

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

- * H₂S et autres composés soufrés
- * Siloxanes
- * NH₃ organochlorés/fluorés
- * H₂O (eau)

Le CO₂ 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 CO₂ dans une phase suivante de la chaîne de purification.

Avantages

- **Très bonne élimination des H₂S 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 CH₄** 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 CO₂ (et une partie du H₂S).

Avantages

- ✓ Efficace pour CO₂ ($\approx > 97\%$ CH₄ 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 H₂S, 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 H₂S doivent souvent être **prétraitées** avant PSA
 - * Complexité et perte de méthane dans certaines configurations
-

4. Séparation membranaire

Principe

Membranes semi-perméables laissent passer CO₂, H₂O et certains contaminants, retenant le CH₄

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 CO₂ et H₂S.

Avantages

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

Inconvénients

- * Régénération énergétique coûteuse
 - * Pas de séparation CO₂ – H₂S
 - * Solvants/agents chimiquement actifs à gérer avec précaution
-

Comparaison rapide

Technologie	CO ₂ élimination	H ₂ S / odeur	CH ₄ pureté	Complexité / Coût
PTC System SOLUPOL®	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

* H₂S majoritairement traité en étapes préliminaires ou via adsorbants dédiés.

Quand choisir SOLUPOL® vs autres technologies ?

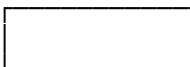
✓ **SOLUPOL® est particulièrement adapté lorsque l'objectif prioritaire est l'élimination ciblée des composés soufrés, des odeurs, des siloxanes et autres traces à caractère acide indésirables sur des flux de biogaz variés (agricole, boues, déchets) sans élimination du CO₂ que sera purifié dans une autre technologie (par exemple : lavage aux amines ou PSA/membranes)**

* Si l'objectif est d'atteindre une qualité biométhane proche des standards réseau ($\approx 98\text{-}99\%$ CH₄) ou de produire du Bio-CNG, des technologies comme **PSA, membranes ou scrubbers à large spectre** sont généralement plus adaptées.

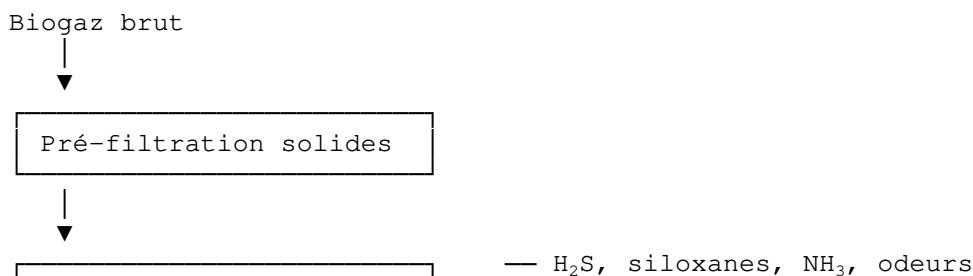
✓ Dans les systèmes intégrés, SOLUPOL® peut être utilisé en **prétraitement (désulfuration + odeurs)** avant un **upgrade CO₂ (PSA/membrane)** pour optimiser la longévité des installations et la qualité finale du biométhane.

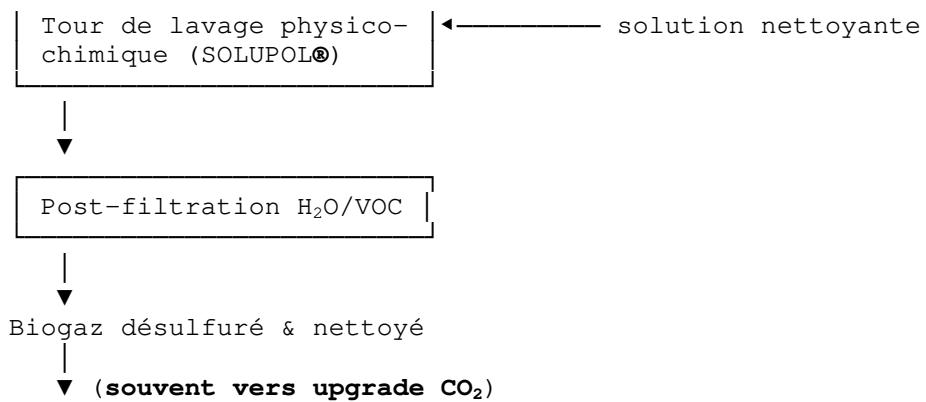
Schéma technique comparatif détaillé Etapes de flux de gaz et équipements associés pour chaque solution

