

# Comparatif des principales techniques de purification des biogaz ou bio-énergies

## Focus particulier sur SOLUPOL®

### Incluant avantages, limites, mécanismes et contextes d'usage.

---

## 1. PTC SYSTEM – SOLUPOL® (procédé physico-chimique)

### *Principe*

Le procédé **PTC System** utilise un **lavage physico-chimique en tours de contact gaz-liquide** pour transférer les molécules indésirables du biogaz vers une phase liquide, avec modification chimique de ces molécules avec le réactif spécifique **SOLUPOL®** pour que le milieu devienne **inodore et biodégradable**.

### *Polluants traités*

- \* H<sub>2</sub>S et autres composés soufrés
- \* Siloxanes
- \* NH<sub>3</sub> organochlorés/fluorés
- \* H<sub>2</sub>O (eau)

Le CO<sub>2</sub> n'est **pas extrait** comme pour l'obtention de biométhane, mais il contribue à l'amélioration de la qualité du gaz final. Il permet une récupération du CO<sub>2</sub> dans une phase suivante de la chaîne de purification.

### *Avantages*

- **Très bonne élimination des H<sub>2</sub>S et des odeurs** (efficacité > 99 % sur certains composés soufrés).
- **Pas de génération de sous-produits nocifs ou odorants** par oxydation contrairement à d'autres procédés oxydants.
- Consommation de réactif **proche de la théorie**, ce qui réduit les coûts chimiques.
- Fiable et robuste sur des gaz très comme peu chargés en polluants.

### *Limites*

- N'est **pas spécifiquement conçu pour enrichir le CH<sub>4</sub>** jusqu'à un niveau hautement purifié (99 %+), contrairement aux techniques d'upgrade biométhane.
- Processus physico-chimique impliquant une **consommation de solutions liquides**.

---

## 2. Lavage à l'eau / Water Scrubbing

### *Principe*

Absorption physique dans une colonne où l'eau dissout majoritairement le CO<sub>2</sub> (et une partie du H<sub>2</sub>S).

### *Avantages*

- ✓ Efficace pour CO<sub>2</sub> ( $\approx > 97\%$  CH<sub>4</sub> possible)
- ✓ Pas de produits chimiques agressifs
- ✓ Approche simple et éprouvée

### *Inconvénients*

- \* Energie de compression et régénération élevée
  - \* Nécessite une gestion de l'eau
  - \* Moins ciblé sur H<sub>2</sub>S, siloxanes ou traceurs spécifiques sans étapes supplémentaires.
- 

## 3. Adsorption / PSA (Pressure Swing Adsorption)

### *Principe*

Séparation des composants gazeux par adsorption sur des matériaux (zéolithes, charbon actif).

### *Avantages*

- ✓ Très bon enrichissement méthane (souvent  $> 98\%$ )
- ✓ Technologie mature, modulable.

### *Inconvénients*

- \* Besoin de compression énergétique
  - \* Les impuretés comme H<sub>2</sub>S doivent souvent être **prétraitées** avant PSA
  - \* Complexité et perte de méthane dans certaines configurations
- 

## 4. Séparation membranaire

### *Principe*

Membranes semi-perméables laissent passer CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et certains contaminants, retenant le CH<sub>4</sub>

### *Avantages*

- ✓ Pas de produits chimiques requis
- ✓ Méthane pur à 99 % avec configurations multipasses
- ✓ Compact, modulable

### *Inconvénients*

- \* Efficacité dépend fortement des conditions de pression/température
  - \* Capex initial élevé
- 

## 5. Lavage chimique (amines, solvants organiques)

### *Principe*

Absorption chimique avec réactifs qui se complexent avec CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>S.

