

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 CO_2 (et une partie du H_2S).

Avantages

- ✓ Efficace pour CO_2 ($\approx > 97\%$ CH_4 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_2S , 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_2S doivent souvent être **prétraitées** avant PSA
 - * Complexité et perte de méthane dans certaines configurations
-

4. Séparation membranaire

Principe

Membranes semi-perméables laissent passer CO_2 , H_2O et certains contaminants, retenant le CH_4

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 ?

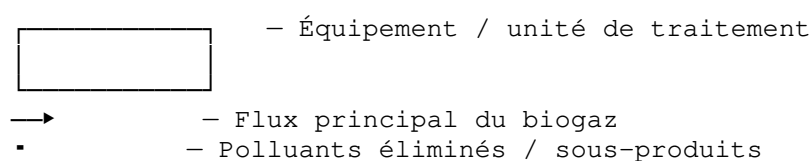
✓ **SOLUPOL® est particulièrement adapté** lorsque l'objectif prioritaire est **l'élimination ciblée des composés soufrés, des odeurs, des siloxanes** et autres traces à caractère acide indésirables sur des flux de biogaz variés (agricole, boues, déchets) sans élimination du CO₂ que sera purifié dans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

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

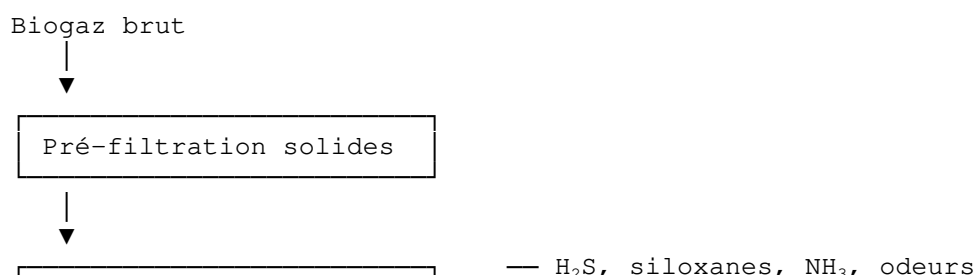
✓ **Dans les systèmes intégrés, SOLUPOL® peut être utilisé en prétraitement (désulfuration + odeurs) avant un upgrade CO₂ (PSA/membrane)** pour optimiser la longévité des installations et la qualité finale du biométhane.

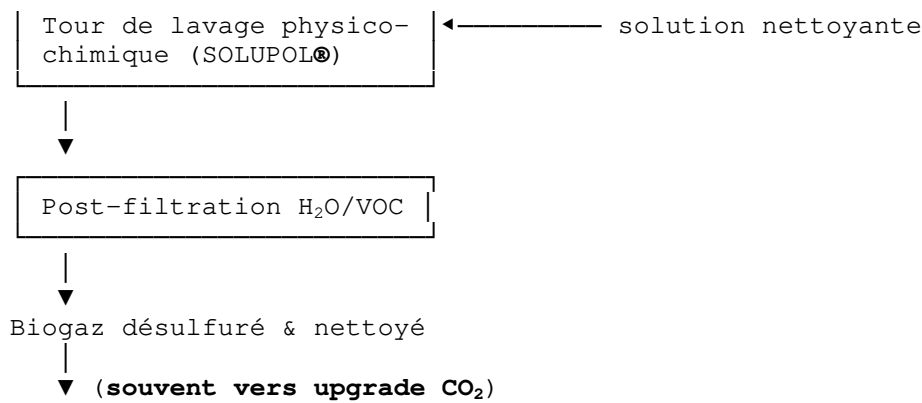
Schéma technique comparatif détaillé Etapes de flux de gaz et équipements associés pour chaque solution

