3.1 Applications d'une petite unité de purification du biogaz.....	11
3.2 Cahier des charges d'une petite unité de purification du biogaz.....	12
3.3 Proposition d'une solution mixte compression / cryogénie.....	13
Diagrammes Enthalpiques.....	15
3.4 Estimation des besoins pour le projet.....	16
3.5 Financements.....	16
Bibliographie	18

1 Introduction

1.1 Présentation du biogaz

Le biogaz ou gaz des marais se forme naturellement lors de la décomposition des déchets organiques dans un milieu privé d'oxygène (anaérobie). On peut observer ce phénomène dans les marécages ou dans les estomacs des ruminants.



Biogaz en combustion, dans un milieu naturel (à gauche), dans un k ggs contrôlé (à droite)

Il est possible de reproduire ces conditions artificiellement dans une production contrôlée, on parle alors de méthanisation.

En effet, la décomposition de la matière organique va produire un gaz constitué de [1] :

- Méthane (CH_4): 55-70 %
- Dioxyde de carbone (CO_2): 30-45%
- Hydrogène (H_2): 1-3%
- Azote (N_2): 0,5-3%
- Acide sulfhydrique (H_2S): 0,1-0,2%
- Traces de vapeur d'eau

Le méthane est un gaz très intéressant car c'est un très bon combustible. On le retrouve sous la dénomination de gaz naturel ou gaz de ville lorsqu'il est d'origine fossile.

Les intérêts de la méthanisation ne s'arrêtent pas là. D'une part, elle permet également d'assainir les déchets organiques en décomposant les molécules complexes. D'autre part, le digestat, coproduit de la méthanisation, est un très bon fertilisant. Ce liquide que l'on retrouve en sorti du bio-digesteur est en effet chargé d'azote, de phosphore et de potassium [2]. Il peut ainsi remplacer efficacement les engrais minéraux d'origine fossile. Enfin, la méthanisation étant un procédé de dégradation des déchets organiques en milieu fermé, il présente de nombreux aspects positifs. Tout d'abord, l'élimination des odeurs des déchets, la diminution des gaz à effets de serres et la production d'énergie renouvelable pilotable et stockable.

1.2 Utilisation du biogaz

L'utilisation du biogaz produit peut se faire de différentes manières. Tout d'abord, il peut être utilisé tel quel dans une cuisinière ou une lampe au gaz. Il peut également être injecté dans une chaudière à combustion directe pour produire de la chaleur utilisable directement ou bien dans un cogénérateur d'électricité au biogaz pour produire de l'électricité et de la chaleur [3]. Cette dernière option est souvent retenue pour les installations à partir d'une certaine taille car elle offre une bonne rentabilité économique.



SrggYrgnl bs ZgreYx bYl qsl c jYk nc eYsaf c ms bYl qsl ameġl ġYrcsp bprgc

Ensuite, certaines applications nécessitent une purification du biogaz pour obtenir du biométhane (gaz très riche en méthane). Cela nécessite l'utilisation de technologies pour séparer le méthane des autres composants du biogaz et obtenir un gaz constitué à plus de 86 % de méthane, norme ISO 15403 [4]. On obtient alors un gaz similaire au gaz naturel (d'origine fossile). Ainsi épuré, il convient à toutes les machines conçues pour fonctionner au gaz naturel. Il peut également être réinjecté sur le réseau de gaz de ville après l'obtention des agréments [5].



*Utilisation du biométhane après épuration dans une tondeuse au gaz (à gauche)
ou en injection sur le réseau (à droite)*

1.3 Compression du gaz

Suite à la purification, il peut être intéressant de comprimer le biométhane pour le stocker ou le transporter. On retrouve alors différents niveaux de compression suivant les utilisations :

- Compression entre 7 et 20 bars dans des bonbonnes de butanes pour l'utilisation de gazinière ou de moteurs 2 temps.
- Compression à 200 bars pour l'utilisation comme GNV dans les véhicules au gaz naturel.



