

Optimisation du fonctionnement d'un épurateur pour la méthanisation

Victor Bertret ^{1, 2, 3}, Arnaud Tournier ¹

¹Purecontrol, 68 Av. Sergent Maginot, Rennes, FRANCE {prenom}.{nom}@purecontrol.com

²SATIE, ENS Rennes, CNRS, Bruz, FRANCE {prenom}.{nom}@ens-rennes.fr

³IRMAR, Université Rennes 1, CNRS, Rennes, FRANCE {prenom}.{nom}@univ-rennes1.fr

5 mars 2024

ROAD_EF



- 1 Méthanisation du biogaz
- 2 Présentation et objectif de l'étude
- 3 Modélisation du problème
 - Identification des dynamiques
 - Formulation du problème
 - Résolution du problème
- 4 Résultats
- 5 Conclusion



Plan

- 1 Méthanisation du biogaz
- 2 Présentation et objectif de l'étude
- 3 Modélisation du problème
- 4 Résultats
- 5 Conclusion



Méthanisation du Biogaz

- **La méthanisation** est un processus de conversion de la biomasse en gaz.
- Solution prometteuse pour les **micro-réseaux industriels** :
 - Sources d'énergie renouvelable/Valorisation déchets.
 - Assimilable à une batterie.
- **Évolution** rapide (Source GRDF).



Figure – Unité de méthanisation.

Phases de la méthanisation

La **méthanisation** se déroule en deux phases distinctes : **la production** et **la valorisation du biogaz**.

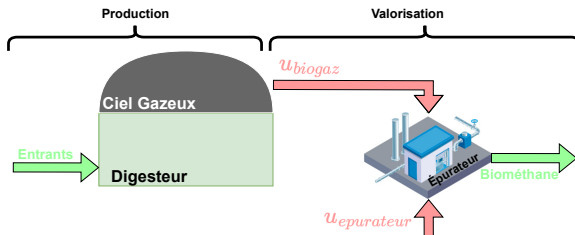


Figure – Différentes étapes de la méthanisation avec valorisation par épuration.

Dans **la production**, la biomasse est convertie en biogaz dans un digesteur.

La **valorisation** du biogaz peut prendre différentes formes : **épuration** ou **cogénération**.



Plan

- 1 Méthanisation du biogaz
- 2 Présentation et objectif de l'étude**
- 3 Modélisation du problème
- 4 Résultats
- 5 Conclusion



Objectif de l'étude

- Étude sur une **installation réelle** de méthanisation en collaboration avec Nevezus en Bretagne dans le cadre de *Biogaz-IA*.
- Optimisation énergétique du fonctionnement de l'**épurateur**.
- **Objectifs :**
 - **Maximiser** les **revenus** de revente du biométhane.
 - **Minimiser** les **coûts énergétiques** de l'épurateur.
- Contraintes de **sécurité** et de **bon fonctionnement**.



Solution Purecontrol pour l'Optimisation Énergétique

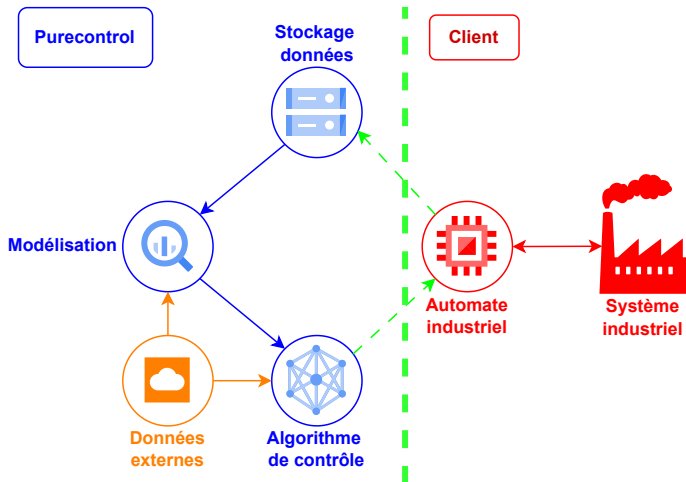


Figure – Schéma explicatif du fonctionnement de Purecontrol.