### *Avantages*

- ✓ Très forte capacité de captation des gaz ciblés
- ✓ Permet un contrôle précis des concentrations

### *Inconvénients*

- \* Régénération énergétique coûteuse
  - \* Pas de séparation CO<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>S
  - \* Solvants/agents chimiquement actifs à gérer avec précaution
- 

## Comparaison rapide

Technologie	CO <sub>2</sub> élimination	H <sub>2</sub> S / odeur	CH <sub>4</sub> pureté	Complexité / Coût
PTC System <b>SOLUPOL®</b>	Quasi nulle	Très élevée	Modérée	Basse
Water Scrubbing	Élevée	Moyenne*	Élevée	Moyenne
PSA / VPSA	Élevée	Moyenne (prétraitement)	Très élevée	Moyenne-élevée
Membranes	Élevée	Moyenne*	Très élevée	Moyenne
Amine / chimique	Très élevée	Élevée	Très élevée	Élevée

\* H<sub>2</sub>S majoritairement traité en étapes préliminaires ou via adsorbants dédiés.

---

## Quand choisir SOLUPOL® vs autres technologies ?

✓ **SOLUPOL® est particulièrement adapté** lorsque l'objectif prioritaire est **l'élimination ciblée des composés soufrés, des odeurs, des siloxanes** et autres traces à caractère acide indésirables sur des flux de biogaz variés (agricole, boues, déchets) sans élimination du CO<sub>2</sub> que sera purifié dans une autre technologie ( par exemple : lavage aux amines ou PSA/membranes)

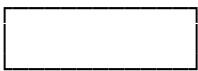
\* Si l'objectif est d'atteindre une qualité biométhane proche des standards réseau (≈ 98-99 % CH<sub>4</sub>) ou de produire du Bio-CNG, des technologies comme **PSA, membranes ou scrubbers à large spectre** sont généralement plus adaptées.

✓ **Dans les systèmes intégrés, SOLUPOL®** peut être utilisé en **prétraitement (désulfuration + odeurs)** avant un **upgrade CO<sub>2</sub> (PSA/membrane)** pour optimiser la longévité des installations et la qualité finale du biométhane.

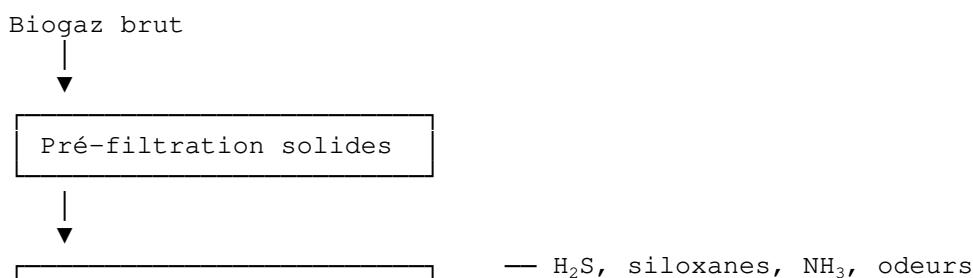
---

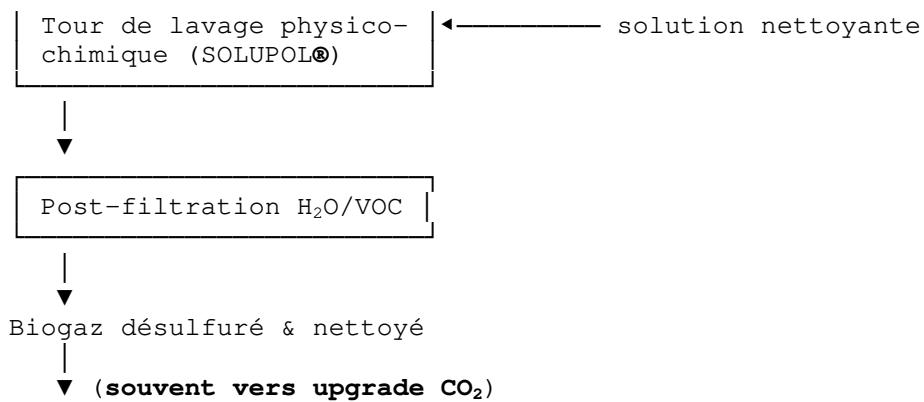
## Schéma technique comparatif détaillé Etapes de flux de gaz et équipements associés pour chaque solution

### Légende des symboles

-  – Équipement / unité de traitement
  - – Flux principal du biogaz
  - – Polluants éliminés / sous-produits
- 