Légende des symboles



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

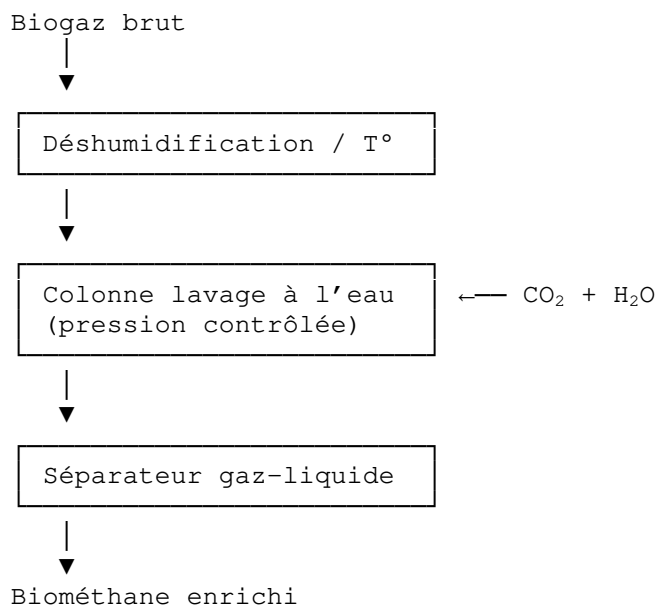




Rôle principal : *élimination fine des composés soufrés, odeurs et traces acides.*

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)

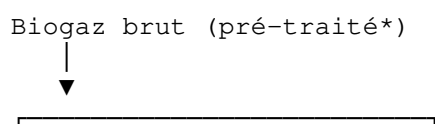


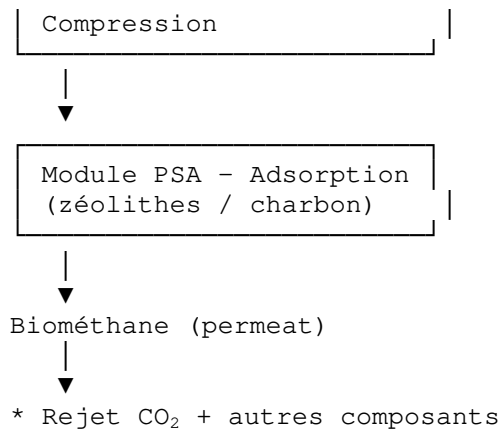
Rôle principal : *extraction du CO₂ par absorption.*

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

*** Pas de séparation complète de H₂S**

3.- PSA (Pressure Swing Adsorption)



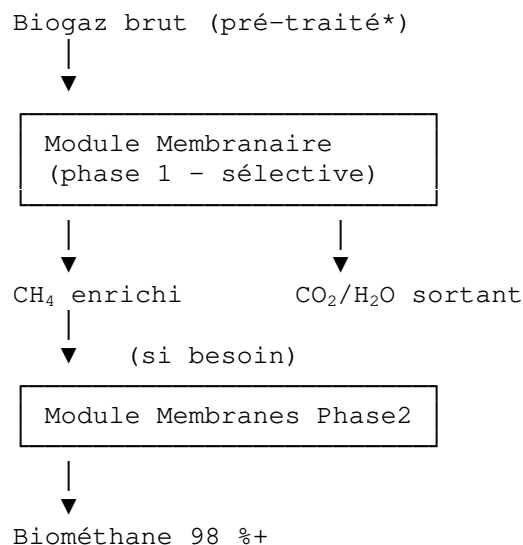


Pré-traité typiquement = H₂S réduit (charbon actif, scrubber) + déshumidification.

Points forts : très bon enrichissement CH₄

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

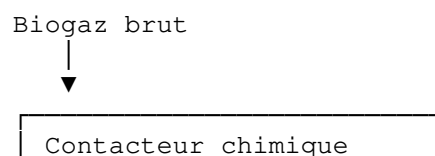
4.- Membranes semi-perméables

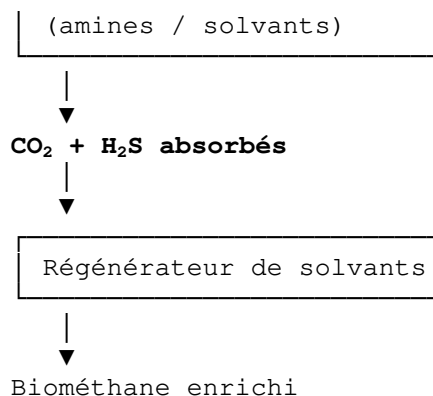


Points forts : compact, pas beaucoup de chimie.

Limite : performance liée pression/température.

