

# Projet ECO-FEV

## Modélisation thermique et analyse des pertes énergétiques des unités de méthanisation à la ferme

Marco Avila, Carlos Robles Rodriguez, Ligia Barna, Aras Ahmadi

*Projet financé dans le cadre de la chaire d'innovation biogaz (INSA Toulouse – GRDF)*

*Contact : [ahmadi@insa-toulouse.fr](mailto:ahmadi@insa-toulouse.fr)*

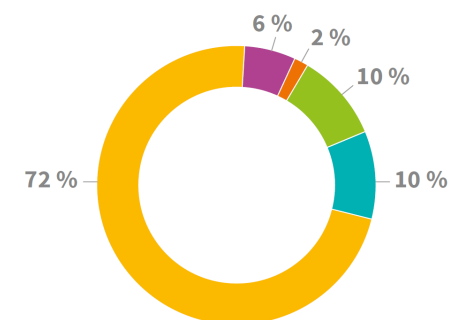


# Contexte énergétique de la méthanisation à la ferme

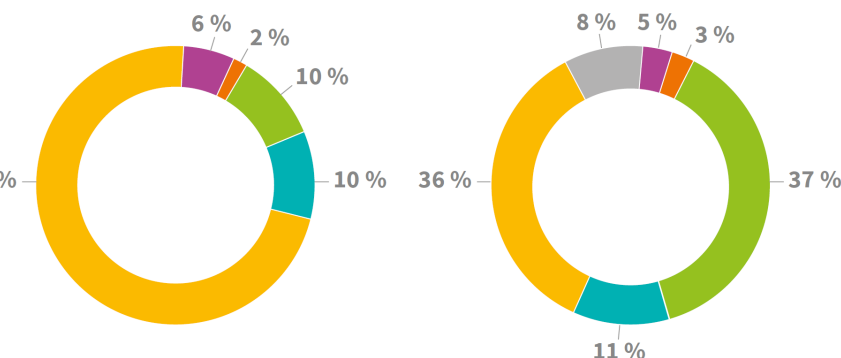
- En France, la méthanisation connaît un développement important, notamment dans le secteur des effluents et matières agricoles en raison **des grands gisements mobilisable** dans ce secteur <sup>(1)</sup>.
- La technologie la plus répandue : Le **réacteur infiniment mélangé en voie liquide**, c-à-d des digesteurs de **grand volume** permettant d'exploiter un maximum de potentiel méthanogène du substrat, et fonctionnant en régime **mésophile (~38°C)**.
- Problématique thermique: maintien en température du digesteur et le **besoin thermique très important pour le chauffage**, obligatoirement satisfaits par l'énergie thermique dégagée de la valorisation du biogaz produit par cette même unité.

## Gisement mobilisable à l'horizon 2030

Pourcentage en masse



Pourcentage énergétique



■ Déjections d'élevage

■ Culture Intermédiaire à Valorisation Énergétique (CIVE)