### 1.- PTC System – SOLUPOL® (désulfuration + nettoyage des traces acides)

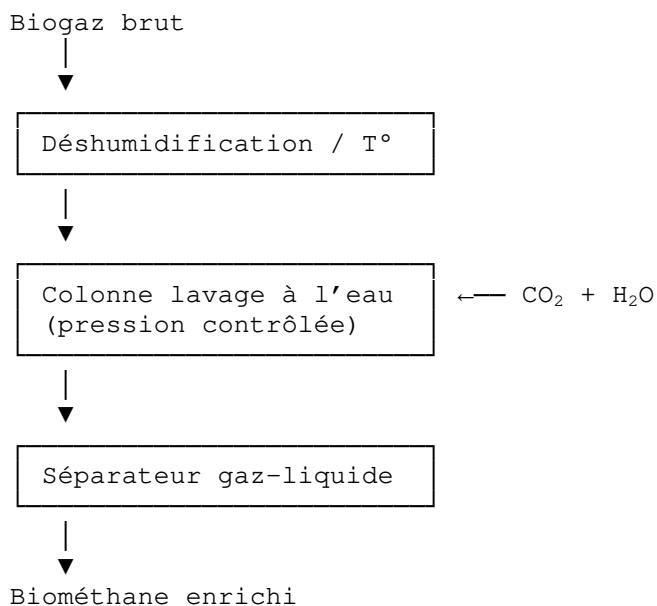




**Rôle principal :** *élimination fine des composés soufrés, odeurs et traces acides.*

**Qualité sortie typique :** biogaz propre, H<sub>2</sub>S très bas, mais surtout **CO<sub>2</sub> encore présent** pour valorisation ultérieure → **pas du biométhane 98 %+** sans étapes supplémentaires.

## 2.- Water Scrubbing (lavage à l'eau)

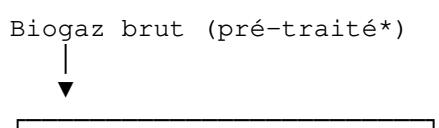


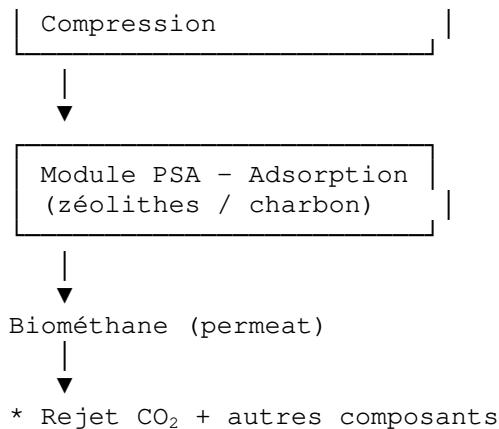
**Rôle principal :** *extraction du CO<sub>2</sub> par absorption.*

**Points clés :** nécessite eau propre/recyclée et gestion des eaux usées.

\* **Pas de séparation complète de H<sub>2</sub>S**

## 3.- PSA (Pressure Swing Adsorption)



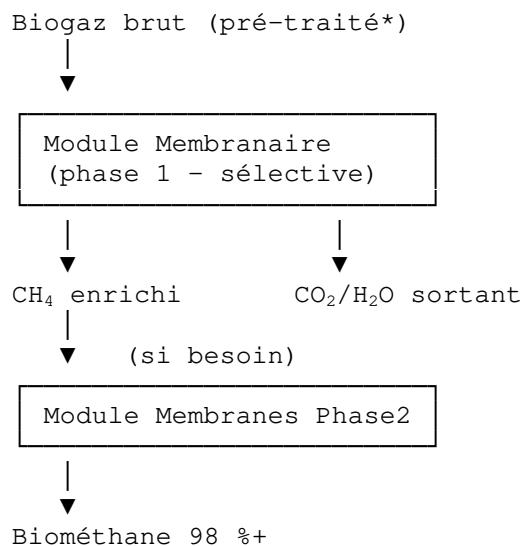


*Pré-traité typiquement = H<sub>2</sub>S réduit (charbon actif, scrubber) + déshumidification.*