5.- Lavage chimique (amines, solvants)

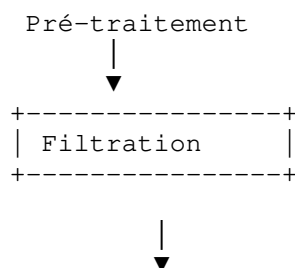




Rôle principal : forte capacité d'absorption CO₂/H₂S donc pas de purification du CO₂.

Note : régénération énergétique coûteuse.

Comparatif schématique — étapes clés



Technologie	Désulfuration	CO ₂ Elimination	Biométhane
SOLUPOL®	★★★★★	★☆☆☆☆	★★★★☆ nécessite UP grade
Water Scrubbing	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
PSA	★★★☆☆ *	★★★★☆	★★★★★
Membranes	★★★☆☆ *	★★★★☆	★★★★☆ / ★★★★★
Lavage chimique	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆

★ = efficacité relative (1 à 5)

* nécessite pré-désulfuration (SOLUPOL ou charbon actif)

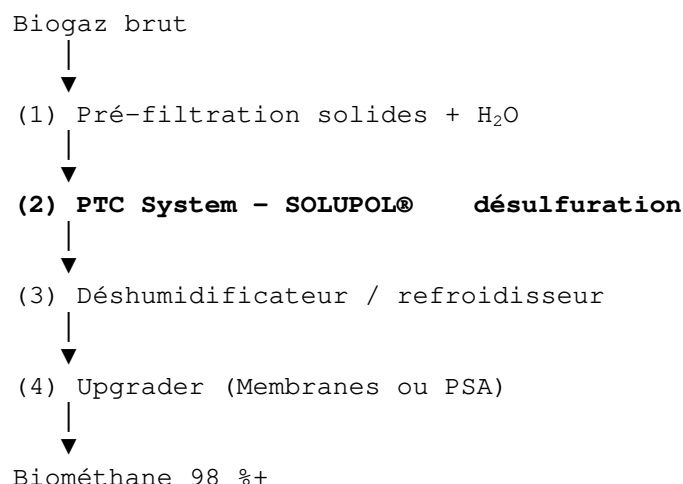
Notes d'interprétation

PTC System - SOLUPOL® est excellent en **désulfuration & traitement des traces acides** mais **ne remplace pas** à lui seul une unité d'upgrade CO₂ → biométhane.

Les méthodes d'**upgrade (PSA, membranes, scrubber)** sont conçues pour produire du **biométhane qualités réseaux / GNV (≥ 98 % CH₄)**.

Elles nécessitent toujours un **pré-traitement du biogaz** (H₂S, H₂O, 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)

Biogaz brut

↓

PTC SYSTEM – SOLUPOL®:
(désulfuration & traces acides)

↓

Déshumidification

↓

PSA ou Membranes

↓

Biométhane 98 %+

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 H ₂ 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

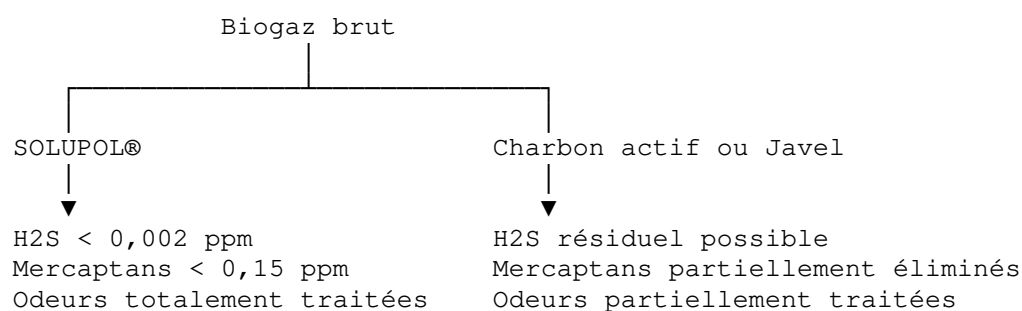
Réactif	Dose théorique	Dose pratique	Commentaire
SOLUPOL®	1 kg → traite 1 Nm ³ H ₂ S (2000 ppm H ₂ S + 3000 ppm mercaptan)	≈1 kg/Nm ³	Economique, pas d'excès nécessaire
Eau de Javel	1 kg → traite 0,2–0,25 Nm ³	5× surdosage nécessaire	Coût chimique élevé
Charbon actif	1 kg → capacité limitée (variable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