■ Industrie agroalimentaire et commerce

■ Résidus de culture

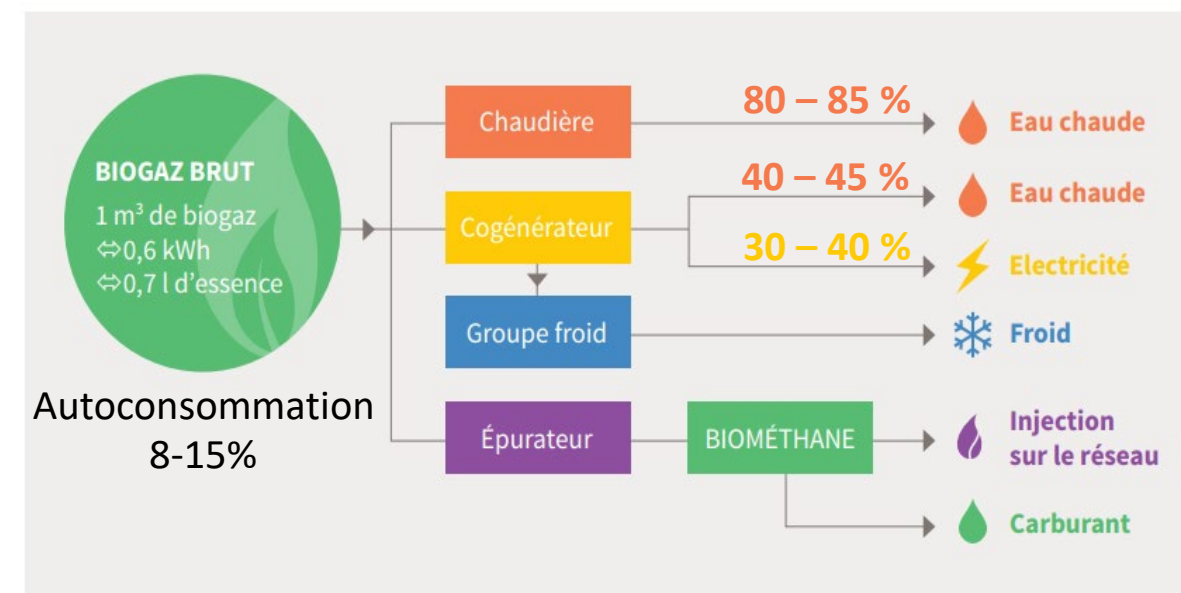
■ Ménages et collectivités

■ Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux

<sup>1</sup> La méthanisation en 10 questions, ADEME, 2019

# Contexte énergétique de la méthanisation à la ferme

- Valorisation du biogaz : chaleur dans une chaudière, électricité/chaleur en **cogénération**, biométhane purifié pour **injection** ou carburant.
- L'ordre de grandeur de **l'autoconsommation : 8- 15%** <sup>(2)</sup> jusqu'à 30% si l'unité n'est pas isolé thermiquement <sup>(3)</sup>.
- **Prime d'efficacité énergétique** dans le cadre de la cogénération, en fonction de **l'efficacité énergétique** (énergie totale valorisée / l'énergie primaire),
- **Le tarif d'achat de l'injection** du biométhane sur le réseau gaz naturel dépend aussi du débit d'injection <sup>(4)</sup>.



**Les bénéfices énergétiques et économiques sont proportionnels à l'efficacité énergétique et à la réduction de l'autoconsommation d'énergie primaire.**

<sup>2</sup> Réaliser une unité de méthanisation à la ferme, ADEME, 2019

<sup>3</sup> G. Bastide, « Fiche technique méthanisation » [archive], Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, sur ademe.fr, février 2015 (consulté le 02 juin 2021), p.p. 6-7.

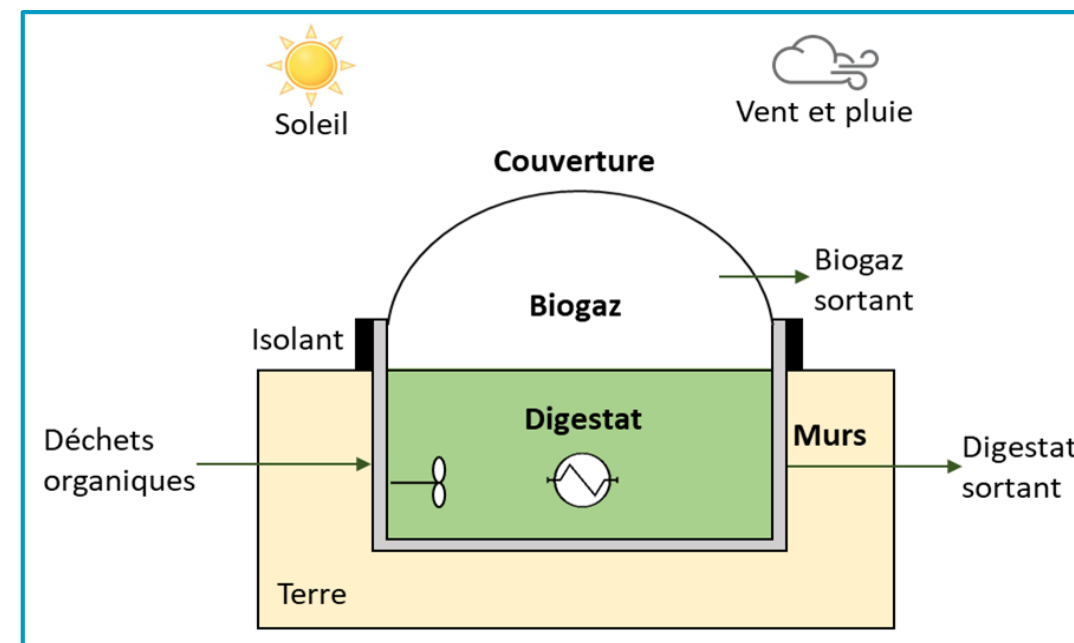
<sup>4</sup> Délégation régionale de l'alimentation, de la agriculture et de la foret de la région Occitanie (<https://draaf.occitanie.agriculture.gouv.fr/Les-tarifs-d-achat>)