**Points forts :** très bon enrichissement CH<sub>4</sub>

**Attention :** perte de méthane possible, besoin de compression et régénération.

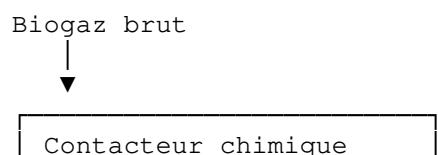
## 4.- Membranes semi-perméables



**Points forts :** compact, pas beaucoup de chimie.

**Limite :** performance liée pression/température.

## 5.- Lavage chimique (amines, solvants)



(amines / solvants)

↓  
CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>S absorbés

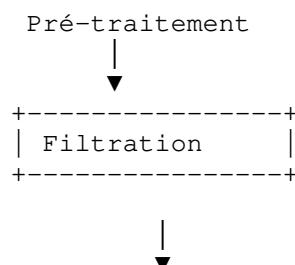
Régénérateur de solvants

↓  
Biométhane enrichi

**Rôle principal** : forte capacité d'absorption CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S donc pas de purification du CO<sub>2</sub>.

**Note** : régénération énergétique coûteuse.

## Comparatif schématique — étapes clés



Technologie	Désulfuration	CO <sub>2</sub> Elimination	Biométhane
SOLUPOL®	★★★★★	★★★★★	★★★★★ necessite UP grade
Water Scrubbing	★★★★★	★★★★★	★★★★★
PSA	★★★★★ *	★★★★★	★★★★★
Membranes	★★★★★ *	★★★★★	★★★★★ / ★★★★★
Lavage chimique	★★★★★	★★★★★	★★★★★

★ = efficacité relative (1 à 5)

\* nécessite pré-désulfuration (SOLUPOL ou charbon actif)

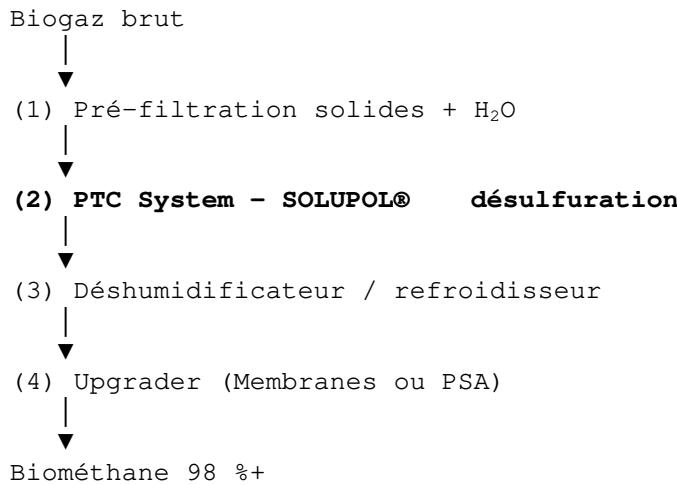
## Notes d'interprétation

**PTC System - SOLUPOL®** est excellent en **désulfuration & traitement des traces acides** mais **ne remplace pas** à lui seul une unité d'upgrade CO<sub>2</sub> → biométhane.

Les méthodes d'**upgrade** (**PSA, membranes, scrubber**) sont conçues pour produire du **biométhane qualités réseaux / GNV (≥ 98 % CH<sub>4</sub>)**.

Elles nécessitent toujours un **pré-traitement du biogaz** (H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>O, siloxanes) pour protéger les matériaux (membranes, adsorbants).

# Cas d'intégration typique



## CAPEX (investissement) et OPEX (coûts d'exploitation) des principales technologies Comparaisons avec SOLUPOL®

### 1.- Investissement (CAPEX) — ordre de grandeur

Technologie	CAPEX typique	Unité / Remarques
Membranes	300 000 à ~800 000 €	Pour ~≤ 80 Nm <sup>3</sup> /h (taille petite à moyenne)
PSA	300 000 à 750 000 €	Débit variable selon options
Lavage à l'eau	650 000 à 800 000 €	Selon capacité et constructeur
Lavage chimique (amines)	820 000 à 1 040 000 €	Pour ~65 Nm <sup>3</sup> /h biométhane (forte régénération)
PSA / membranes (autres sources)	1 000–2 000 €/Nm <sup>3</sup> /h biogaz	Exemple cas 1 000 Nm <sup>3</sup> /h (forte variabilité selon taille)

#### Notes :

- Les coûts évoluent fortement avec la taille d'installation : plus elle est grande, plus le coût par unité de capacité diminue.
- Ces données représentent les unités “classiques” d'upgrade en biométhane. **PTC System/SOLUPOL®** étant principalement un **traitement de désulfuration et purge des traces acides**, les chiffres directs d'investissement spécifiques ne sont **pas standardisés** publiquement, mais on peut considérer que le module pour SOLUPOL®

est **plus compact et moins coûteux** que l'ensemble d'upgrade complet (CO<sub>2</sub> removal + compression + finitions).