Légende des symboles

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

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

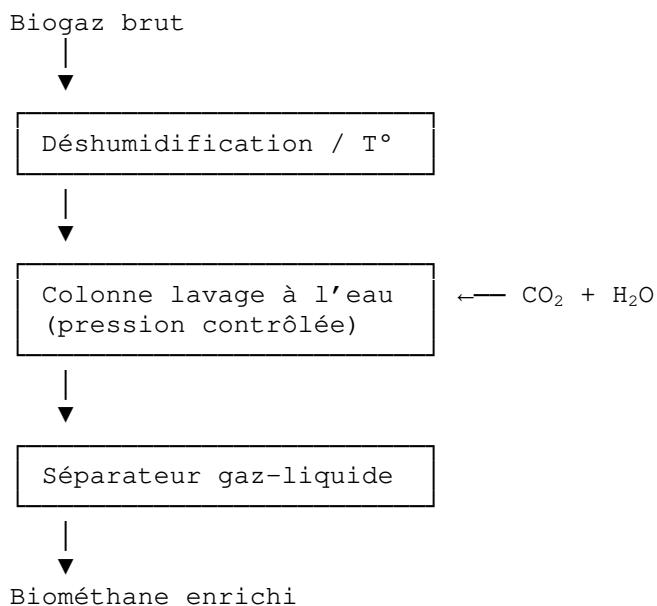




Rôle principal : élimination fine des composés soufrés, odeurs et traces acides.

Qualité sortie typique : biogaz propre, H₂S très bas, mais surtout **CO₂ encore présent** pour valorisation ultérieure → **pas du biométhane 98 %+** sans étapes supplémentaires.

2.- Water Scrubbing (lavage à l'eau)

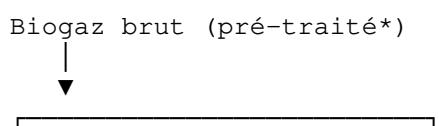


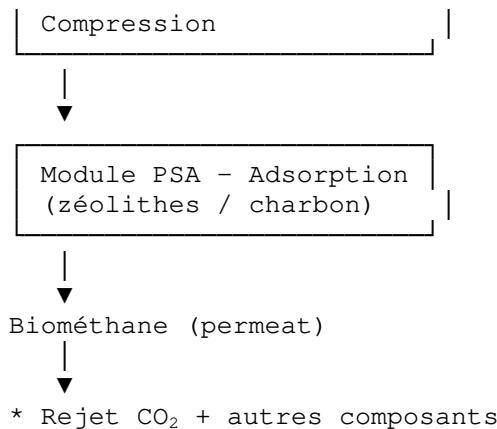
Rôle principal : extraction du CO₂ par absorption.

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

* **Pas de séparation complète de H₂S**

3.- PSA (Pressure Swing Adsorption)



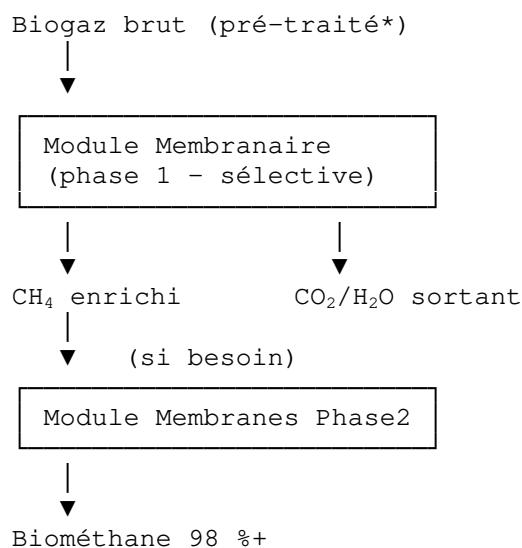


Pré-traité typiquement = H₂S réduit (charbon actif, scrubber) + déshumidification.

Points forts : très bon enrichissement CH₄

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

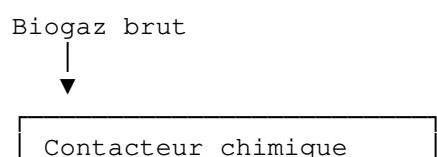
4.- Membranes semi-perméables



Points forts : compact, pas beaucoup de chimie.

Limite : performance liée pression/température.

5.- Lavage chimique (amines, solvants)



(amines / solvants)

\downarrow

$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$ absorbés

\downarrow

Régénérateur de solvants

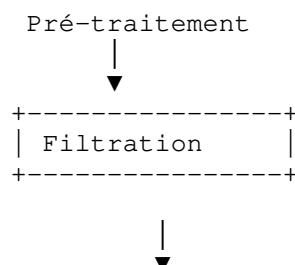
\downarrow

Biométhane enrichi

Rôle principal : forte capacité d'absorption $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ donc pas de purification du CO_2 .