*Stockage du biométhane en bouteilles haute pression 200bars (à gauche)
ou basse pression 8 bars (à droite)*

Bien que la compression du biogaz soit possible, passer par la purification avant la compression procure de nombreux avantages à commencer par l'optimisation du stockage. En effet, le biométhane est deux fois plus concentré en méthane que le biogaz. Il faut donc deux fois moins d'énergie et deux fois moins de volume pour compresser et stocker la même quantité d'énergie. Enfin, les machines compatibles avec le biométhane sont plus répandues et moins onéreuses que celles compatibles avec le biogaz.

La purification du biogaz permet de séparer le méthane des autres composés et notamment du CO₂ présents en grande proportions (30 à 45%). Certaines technologies de purification comme le PSA et la cryogénie permettent de récupérer ce gaz et de le valoriser, cet aspect est détaillé dans la partie 2.2.

2 Analyse de la situation actuelle

2.1 Présentation des producteurs

L'installation de centrales de méthanisation en France est en pleine expansion. En 2020, 987 installations sont recensées par l'ATEE [6] soit une augmentation de 40 % par rapport à septembre 2018. (588 sites en sept 2018)

Les sites de méthanisation se répartissent en différentes catégories selon le volume des installations [7] :

- Très petites installations : entre 0 et 20m³ de volume utile, ces installations sont souvent auto fabriquées et sont utilisées comme projet pilotes pour la recherche. On parle aussi de micro-méthanisation.
- Petites installations : entre 20 et 150m³, souvent dans de petites fermes où les produits de la méthanisations sont utilisés sur place [8].
- Moyennes installations : entre 150 et 500m³, regroupent souvent plusieurs petites fermes ou une grosse exploitation d'élevage. Elles permettent d'épurer les déjections. Le gaz est souvent épuré et valorisé sous forme de bio-GNV ou injecté sur le réseau de gaz de ville.
- Très grandes installations : supérieur à 500m³, ce sont soit des regroupements de grosses exploitations agricoles, des entreprises industrielles, de collectivités ou des stations d'épurations. Le gaz produit est épuré et injectés sur le réseau.



De gauche à droite, une très petite installation, démonstrateur de la BioBeeBox (Gironde), une petite installation, projet M cube (Gers), une moyenne installation, exploitation agricole, (Nord) et une très grosse installation, Station d'épuration (Haute Savoie)

Actuellement, les dispositifs d'épuration du biogaz nécessitent de très gros investissements, ceci explique pourquoi, il n'y a que les exploitations d'une certaine taille peuvent l'envisager. Cette situation est d'autant plus dommageable que la purification du biogaz donne accès à de nombreuses utilisations du gaz comme nous le détaillons dans la partie 2.3 ainsi qu'une viabilité économique renforcée.

2.2 Présentation des technologies de purification du biogaz

Il existe actuellement plusieurs technologies pour séparer le méthane des autres composés chimiques présents dans le biogaz.

Pour résumer ces technologies, nous utiliserons le tableau récapitulatif présenté par David Benizri dans sa thèse [9] :

Technologie	Avantages	Inconvénients
Absorption physique sous pression avec de l'eau	Haute pureté (>97 % CH ₄) Traitement [H ₂ S] < 300 ppm Facilement automatisé Ajustement de l'efficacité par la pression, la température ou la hauteur de colonne Régénération du solvant Peu de pertes de CH ₄ Tolère la présence d'impuretés Production de CO ₂ pur	Investissement conséquent en développement Consommation énergétique de 0,15 à 0,5 kWh/Nm ³ de biogaz brut Risque de formations biologiques Formation de mousse avec certains composés du gaz Faible flexibilité aux variations de qualité du gaz pour un objectif donné
Absorption physique sous pression avec du poly-éthylène glycol	Haute pureté (> 97 % CH ₄) Epuration simultanée des gaz H ₂ S, NH ₃ , HCN et de l'eau Consommation énergétique plus faible que pour l'eau Régénération du solvant Peu de pertes de CH ₄	Investissement conséquent en développement Coût d'opération élevé Procédé difficile à gérer Régénération incomplète par le vide L'eau absorbée dans le glycol diminue la capacité d'absorption
Absorption avec réaction chimique	Très haute pureté (>99% CH ₄) Opération peu couteuse en énergie électrique (0,1 à 0,2 kWh/Nm ³ de biogaz brut) Régénération du solvant Bonne capacité de charge du solvant en comparaison de l'eau Pertes de méthane très faibles < 0,1 %	Investissement conséquent en développement Besoin en chaleur élevé pour la régénération (0,5kWh/Nm ³ de biogaz brut) Corrosion par les solvants Les amines se détruisent en présence d'O ₂ ou d'autres agents chimiques Précipitation de sels Production de mousse possible
Adsorption sous pression/dépression alternée	Bonne pureté (95 à 98% CH ₄) Elimination d'H ₂ O Consommation énergétique moyenne (0,3-0,5 kWh/Nm ³ de biogaz brut) Technique compacte S'adapte à de très petite installation Tolère les impuretés mais pas le H ₂ S	Investissement conséquent en développement Coût d'opération élevé Procédé complexe Pertes élevées de CH ₄ si les vannes sont défaillantes