---

## 2.- Consommation énergétique (OPEX – énergie)

Technologie	Énergie consommée (indicative)
<b>Membranes (upgrade)</b>	~0,26 kWh/Nm <sup>3</sup> biogaz brut
<b>Water Scrubbing</b>	~0,4–0,5 kWh/Nm <sup>3</sup> biogaz
<b>PSA</b>	~0,16–0,35 kWh/Nm <sup>3</sup> biogaz
<b>Lavage chimique/amines</b>	~0,05–0,25 kWh/Nm <sup>3</sup> (solvants) + chaleur pour régénération (forte)
<b>PTC System</b> <b>SOLUPOL®</b>	~ 45 €/h pour module standard (~indicatif) → dépend composition & débit

### Remarques techniques :

- L'**énergie consommée** de ces technologies comprend essentiellement les compresseurs, pompes, régénération ou pressurisation.
  - Les valeurs ci-dessus ne tiennent pas compte des **énergies annexes** (ex. séchage, refroidissement, gestion prétraitement, siloxanes, etc.).
  - Le procédé **PTC System - SOLUPOL®** n'a pas de valeur d'énergie électrique directe facilement comparable car il repose sur une **réaction physico-chimique** avec consommables plutôt qu'une séparation énergétique typique.
- 

## 3.- Exploitation (OPEX) — coûts annuels & consommables

Technologie	OPEX annuel typique	Détails / références
<b>PTC System</b> <b>SOLUPOL®</b>	30 000–45 000 € / an	Pour ~1 000 Nm <sup>3</sup> /h biométhane (consommables + maintenance)
<b>Membranes</b>	11 400–22 000 € / an	Pour ~60 Nm <sup>3</sup> /h biométhane (consommables + maintenance)
<b>PSA</b>	20 000–22 000 € / an	Similaire pour ~60 Nm <sup>3</sup> /h
<b>Water Scrubbing</b>	20 000–25 000 € / an	
<b>Lavage chimique</b>	53 000–58 000 € / an	Plus coûteux consommables et énergie
<b>Lavage chimique (amines)</b>	12 000–15 000 € / an (variante)	
<b>PSA / membranes (grande échelle)</b>	25 000–56 000 € / an	Selon taille ~1 000 Nm <sup>3</sup> /h

### Interprétation :

- À **petite échelle**, les coûts relatifs de maintenance et consommables (charbon actif, solutions chimiques, membranes à remplacer) sont un poste important de l’OPEX global.
  - Les coûts peuvent varier très fortement selon **qualité du biogaz brut** : si le gaz contient beaucoup de H<sub>2</sub>S, siloxanes ou eau, les consommables montent vite.
  - De manière générale il faut tenir compte du fait que le lavage chimique **SOLUPOL®** est la seule technologie permettant la séparation **H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>**.
- 

## 4.- Coût direct par volume de gaz épuré

Voici quelques données bibliographiques pour donner une **ordonnance de coût global (CAPEX amorti + OPEX)** :

Technologie	Coût€/Nm <sup>3</sup> biogaz traité (approx.)
<b>SOLUPOL®</b>	0,15–0,20 €/Nm <sup>3</sup>
<b>PSA (global)</b>	0,25–0,44 €/Nm <sup>3</sup>
<b>Water Scrubbing</b>	0,13–0,16 €/Nm <sup>3</sup>
<b>Membranes</b>	0,22–0,27 €/Nm <sup>3</sup>
<b>Lavage chimique</b>	0,28–0,35 €/Nm <sup>3</sup>
<b>PSA (littérature)</b>	0,08–0,38 €/Nm <sup>3</sup> selon taille et source

---

## Spécificités PTC System - SOLUPOL®

### Coût de fonctionnement opérationnel :

- Environ **~45 €/h** pour un module de purification de traces sur un flux donné *selon une composition type du biogaz* (H<sub>2</sub>S, mercaptans, etc.).