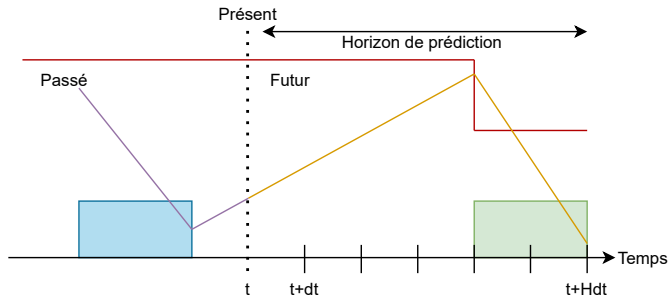
- 1 Méthanisation du biogaz
- 2 Présentation et objectif de l'étude
- 3 Modélisation du problème**
 - Identification des dynamiques
 - Formulation du problème
 - Résolution du problème
- 4 Résultats
- 5 Conclusion



Méthodologie employée : Model Predictive Control (MPC)

Qu'est-ce que le MPC ?

Le Model Predictive Control (MPC) prédit le comportement futur du système en utilisant un modèle dynamique, permettant ainsi la génération de commandes optimales.



Recalcul à chaque pas de temps $dt \Rightarrow$ **adaptation dynamique** variations système.

- 1 Méthanisation du biogaz
- 2 Présentation et objectif de l'étude
- 3 Modélisation du problème**
 - **Identification des dynamiques**
 - Formulation du problème
 - Résolution du problème
- 4 Résultats
- 5 Conclusion



Equation dynamique à modéliser :

$$V[t + dt] = V[t] + (D[t] - u_{biogaz}[t])dt$$

avec

- dt , le pas de temps de prédiction en heures.
- $V[t]$, le volume du ciel gazeux au temps t en m^3 .
- $D[t]$, le débit de production de biogaz au temps t en m^3/h .
- $u_{biogaz}[t]$, le débit de biogaz vers l'épurateur au temps t en m^3/h .

⇒ Nécessité d'avoir un **modèle** afin de prédire la **production de biogaz** dans le futur.



Modélisation du débit de production de biogaz

Expérimentation de nombreuses architectures

- Utilisation des données disponibles : Agitateur, Entrants, ...
- Architecture ARX, FIR, OE, ...

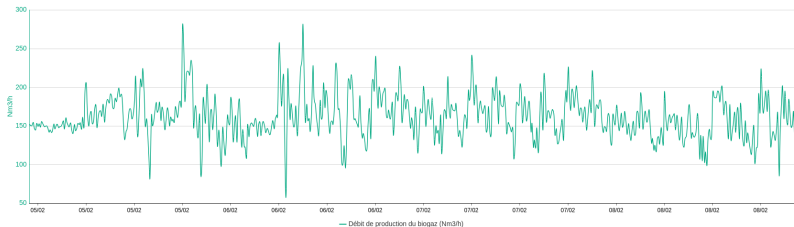


Figure – Débit de production de Biogaz sur une période de 5 jours.

Problème : Influence du pouvoir méthanogène (**très stochastique**) des entrants.

Solution : Utilisation de la **médiane glissante** sur les dernières 24h.



- 1 Méthanisation du biogaz
- 2 Présentation et objectif de l'étude
- 3 Modélisation du problème**
 - Identification des dynamiques
 - **Formulation du problème**
 - Résolution du problème
- 4 Résultats
- 5 Conclusion



Données :

- H , horizon de résolution du problème.
- $\{t_1, \dots, t_H\}$, pas de temps de prédiction du MPC espacés de manière uniforme de dt .

Variables :

- $\forall i \in \{1, \dots, H\}$, $u_{\text{epurateur}}[i] \in \{0, 1\} = 1$ si l'épurateur est allumée au temps t_i .
- $\forall i \in \{1, \dots, H\}$, $u_{\text{biogaz}}[i] \in \mathbb{R}^+$, le débit de biogaz envoyé à l'épurateur au temps t_i .
- $\forall i \in \{1, \dots, H\}$, $v_{\text{ciel}}[i] \in \mathbb{R}^+$, le niveau du ciel gazeux au temps t_i .