Technologie	Avantages	Inconvénients
Cryogénisation	Pureté de 90 à 98% CH ₄ CO ₂ obtenu à pureté élevée Production de GNL avec un surplus d'énergie limité	Coût d'investissement et d'opération élevés Le CO ₂ peut se retrouver en faible concentration dans le CH ₄
Perméation membranaire gaz-gaz	Pureté < 92 % CH ₄ avec un étage et > 96 % CH ₄ avec deux étages Elimination de l'eau	La membrane a une sélectivité assez faible : il faut choisir entre la pureté et la quantité de gaz récupéré Plusieurs étages avec recyclages sont nécessaires pour atteindre des hautes puretés (>96%) Les pertes de méthane peuvent être élevées
Perméation membranaire gaz-liquide	Pureté > 96% CH ₄ Production de CO ₂ pur	Retours d'expérience à l'échelle industrielle limités Investissements élevés en membranes

Tableau 1.2 : Tableau récapitulatif et comparatif des techniques d'épuration du biogaz (adapté de Ryckebosch et al. (2011))

Le point commun de toutes ces technologies est leur complexité de mise en œuvre et l'investissement important qu'ils nécessitent. Ce constat permet, en partie, d'expliquer le fait que seul les moyennes et grosses installations de méthanisation peuvent se permettre l'utilisation de ces technologies. A noter cependant que l'épuration à l'eau sous pression est accessible en auto construction comme l'atteste l'installation « EPUROGAS » chez Pierre Lebbe [9] ou encore celle de Jean-Phillipe Valla de l'Atelier Paysan [10].

Enfin, certaines techniques ont l'avantage de combiner la récupération du méthane et du dioxyde de carbone. Cela présente de nombreux avantages. En effet, le dioxyde de carbone est actuellement valorisé deux fois plus cher que le méthane (1,25€ / kg pour le méthane contre 2,5€/kg pour le CO₂). D'autre part, le CO₂ est utilisé dans de nombreuses applications agricoles et artisanales. La double valorisation du CO₂ et du CH₄ semble être un objectif intéressant pour l'autonomie économique et énergétique des petits producteurs de biogaz.

2.3 Application du méthane et du dioxyde de carbone

Nous étudions ici les valorisations du méthane et du dioxyde de carbone dans le cadre d'une production rurale et de petite taille.

Avec une purification du méthane proche des 90 %, toutes les machines fonctionnant au gaz naturel peuvent être utilisées sans modification.

On peut alors imaginer une ferme utilisant le méthane pour :

- Se déplacer : Voiture au bio-GNV, engins agricoles [11]
- Chauffer : Gazinière et brûleur au gaz de ville, chauffage et chaudière au gaz
- Produire de l'électricité : groupe électrogène et/ou cogénérateur au gaz
- Faire du froid : frigo au gaz



De gauche à droite des équipements fonctionnant au méthane : une cuisinière 4 feux, une fourgonnette se rechargeant en méthane et un groupe électrogène

La récupération du dioxyde de carbone permet d'obtenir un gaz utile dans de nombreuses applications :

- En agriculture : pour doper le maraîchage sous serre ou la culture d'algue comme la spiruline.
- En soudure : en complément d'une bouteille d'argon pour la soudure au MAG.
- En alimentaire : Pour gazéifier des boissons comme du jus de pomme pétillant ou de la bière.