### Nature du coût :

- Ce chiffre représente plus le **coût des consommables et réactifs** que de l'énergie électrique pure qui est minime (pompe de circulation et instrumentation).
- Cela **n'inclut pas** l'investissement CAPEX total d'un module complet, ni les coûts d'intégration à une chaîne d'upgrade.

### Interprétation pratique :

- Le procédé **SOLUPOL®** peut être considéré **économique pour la désulfuration fine et élimination de traces acides**, mais il doit généralement être **couplé** à une étape d'upgrade CO<sub>2</sub> (PSA/membranes/lavage aux amines) pour produire du biométhane de qualité réseau.

- Sa **consommation énergétique directe est faible** comparée aux séparations énergétiques (compression, régénération), car il repose sur réactifs et solutions physico-chimiques plutôt que sur séparation gazeuse pure.
- 

## Résumé des ordres de grandeur

- **CAPEX par unité de capacité (€/Nm<sup>3</sup>/h) :**
    - Water Scrubbing ~1 000–1 800 €/Nm<sup>3</sup>/h
    - PSA ~1 300–2 000 €/Nm<sup>3</sup>/h
    - Membranes ~1 300–1 400 €/Nm<sup>3</sup>/h
  - **OPEX annuel pour installations moyennes :**
    - ~10 000–60 000 € selon technologie et taille
  - **Énergie consommée par Nm<sup>3</sup> biogaz brut traité :**
    - Membranes ~0,26 kWh/Nm<sup>3</sup>
    - Water Scrubbing ~0,4–0,5 kWh/Nm<sup>3</sup>
    - PSA ~0,16–0,35 kWh/Nm<sup>3</sup>
  - **PTC System - SOLUPOL® :** Approximativement **45 €/h pour un module** (consommables/produits chimiques compris), sans compter le CAPEX spécifique du module.
- 

## Conseils pratiques pour comparaison

\* Pour un **pré-traitement H<sub>2</sub>S/siloxanes efficace** avant upgrade, **PTC System - SOLUPOL®** peut réduire l'usure des membranes/adsorbants et optimiser les coûts de remplacement.

\* Pour un **upgrade complet vers biométhane 98 %+**, il faut intégrer **compression & séparation CO<sub>2</sub>** (lavage aux amines, membranes, ou PSA), ce qui représente la large majorité du **CAPEX & OPEX global**.

\* Les économies d'échelle sont **très significatives** : doubler la capacité ne double pas les coûts, surtout CAPEX amorti.

---

Si tu as besoin d'une **version prête à intégrer dans une note technique DREAL**, d'un **tableau synthèse CAPEX/OPEX** ou d'un **dimensionnement rapide à partir d'un débit de biogaz**, je peux te le préparer quand tu veux.

---

## Tableau de synthèse CAPEX / OPEX purification & upgrade du biogaz

## Hypothèses communes

- Biogaz brut : 55–65 % CH<sub>4</sub>
  - Installation standard Europe / France
  - Hors génie civil lourd et raccordement réseau
  - Ordres de grandeur issus de retours industriels et littérature technique
- 

### 1.- Comparatif CAPEX

Technologie	Fonction principale	CAPEX typique	Référence unitaire
PTC SYSTEM – SOLUPOL®	Désulfuration + odeurs + traces acides	300 – 700 €/Nm <sup>3</sup> /h	Module de lavage chimique
Water Scrubbing	Élimination CO <sub>2</sub>	1 000 – 1 800 €/Nm <sup>3</sup> /h	Unité complète
PSA	Élimination CO <sub>2</sub>	1 300 – 2 000 €/Nm <sup>3</sup> /h	Unité complète
Membranes	Élimination CO <sub>2</sub>	1 200 – 1 600 €/Nm <sup>3</sup> /h	Multi-étages
Lavage chimique (amines)	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> S	1 600 – 2 500 €/Nm <sup>3</sup> /h	Absorption + régénération

#### Lecture DREAL :

PTC System représente **un CAPEX très réduit**, car il **ne remplace pas l'upgrade CO<sub>2</sub>**, mais **sécurise et optimise** les technologies aval notamment la valorisation d'un CO<sub>2</sub> pur.