Dynamique du ciel gazeux

$$\forall i \in \{1, \dots, H-1\}, v_{ciel}[i+1] = v_{ciel}[i] + (\bar{D} - u_{biogaz}[i])dt$$

Niveau min/max ciel gazeux (V_{min} et $V_{max}[i]$)

$$\forall i \in \{1, \dots, H\}, V_{min} \leq v_{ciel}[i] \leq V_{max}[i]$$

Débit min/max du biogaz (D_{max} et D_{min})

$$\forall i \in \{1, \dots, H\}, D_{min}u_{epurateur}[i] \leq u_{biogaz}[i] \leq D_{max}u_{epurateur}[i]$$

Conditions initiales : Fixage de $u_{biogaz}[1]$, $u_{epurateur}[1]$, $v_{ciel}[1]$



Contraintes opérationnelles de l'épurateur (conditions réelles)

Temps min d'activation H_a^{min} et désactivation H_d^{min}

- $\forall i \in \{1, \dots, H\}, \forall l \in \{1, \dots, H_a^{min}\}, u_{\text{epurateur}}[i] \geq u_{\text{epurateur}}[i-1] - u_{\text{epurateur}}[i-1-l]$
- $\forall i \in \{1, \dots, H\}, \forall l \in \{1, \dots, H_d^{min}\}, u_{\text{epurateur}}[i] \geq 1 - (u_{\text{epurateur}}[i-1-l] - u_{\text{epurateur}}[i-1])$

Temps max d'activation H_a^{max} et désactivation H_d^{max}

- $\forall i \in \{1, \dots, H - H_a^{max}\}, \forall p \in \{1, \dots, |P|\}, \sum_{j=i}^{H_a^{max}+i} u_{\text{epurateur}}[j] \leq H_a^{max} - 1$
- $\forall i \in \{1, \dots, H - H_d^{max}\}, \forall p \in \{1, \dots, |P|\}, \sum_{j=i}^{H_d^{max}+i} u_{\text{epurateur}}[j] \geq 1$



Contraintes opérationnelles sur le débit de biogaz (conditions réelles)

Nouvelle variable : $\forall i \in \{2, \dots, H\}, u_{start}[i] \in \{0, 1\} = 1$ si l'épurateur s'allume au temps t_i .

Démarrage à D_{min} de l'épurateur

$$\forall i \in \{1, \dots, H\}, u_{biogaz}[i] \leq D_{min} u_{start}[i] + D_{max} (u_{epurateur}[i] - u_{start}[i])$$

Variation maximum par pas de temps du débit de biogaz (D_{var}^{max})

- $\forall i \in \{1, \dots, H\}, u_{biogaz}[i+1] - u_{biogaz}[i] \leq D_{var}^{max} u_{biogaz}[i] + D_{max} (1 - (u_{epurateur}[i] - u_{start}[i]))$
- $\forall i \in \{1, \dots, H\}, u_{biogaz}[i] - u_{biogaz}[i+1] \leq D_{var}^{max} u_{biogaz}[i] + D_{max} (1 - (u_{epurateur}[i] - u_{start}[i]))$

Nombre maximum de démarrage (S_{max}) par période (H_{start})

$$\forall i \in \{1, \dots, H - H_{start}\}, \sum_{j=i}^{H_{start}+i} u_{start}[j] \leq S_{max}$$



Revenu de revente du biométhane

Contrat spéciale avec GRDF : Rachat d'une capacité nominale de biométhane (C_{max} en m^3/h) à un prix $p_{biomethane}$ puis le reste au prix du marché p_{spot}

Calcul de l'excédent et déficit par rapport à C_{max} :

$$\left[\frac{1}{H} \sum_{i=1}^H u_{biogaz}[i] \right] \alpha = C_{max} + C_{excedent} - C_{deficit}$$

avec $C_{excedent} \in \mathbb{R}^+$ et $C_{deficit} \in \mathbb{R}^+$.