De gauche à droite, des applications du CO2 : Le dosage en horticulture, gaz pour soudure au MAG, bouteille pour gazéifier les boissons

3 Potentiel d'une petite unité de purification du biogaz.

Le constat actuel est, d'une part, une forte croissance du nombre d'installations depuis une dizaine d'années et d'autre part, une grande diversité avec d'un côté les grosses installations industrielles, productives et centralisées et de l'autre des petites installations à taille humaine, à visée expérimentale pour une autonomie énergétique.

Jusqu'à présent les petites installations sont difficilement rentables économiquement et restent souvent à visée expérimentale. En effet, l'essentiel de la recherche se concentre sur les grosses installations pour espérer dégager des marges importantes. Ce secteur encore peu exploré semble être une voie intéressante pour développer une petite méthanisation en lui assurant une rentabilité économique et en diversifiant les utilisations des coproduits de production.

Bien que similaire d'un point de vue physique, les petites et grosses installations de purifications n'ont pas le même cahier des charges. En effet, dans une petite installation, la priorité est mise sur l'autonomie et la simplicité des procédés. Concrètement, il est envisageable d'avoir des installations semi-manuelles, en discontinu avec une plage d'utilisation adaptable à la disponibilité des utilisateurs et une pureté de gaz plus faible que les installations industrielles.

Enfin, la petite unité de purification pourrait être mobile et mutualisée entre plusieurs petites installations. Cette option permettrait une multiplication des stations de biométhane sur le territoire et ainsi faciliter le développement des équipements liés à cette source d'énergie. Cette solution de production, décentralisée avec une mutualisation du matériel spécifique, offre de nombreux avantages. Une diminution des nuisances par un approvisionnement de matière organique et une production de digestat de faible quantité [12]. Une diminution des risques du fait des faibles quantités de gaz et de digestat produits sur chaque site. Une diminution des investissements dans le matériel spécifique grâce à la mutualisation. Tous ces arguments faciliteraient d'autant plus l'acceptabilité sociale de ces technologies.

3.1 Applications d'une petite unité de purification du biogaz

Une petite unité de purification d'un mélange binaire méthane – dioxyde de carbone pourrait répondre à de nombreuses applications pour valoriser la production de ces deux gaz.

En étudiant seulement les applications liées au secteur de la méthanisation nous pouvons citer les suivants