# Projet ECO-FEV: Objectifs et méthodes

Avec le soutien de

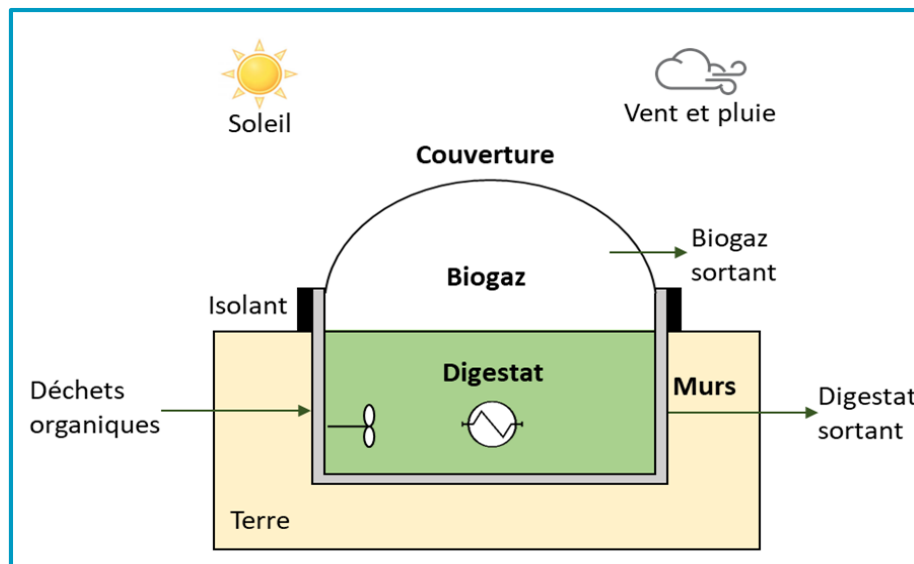
- **Objectif** : Evaluation thermique et conception optimale des unités de méthanisation à la ferme en voie liquide.
- **Méthode**:
  - **Modélisation dynamique des phénomènes thermiques** dans les grands méthaniseurs industriels.
  - **Instrumentation** de plusieurs sites industriels.
- **Enjeux** :
  - **Identification des principales sources de pertes** et de gains énergétiques par la modélisation.
  - **Optimisation des paramètres** de design et de fonctionnement pour une méthanisation moins énergivore.