Revenu de revente du biométhane :

$$r_{revenu} = (C_{max} - C_{deficit})p_{biomethane} + C_{excedent}p_{spot}$$



Coût électrique de l'épurateur avec un tarif variable $Tarif[i]$

$$r_{electricity} = \sum_{i=1}^H Tarif[i] \left(\beta_0 u_{biogaz}[i] + \beta_1 u_{epurateur}[i] \right)$$

Pénalité de démarrage :

$$r_{start} = \sum_{i=2}^H u_{start}[i]$$

Coût total :

$$r_{revenu} - r_{electricity} + \lambda r_{start}$$



- 1 Méthanisation du biogaz
- 2 Présentation et objectif de l'étude
- 3 Modélisation du problème**
 - Identification des dynamiques
 - Formulation du problème
 - **Résolution du problème**
- 4 Résultats
- 5 Conclusion



Paramètres utilisés :

- **Horizon de prédiction** : 3 jours
- **Pas de temps (dt)** : 10 minutes
- **Réévaluation (dt)** : Toutes les 10 minutes
- **Temps d'exécution maximum** : 5 minutes
- **Solveurs utilisés** : HIGHS ou SCIP

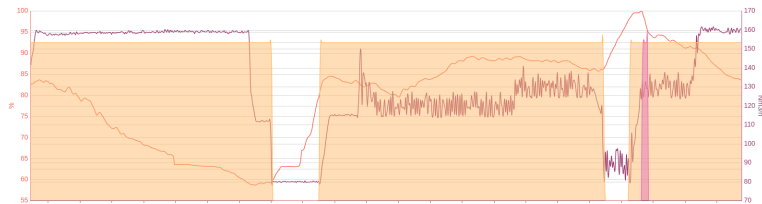
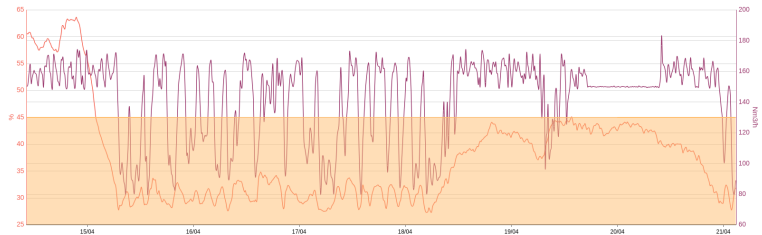


Plan

- 1 Méthanisation du biogaz
- 2 Présentation et objectif de l'étude
- 3 Modélisation du problème
- 4 Résultats**
- 5 Conclusion

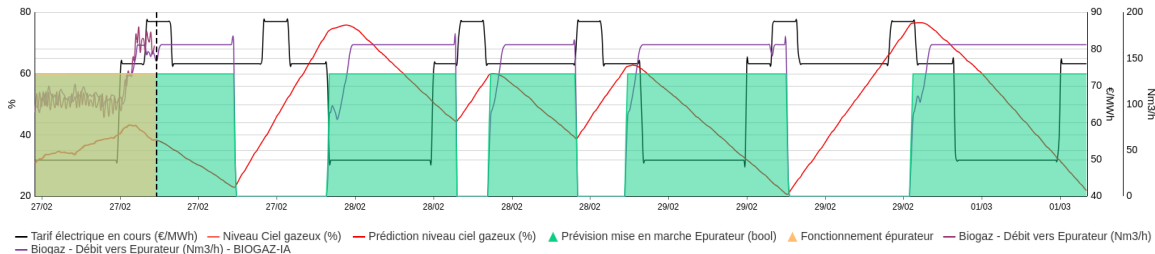


Pilotage de l'épurateur avant optimisation



— Niveau Ciel gazeux (%) — Biogaz - Débit vers Epurateur (Nm3/h) ▲ Fonctionnement épurateur ▲ Activation Torchage