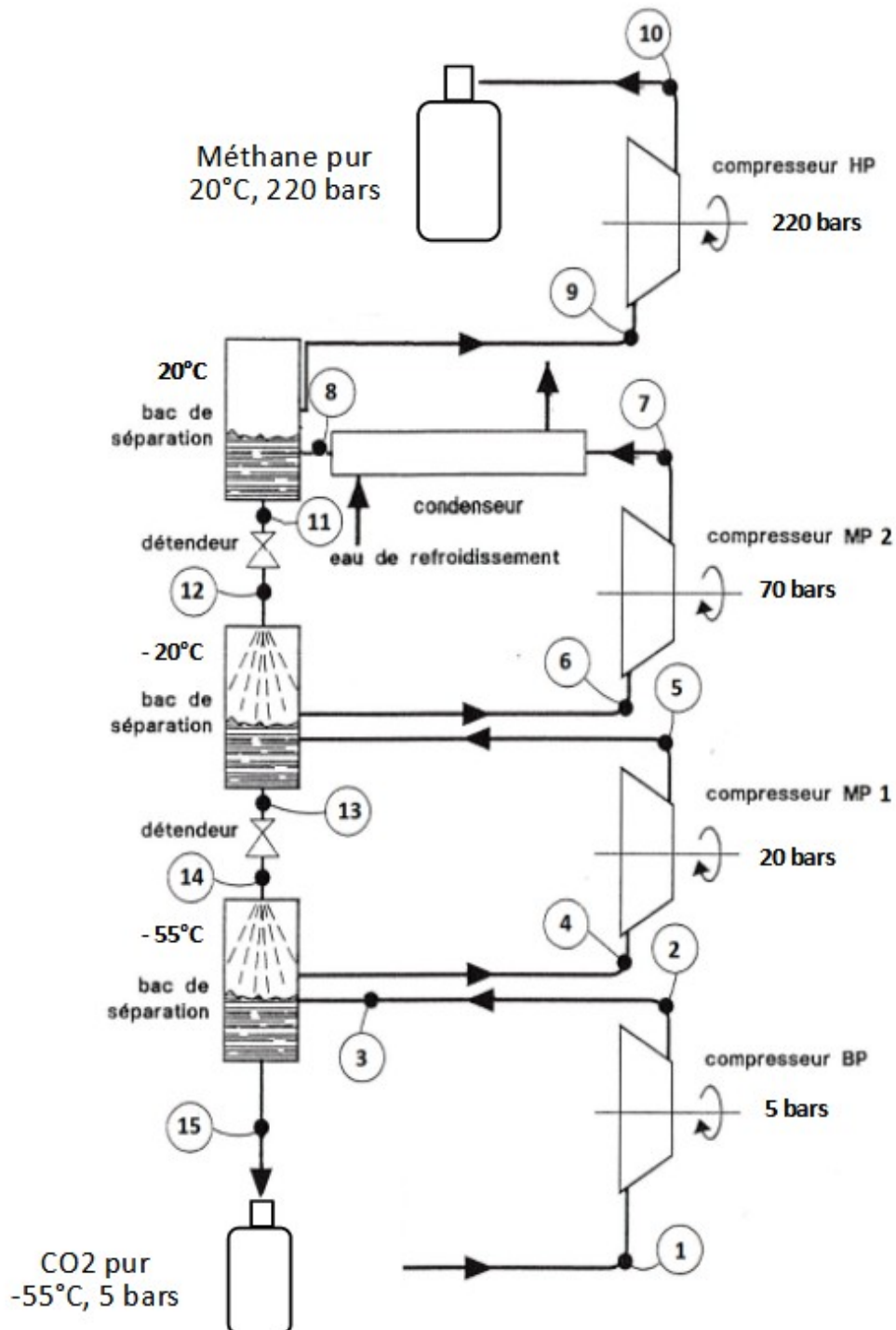
- Pour une installation de micro-méthanisation :
 - Création des stations de GNV avec un biométhane à 200 bars
 - Production et conditionnement local de bioCO₂ pour diverses applications
- En complément d'installation déjà existantes :
 - Purification et conditionnement du CO₂ issue du vaporeformage du méthane (production d'hydrogène à partir de méthane)
 - Purification et conditionnement du CO₂ issue de technologies de purification du biogaz (lavage à l'eau ou membrane)

3.2 Cahier des charges d'une petite unité de purification du biogaz

	Description	Niveau
Fonction principale	Extraire le méthane et le dioxyde de carbone du biogaz	Pureté des gaz > 86 % norme ISO 15403
		Débit de $3\text{m}^3 \pm 0,5 \text{ m}^3/\text{h}$
Fonction secondaires	Être compatible avec un gaz inflammable	Norme ATEX
	Admettre un mélange de gaz binaire CH ₄ - CO ₂	Concentration de CO ₂ entre 40 et 90 % dans le mélange entrant
	Être facilement réparable	Fournisseurs généralistes
	Consommer peu d'énergie	< 20 % du PCI du biométhane produit
	Être transportable dans une remorque pour voiture	Masse < 300kg Volume max : 2,5x1,3x1 (lxLxh)
	Être utilisable toute l'année en lieu couvert	Températures comprises entre 0 et 45°C
		Humidité comprise entre 20 % et 80 %
	Fonctionner avec le réseau électrique français	220 V, 50Hz, < 10A
	Être compatible avec des bouteilles haute pression en sortie	

3.3 Proposition d'une solution mixte compression / cryogénie

Le système proposé permet de traiter des mélanges de gaz binaire $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ (biogaz) avec un concentration comprise entre 2 et 45 % de CO_2 . La séparation se fait par compression successive du gaz et liquéfaction du CO_2 .