---

### 2.- Comparatif OPEX – énergie

Technologie	Consommation électrique
PTC SYSTEM – SOLUPOL®	<b>Faible</b> (pompes uniquement)
Water Scrubbing	0,40 – 0,50 kWh/Nm <sup>3</sup>
PSA	0,16 – 0,35 kWh/Nm <sup>3</sup>
Membranes	~0,25 – 0,30 kWh/Nm <sup>3</sup>
Lavage chimique	0,05 – 0,25 kWh/Nm <sup>3</sup> + chaleur

---

### 3.- Comparatif OPEX – consommables & maintenance

Technologie	OPEX annuel typique*	Nature dominante
PTC SYSTEM – SOLUPOL®	<b>30 – 45 k€/an</b>	Réactif chimique

Technologie	OPEX annuel typique*	Nature dominante
Water Scrubbing	20 – 25 k€/an	Eau, énergie
PSA	20 – 30 k€/an	Adsorbants, énergie
Membranes	12 – 25 k€/an	Remplacement membranes
Lavage chimique	50 – 80 k€/an	Solvants + énergie

\* pour installations ~50–80 Nm<sup>3</sup>/h biométhane

---

#### 4.- Coût global ramené au Nm<sup>3</sup> de biogaz

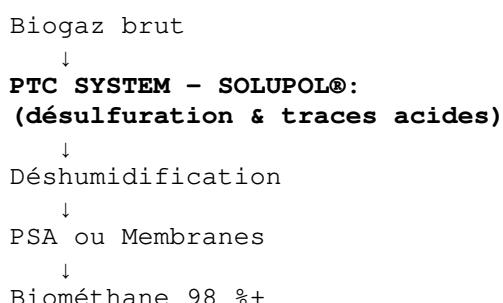
Technologie	Coût total estimatif
<b>PTC SYSTEM – SOLUPOL® (pré-traitement)</b>	<b>0,15 – 0,20 €/Nm<sup>3</sup></b>
Water Scrubbing	0,13 – 0,16 €/Nm <sup>3</sup>
PSA	0,20 – 0,40 €/Nm <sup>3</sup>
Membranes	0,20 – 0,30 €/Nm <sup>3</sup>
Lavage chimique	0,28 – 0,35 €/Nm <sup>3</sup>

---

#### Lecture technique & réglementaire (DREAL)

- **PTC SYSTEM – SOLUPOL®:**
    - Technologie de **traitement des polluants critiques** (H<sub>2</sub>S, mercaptans, siloxanes, odeurs)
    - **Faible consommation énergétique**
    - **Réduction majeure des risques corrosion / encrassement**
    - **Allongement de la durée de vie** des PSA/membranes
  - **PSA / Membranes / Scrubbers :**
    - Technologies **indispensables pour l'atteinte du biométhane réseau**
    - Sensibles à la qualité du gaz brut
    - OPEX fortement dépendant du **niveau de pré-traitement**
- 

#### Schéma économique recommandé (best practice)



**Résultat :**

- ✓ OPEX global réduit
  - ✓ Stabilité réglementaire
  - ✓ Moins d'arrêts non planifiés
  - ✓ Meilleure acceptabilité DREAL / ICPE
- 

## **SOLUPOL vs Charbon Actif vs Eau de Javel.**

### **Tableau adapté pour une note technique / DREAL.**

---

#### **1.- Principes de traitement**

<b>Réactif</b>	<b>Mécanisme</b>	<b>Polluants ciblés</b>	<b>Remarques principales</b>
SOLUPOL®	Modification chimique (solution liquide)	H <sub>2</sub> S, mercaptans, odeurs, autres traces acides	Réactif liquide prêt à l'emploi, dosage précis, transforme H <sub>2</sub> S en composé inodore biodégradable en STEP. Pas de surdosage massif nécessaire.
Charbon actif	Adsorption physique (surface poreuse)	H <sub>2</sub> S, mercaptans, siloxanes, autres traces organiques	Capacité limitée, saturation rapide si gaz chargé en H <sub>2</sub> S . Nécessite remplacement ou régénération.
Eau de Javel (NaClO)	Oxydation chimique	H <sub>2</sub> S, mercaptans, odeurs	Forte oxydation, nécessite surdosage pour garantir traitement complet. Génère chlore résiduel si surdosé.