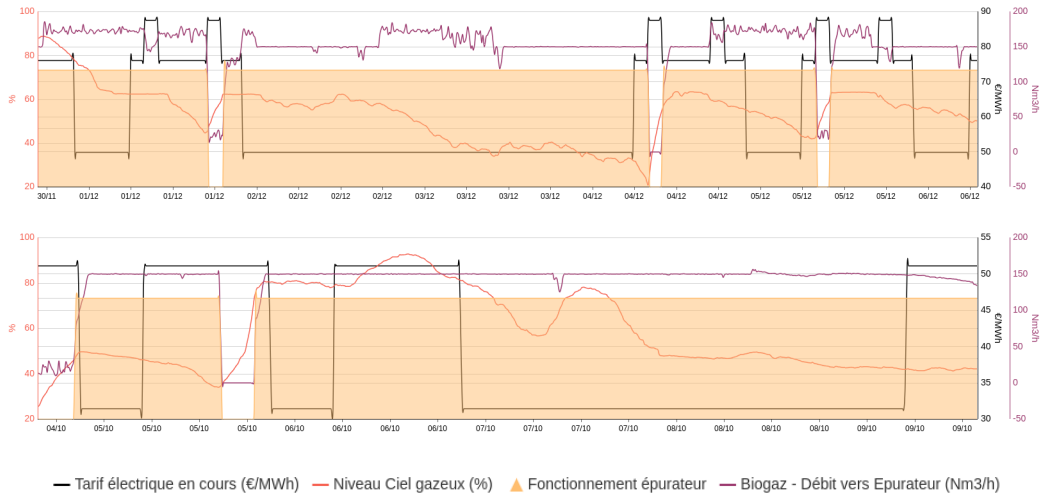
Prédiction du pilotage de l'épurateur après optimisation



- **Optimisation** du coût **énergétique**.
- **Optimisation** des revenus de **revente**.
- Contraintes de **sécurité** supplémentaires.



Pilotage de l'épurateur après optimisation



Comparaison de juillet à novembre 2023 :

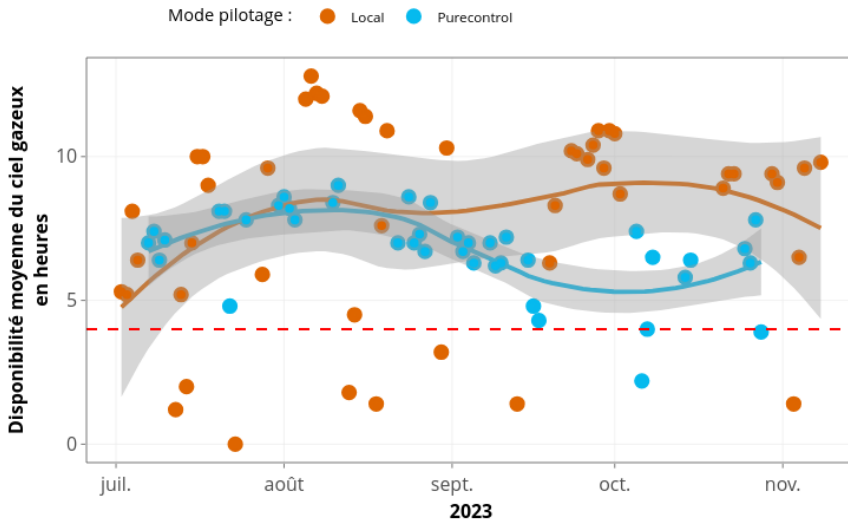
- 45 jours sous pilotage Local.
- 40 jours sous pilotage Purecontrol.

Statistiques journalières :

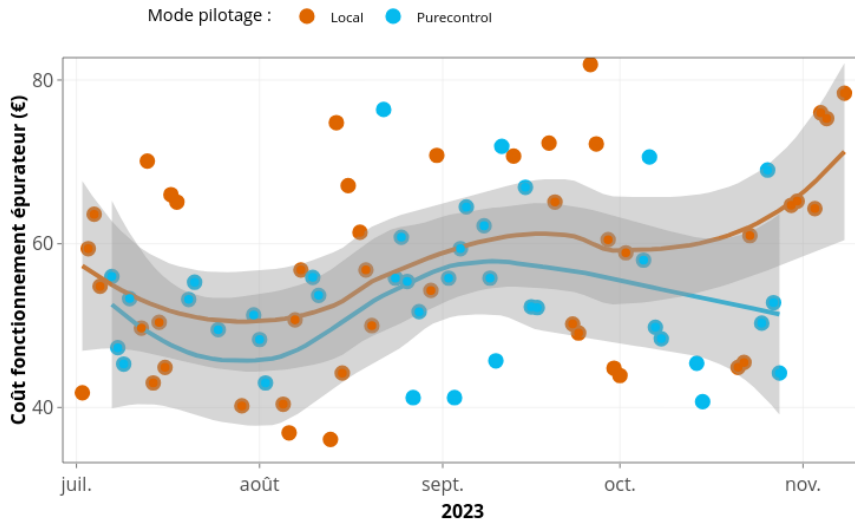
Mode de pilotage	Moyenne du niveau du ciel gazeux (%)	Nombre d'arrêts par jour	Coût fonctionnement épurateur	Rapport coût / m3 injecté
Local	39	0.7	59	0.0340
Purecontrol	49	0.8	53 (-9%)	0.0310 (-9%)