Description des étapes

1 → 2 : Compression du biogaz de 1 à 5 bars	11 → 12 : Détente du CO ₂ de 70 à 20 bars
2 → 3 : Refroidissement du biogaz à 20°C	12 → 13 : Séparation du CO ₂ liquide et gazeux
3 → 4 : Refroidissement du biogaz à -55°C	13 → 14 : Détente du CO ₂ de 20 à 5 bars
4 → 5 : Compression du biogaz de 5 à 20 bars	14 → 15 : Séparation du CO ₂ liquide et gazeux
5 → 6 : Refroidissement du biogaz à -20°C	15 : Mise en bouteille du CO ₂ pur (liquide)
6 → 7 : Compression du biogaz de 20 à 70 bars	
7 → 8 : Refroidissement du biogaz à 20°C	
8 → 9 : Liquéfaction du CO ₂	
9 → 10 : Compression du CH ₄ à 220 bars	
10 : Mise en bouteille du CH ₄ pur à 220 bars	

État des gaz aux différents repères

Repère	P (kg/cm ²)	T (°C)	Etat CO ₂	Etat CH ₄
1	1	20	Vapeur surchauffée	Vapeur surchauffée
2	5	140	Vapeur surchauffée	Vapeur surchauffée
3	5	20	Vapeur surchauffée	Vapeur surchauffée
4	5	-55	Vapeur saturée	Vapeur surchauffée
5	20	30		
6	20	-20	Vapeur saturée	Vapeur surchauffée
7	70	80		
8	70	20	Liquide sous-refroidis	Vapeur surchauffée
9	70	20	RAS	Vapeur surchauffée
10	220	120	RAS	Vapeur surchauffée
11	70	20	Liquide sous-refroidis	RAS
12	20	-20	0,343	RAS
13	20	-20	Liquide sat	RAS
14	5	-55	0,197	RAS
15	5	-55	Liquide sat	RAS