---

#### **2.- Efficacité de traitement**

<b>Réactif</b>	<b>Efficacité H<sub>2</sub> S</b>	<b>Efficacité mercaptans</b>	<b>Stabilité &amp; fiabilité</b>
SOLUPOL®	>99 %	>98 %	Très stable, peu sensible aux pics de H <sub>2</sub> S
Charbon actif	70–95 %	60–90 %	Dépend du débit et saturation du lit
Eau de Javel	85–95 %	70–90 %	Dépend du surdosage et du pH du biogaz

Remarque : **SOLUPOL®** permet de traiter des charges H<sub>2</sub>S très élevées sans surdosage massif, contrairement à la Javel.

---

### 3.- Consommation chimique / ratio

Réactif	Dose théorique	Dose pratique	Commentaire
SOLUPOL®	1 kg → traite 1 Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> S (2000 ppm H <sub>2</sub> S + 3000 ppm mercaptan)	≈1 kg/Nm <sup>3</sup>	Economique, pas d'excès nécessaire
Eau de Javel	1 kg → traite 0,2–0,25 Nm <sup>3</sup>	5× surdosage nécessaire	Coût chimique élevé
Charbon actif	1 kg → capacité limitée (variable selon qualité et humidité)	Remplacement fréquent	Déchets solides à gérer

---

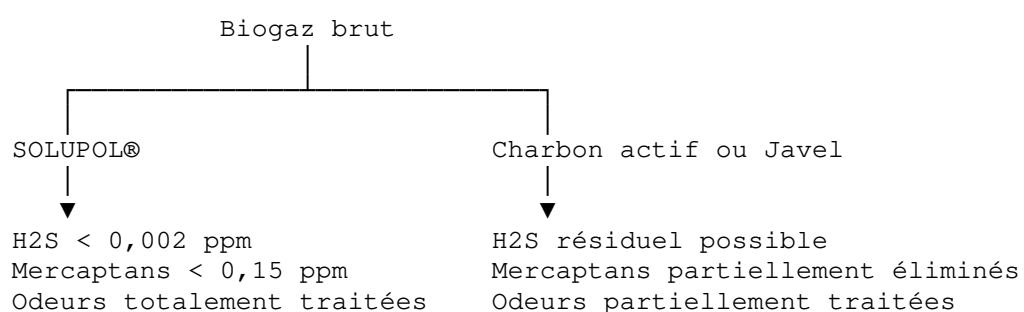
### 4.- CAPEX & OPEX indicatifs pour désulfuration 50–80 Nm<sup>3</sup>/h

Réactif	CAPEX unité	OPEX annuel	Consommables / remarques
SOLUPOL®	150 000 – 300 000€	6–10 k€/an	Réactif liquide, pompe & module compact
Charbon actif	120 000 – 250 000€	40–70 k€/an	Lit de charbon + maintenance régulière
Eau de Javel	80 000 – 200 000 €	30–65 k€/an	Stockage Javel, surdosage → corrosion possible

Lecture DREAL : **SOLUPOL® = CAPEX moyen, OPEX optimisé, faible maintenance**, idéal pour stations où le H<sub>2</sub>S est élevé et variable.

---

### 5.- Schéma simplifié de comparaison



## Conclusion technique

- **SOLUPOL®:**
  - Très efficace sur H<sub>2</sub>S et mercaptans
  - Pas de surdosage
  - Stable sur pics de concentration
  - Faible impact environnemental et OPEX modéré
- **Charbon actif :**
  - Simple, pas de chimie liquide
  - Efficace mais **capacité très limitée**, remplacement régulier
- **Eau de Javel :**
  - Solution chimique classique
  - Nécessite **surdosage**, résidus chimiques à traiter en centre agréé et corrosion
  - OPEX plus élevé