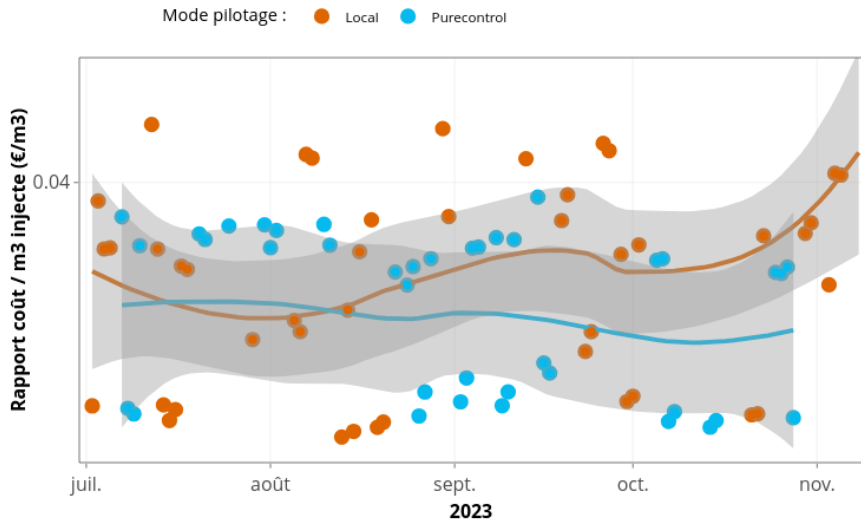
Disponibilité du ciel gazeux



Coût de fonctionnement épurateur



Injection biométhane par rapport à la consommation électrique de l'épurateur



Plan

- 1 Méthanisation du biogaz
- 2 Présentation et objectif de l'étude
- 3 Modélisation du problème
- 4 Résultats
- 5 Conclusion**



- **Contributions actuelles :**

- Pilotage d'une **installation réelle**.
- **Renforcement** de la **sécurité** et de la **stabilité** du pilotage.
- **Optimisation** des **coûts** énergétiques et maximisation des **revenus**.

- **Perspectives de recherche :**

- **Intégration** de la **stochasticité** pour une **robustesse** accrue (*améliorations en cours*).
- **Exploration** d'autres **paradigmes**, notamment l'approche SDDP (*Stochastic Dual Dynamic Programming*).
- Pilotage de **deux installations** en cours avec deux autres prévues très prochainement.



References

 Birge, J. R. (1985).
Decomposition and partitioning methods for multistage stochastic linear programs.
Operations Research, 33(5) :989–1007.

 Rawlings, J. B., Mayne, D. Q., and Diehl, M. (2017).
Model predictive control : theory, computation, and design.
Nob Hill Publishing, Madison, Wisconsin, 2nd edition edition.

 Rönsch, S., Schneider, J., Matthischke, S., Schlüter, M., Götz, M., Lefebvre, J., Prabhakaran, P., and Bajohr, S. (2016).
Review on methanation – from fundamentals to current projects.
Fuel, 166 :276–296.

 Schaaf, T., Grünig, J., Schuster, M. R., Rothenfluh, T., and Orth, A. (2014).
Methanation of co2 - storage of renewable energy in a gas distribution system.
Energy, Sustainability and Society, 4(1) :2.