Diagrammes Enthalpiques

Diagramme enthalpique du CO2

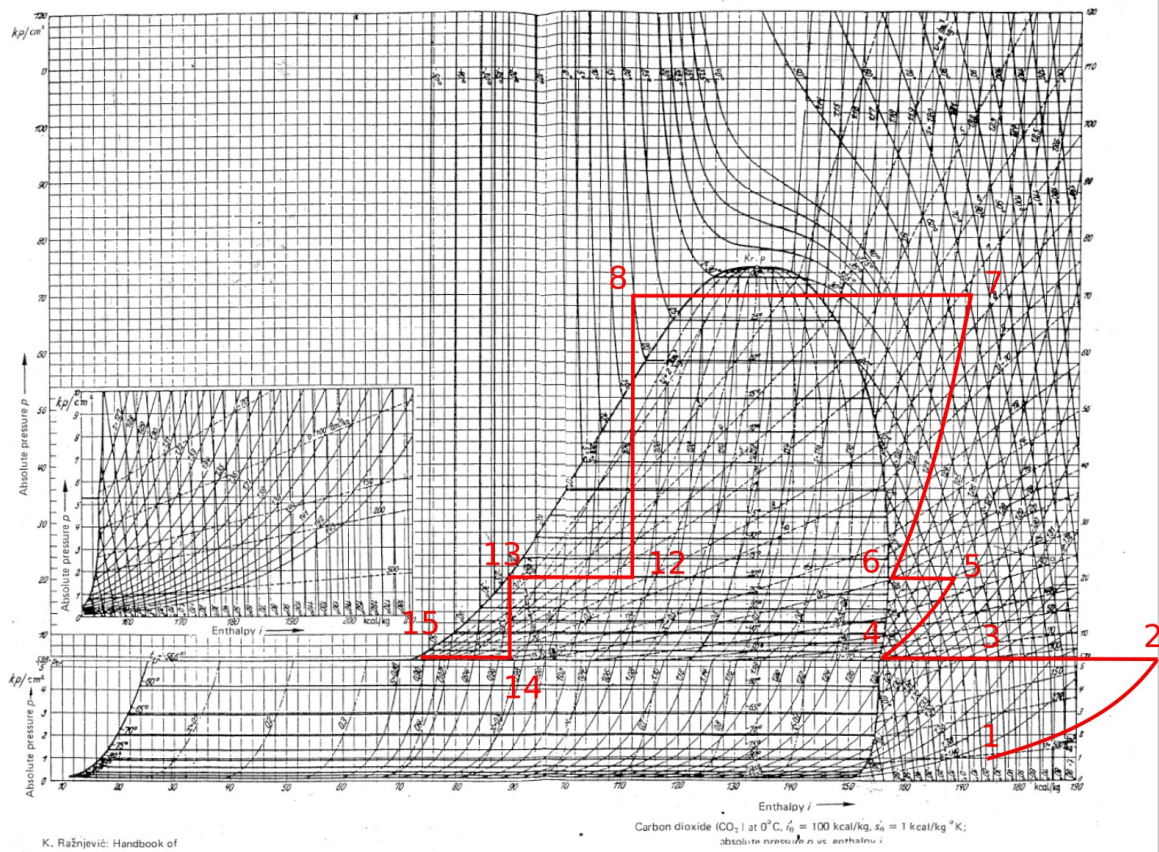
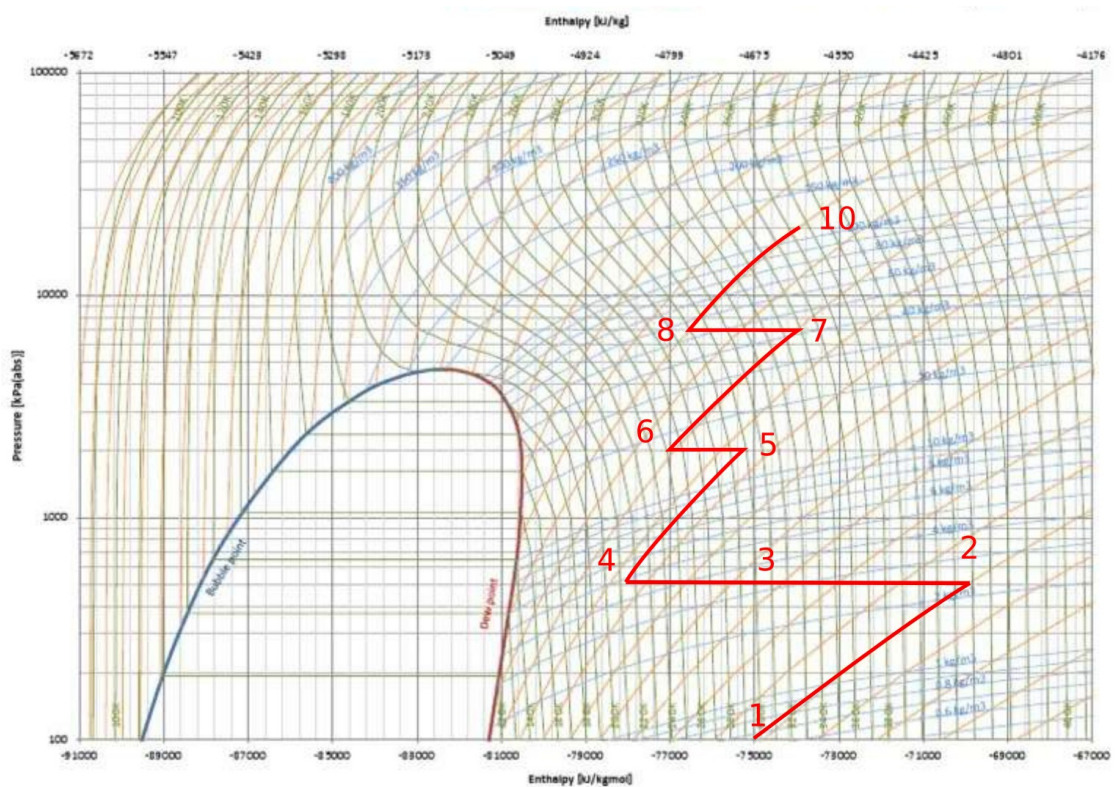