Note : régénération énergétique coûteuse.

Comparatif schématique — étapes clés



Technologie	Désulfuration	CO_2 Elimination	Biométhane
SOLUPOL®	★★★★★	★★★★★	★★★★★ necessite UP grade
Water Scrubbing	★★★★★	★★★★★	★★★★★
PSA	★★★★★ *	★★★★★	★★★★★
Membranes	★★★★★ *	★★★★★	★★★★★ / ★★★★★
Lavage chimique	★★★★★	★★★★★	★★★★★

★ = efficacité relative (1 à 5)

* nécessite pré-désulfuration (SOLUPOL ou charbon actif)

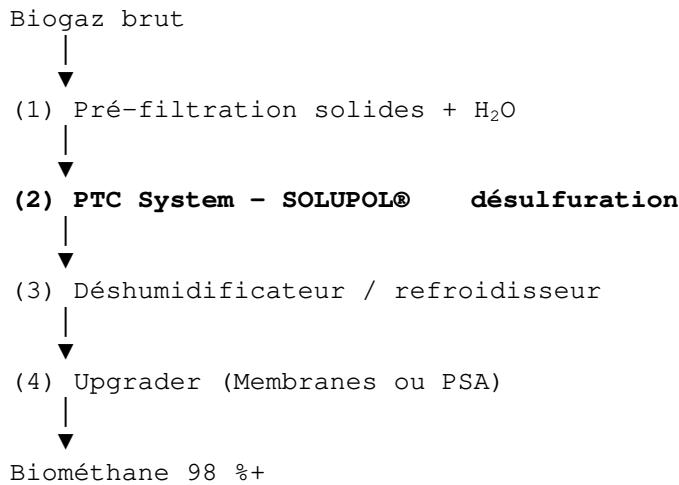
Notes d'interprétation

PTC System - SOLUPOL® est excellent en **désulfuration & traitement des traces acides** mais **ne remplace pas** à lui seul une unité d'upgrade $\text{CO}_2 \rightarrow$ biométhane.

Les méthodes d'**upgrade** (**PSA, membranes, scrubber**) sont conçues pour produire du **biométhane qualités réseaux / GNV ($\geq 98\% \text{ CH}_4$)**.

Elles nécessitent toujours un **pré-traitement du biogaz** ($\text{H}_2\text{S}, \text{H}_2\text{O}$, 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 ³ /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 ³ /h biométhane (forte régénération)
PSA / membranes (autres sources)	1 000–2 000 €/Nm ³ /h biogaz	Exemple cas 1 000 Nm ³ /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 (CO₂ removal + compression + finitions).

2.- Consommation énergétique (OPEX – énergie)

Technologie	Énergie consommée (indicative)
Membranes (upgrade)	~0,26 kWh/Nm ³ biogaz brut
Water Scrubbing	~0,4–0,5 kWh/Nm ³ biogaz
PSA	~0,16–0,35 kWh/Nm ³ biogaz
Lavage chimique/amines	~0,05–0,25 kWh/Nm ³ (solvants) + chaleur pour régénération (forte)
PTC System SOLUPOL®	~ 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
PTC System SOLUPOL®	30 000–45 000 € / an	Pour ~1 000 Nm ³ /h biométhane (consommables + maintenance)
Membranes	11 400–22 000 € / an	Pour ~60 Nm ³ /h biométhane (consommables + maintenance)
PSA	20 000–22 000 € / an	Similaire pour ~60 Nm ³ /h
Water Scrubbing	20 000–25 000 € / an	
Lavage chimique	53 000–58 000 € / an	Plus coûteux consommables et énergie
Lavage chimique (amines)	12 000–15 000 € / an (variante)	
PSA / membranes (grande échelle)	25 000–56 000 € / an	Selon taille ~1 000 Nm ³ /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 H₂S, 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 **H₂S/CO₂**.
-