## Exemple d'une unité de méthanisation en voie liquide



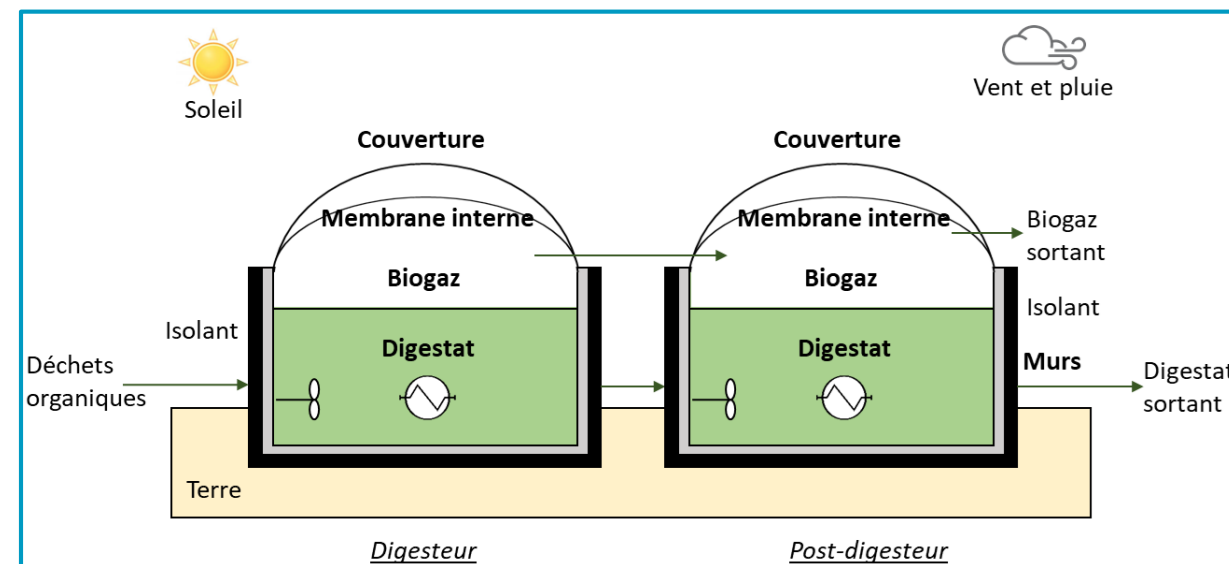
## Deux sites retenus pour la présente étude

### Site 1 – Un digesteur / gazomètre à une membrane souple <sup>(5)</sup>



Digesteur anaérobie semi-enterré à la ferme:  
volume de digesteur  $\sim 400 \text{ m}^3$  et production de  
**20 - 25  $\text{Nm}^3/\text{h}$**  de biométhane.

### Site 2 – Digesteur - post-digesteur en série / gazomètres à double membrane



Digesteur et post-digesteur anaérobie semi-enterré à plus grande  
échelle : volume des digesteurs  $\sim 4500 \text{ m}^3$  et production de **170 -**  
**180  $\text{Nm}^3/\text{h}$**  de biométhane.

*Robustesse du modèle  
pour un système à  
grande échelle*

# Modélisation dynamique des phénomènes thermiques

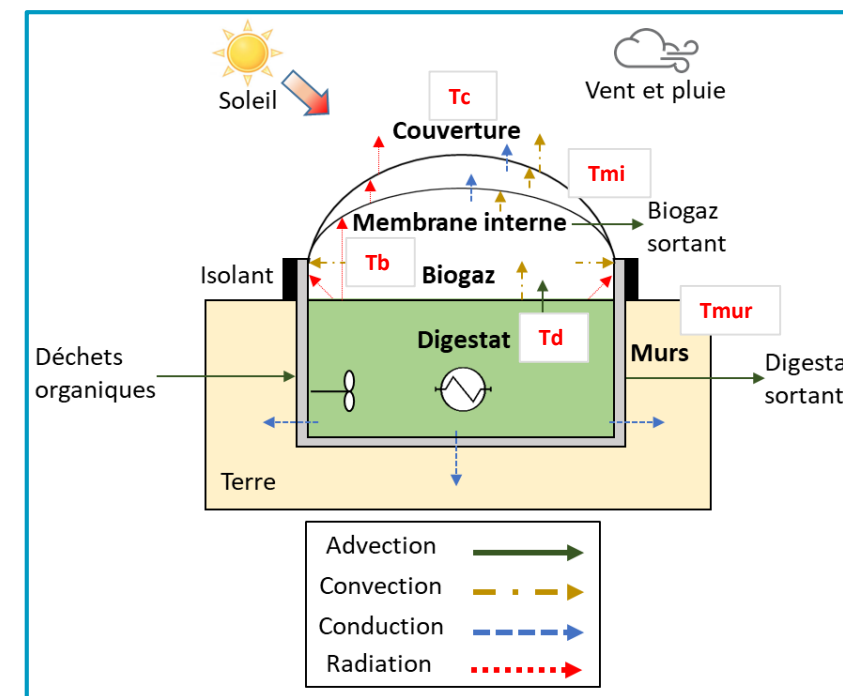


Un **modèle dynamique multi-compartiment** en langage python  
pour des méthaniseurs à gazomètre à membrane souple:

Avec le soutien de

- **Bilans d'énergie dynamique par compartiment**, avec approche 0d-spatial.
- Termes de **transfert de chaleur** de toute nature (**advection**, **conduction**, **convection**, **radiation**) entre compartiments et avec l'extérieur (fonctions de la géométrie et des matériaux).
- Phénomènes météorologiques dynamiques : **Modèle de l'Irradiation solaire avec nébulosité locale** (clear sky + cloudiness), modèle de la **température du sol**, données de **température ambiante**, **précipitation**, **vitesse du vent**).
- Les **variables dynamiques** du modèle : températures des compartiments ( $T_d$ ,  $T_b$ ,  $T_{mur}$ ,  $T_c$ ,  $T_{mi}$ ).

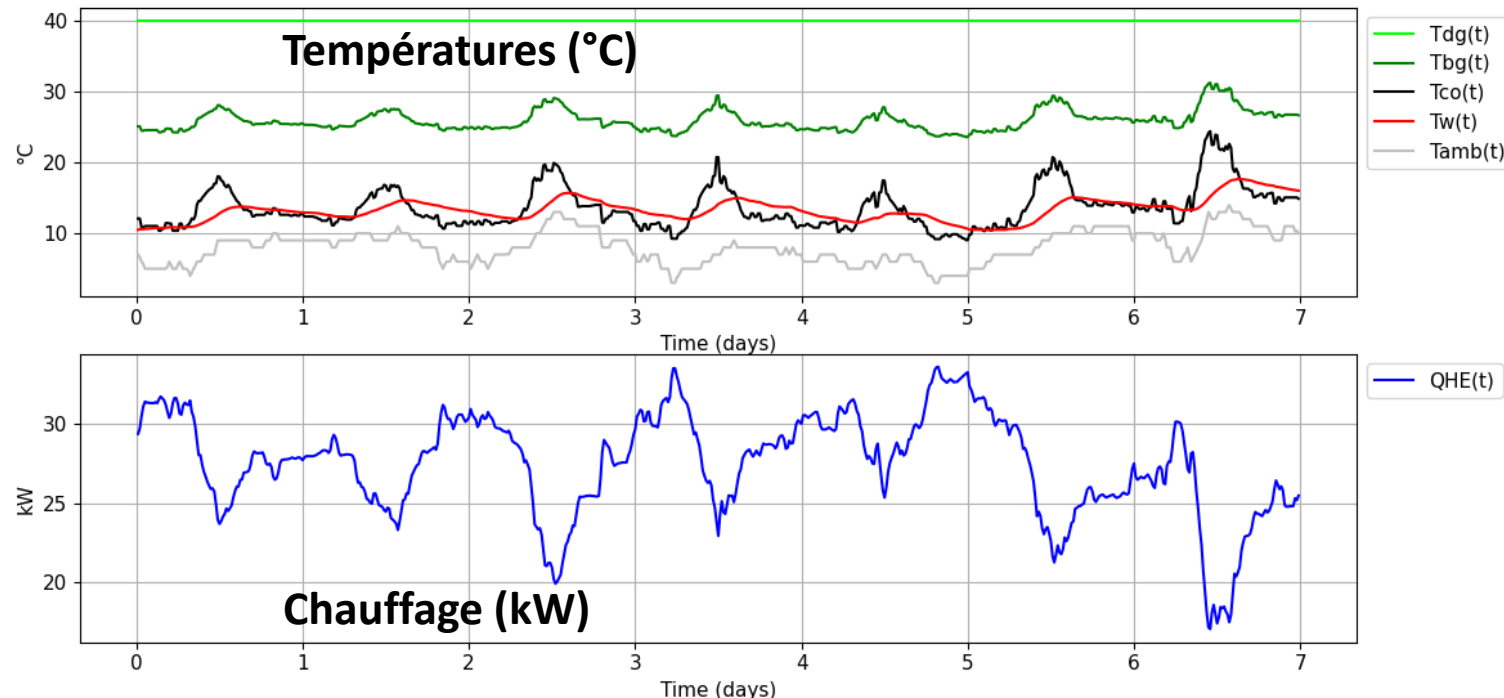
**Structure multi-compartiment** : le nombre de compartiments dépend du nombre de membranes isolantes.