Diagramme enthalpique du CH4



3.4 Estimation des besoins pour le projet

Besoins humains pour le projet (200 000 €)

2 ETP pendant 2 ans (200 000 €):

- Étude de l'existant (4 mois) → Rédaction d'un état de l'art + Compte rendu des rencontres avec les fabricants des installations artisanales en fonctionnement.
- Conception du prototype (8 mois) → rendu des plans techniques + mise en situation 3D + devis pour l'achat des machines et des capteurs.
- Fabrication du prototype (5 mois) → Achat des pièces et montage du système complet
- Instrumentalisation et test du prototype (3 mois) → Enregistrement et exploitation des données. Calcul des rendements énergétique.
- Documentation (4 mois) → Rédaction d'une notice de fabrication, publication des plans et des résultats expérimentaux sous licence libre.

Besoins matériels pour le projet (72 000€)

- Construction d'un banc de test sécurisé (10 000€)
- Équipement de sécurité (2000€)
- Compresseurs, norme ATEX (30 000€)
- Tuyauterie haute pression (250 bars) (5000€)
- Bouteilles de gaz haute pression > 200bar (2000 €)
- Compteur et analyseur de gaz (8000 €)
- Compteur d'électricité pour faire les bilans d'énergie (5000€)
- Licence de logiciel de conception 3D (5000€)
- Instrumentation du banc de test (10 000€)

Besoins en sous-traitance (80 000€)

- Soudures du montage haute-pression
- Audit de validation du montage haute pression
- Validation des protocoles de sécurité
- Locaux hébergement pour le pilote

Budget Total : 352 000 €

3.5 Financements

Fonds propres (10 000 €)

Picojoule (10 000 €)

Subventions (150 000 €)

Ademe (100 000 €)

Région (50 000 €)

Partenariats (192 000€)

INSA – Chaire Innovation Biogaz - Cifre (42 000 €)

GRDF (130 000 €)

Seven Occitanie (20 000€)

Recettes Total : 352 000 €

Bibliographie

- [1] <https://condorchem.com/fr/blog/traitement-du-biogaz/>
- [2] composition digestat : https://aile.asso.fr/wp-content/uploads/2020/03/VF-Valdipro_Fiche-produit_Digestat-brut.pdf
- [3] Utilisation du biogaz : <https://www.smartgrids-cre.fr/encyclopedie/linjection-de-gaz-vert-dans-les-reseaux/introduction-le-biomethane-une-energie-renouvelable-pour-les-territoires-dans-la-transition-energetique>
- [4] Purification du biogaz à la Réunion : <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2015/production-de-biomethane-par-purification-du-biogaz>
- [5] Utilisation du biogaz purifié : <https://www.ecoco2.com/blog/panorama-du-biogaz-du-gaz-100-renouvelable-en-2050/>
- [6] <https://atee.fr/energies-renouvelables/club-biogaz/observatoire-du-biogaz-en-france>
- [7] <http://www.cuma.fr/sites/default/files/196/dossiers/international/proaerenewsletters/unite-4-biogaz.pdf>
- [8] Installation de petites unités de biogaz Enerpro : <https://enerpro-biogaz.fr/>
- [9] Thèse de David Benizri : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01538100/document>
- [10] Jean Philippe Valla : <https://www.latelierpaysan.org/IMG/pdf/metaalaferme-2.pdf>
- [11] Conversion de véhicules au biogaz : <http://www.omafr.gov.on.ca/french/engineer/facts/12-044.htm>
- [12] Pollution des grosses installation methanisateur : <https://reporterre.net/methanisation-un-digestat-bien-indigeste-pour-les-sols-et-les-eaux>
- [13] Distillation Based CO₂ Removal from Natural Gas for Small and Medium, V Manek *et al* 2020 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **755** 012052