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 ³ biogaz traité (approx.)
SOLUPOL®	0,15–0,20 €/Nm ³
PSA (global)	0,25–0,44 €/Nm ³
Water Scrubbing	0,13–0,16 €/Nm ³
Membranes	0,22–0,27 €/Nm ³
Lavage chimique	0,28–0,35 €/Nm ³
PSA (littérature)	0,08–0,38 €/Nm ³ 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* (H₂S, 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 CO₂ (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 (€/Nm³/h) :**
 - Water Scrubbing ~1 000–1 800 €/Nm³/h
 - PSA ~1 300–2 000 €/Nm³/h
 - Membranes ~1 300–1 400 €/Nm³/h
 - **OPEX annuel pour installations moyennes :**
 - ~10 000–60 000 € selon technologie et taille
 - **Énergie consommée par Nm³ biogaz brut traité :**
 - Membranes ~0,26 kWh/Nm³
 - Water Scrubbing ~0,4–0,5 kWh/Nm³
 - PSA ~0,16–0,35 kWh/Nm³
 - **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 H₂S/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 CO₂** (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 % CH₄
 - 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 ³ /h	Module de lavage chimique
Water Scrubbing	Élimination CO ₂	1 000 – 1 800 €/Nm ³ /h	Unité complète
PSA	Élimination CO ₂	1 300 – 2 000 €/Nm ³ /h	Unité complète
Membranes	Élimination CO ₂	1 200 – 1 600 €/Nm ³ /h	Multi-étages
Lavage chimique (amines)	CO ₂ + H ₂ S	1 600 – 2 500 €/Nm ³ /h	Absorption + régénération

Lecture DREAL :

PTC System représente **un CAPEX très réduit**, car il ne remplace pas l'upgrade CO₂, mais **sécurise et optimise** les technologies aval notamment la valorisation d'un CO₂ pur.

2.- Comparatif OPEX – énergie

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

3.- Comparatif OPEX – consommables & maintenance

Technologie	OPEX annuel typique*	Nature dominante
PTC SYSTEM – SOLUPOL®	30 – 45 k€/an	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 Nm³/h biométhane

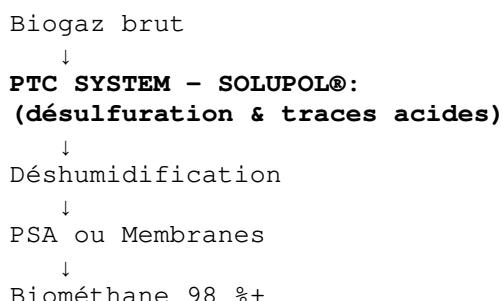
4.- Coût global ramené au Nm³ de biogaz

Technologie	Coût total estimatif
PTC SYSTEM – SOLUPOL® (pré-traitement)	0,15 – 0,20 €/Nm³
Water Scrubbing	0,13 – 0,16 €/Nm ³
PSA	0,20 – 0,40 €/Nm ³
Membranes	0,20 – 0,30 €/Nm ³
Lavage chimique	0,28 – 0,35 €/Nm ³

Lecture technique & réglementaire (DREAL)

- **PTC SYSTEM – SOLUPOL®:**
 - Technologie de **traitement des polluants critiques** (H₂S, 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

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

2.- Efficacité de traitement

Réactif	Efficacité H₂ S	Efficacité mercaptans	Stabilité & fiabilité
SOLUPOL®	>99 %	>98 %	Très stable, peu sensible aux pics de H ₂ 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 H₂S très élevées sans surdosage massif, contrairement à la Javel.

3.- Consommation chimique / ratio

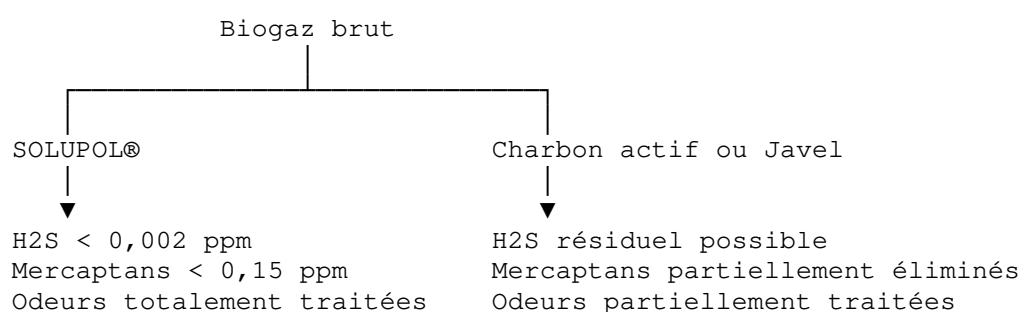
Réactif	Dose théorique	Dose pratique	Commentaire
SOLUPOL®	1 kg → traite 1 Nm ³ H ₂ S (2000 ppm H ₂ S + 3000 ppm mercaptan)	≈1 kg/Nm ³	Economique, pas d'excès nécessaire
Eau de Javel	1 kg → traite 0,2–0,25 Nm ³	5× surdosage nécessaire	Coût chimique élevé
Charbon actif	1 kg → capacité limitée (variable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

4.- CAPEX & OPEX indicatifs pour désulfuration 50–80 Nm³/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 H₂S est élevé et variable.

5.- Schéma simplifié de comparaison



Conclusion technique

- **SOLUPOL®:**
 - Très efficace sur H₂S 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