## Résultats du Site 1 – Janvier

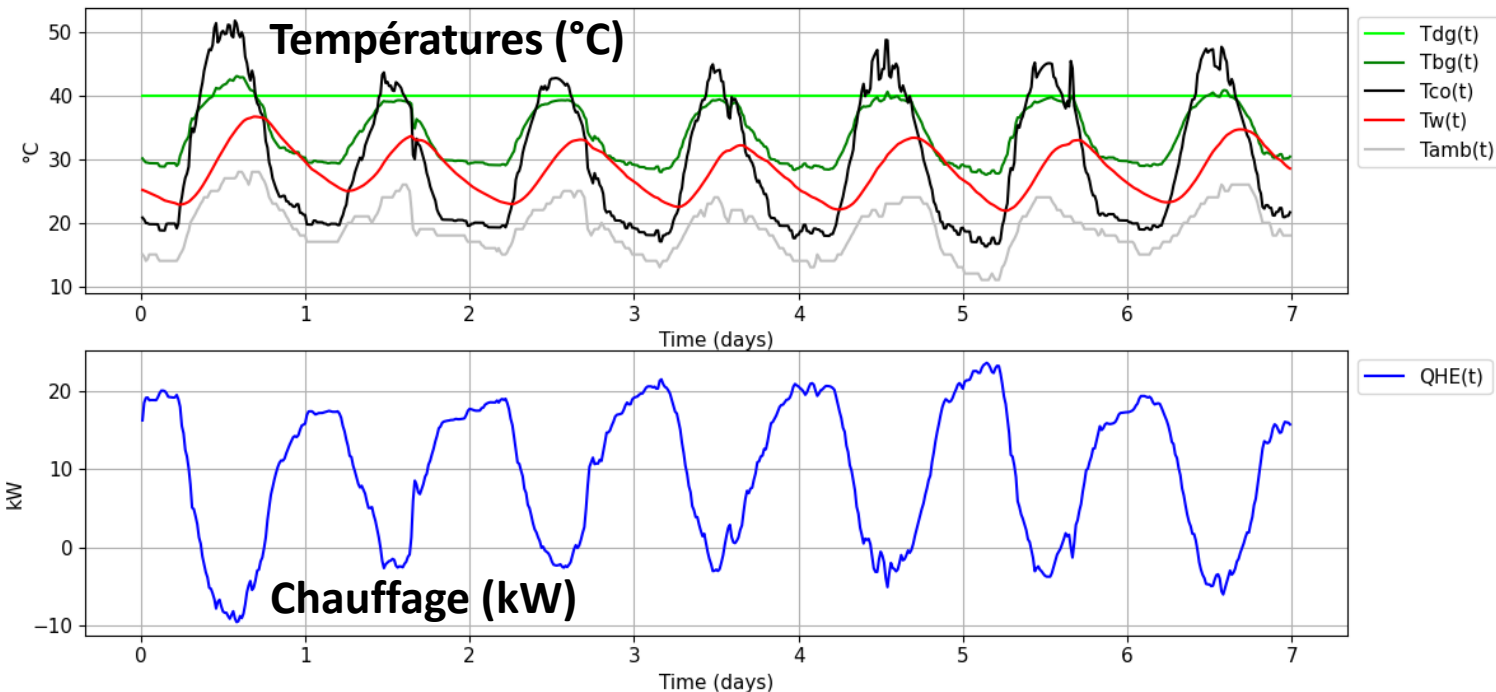
- **Les besoins énergétiques du digesteur en janvier**, pour maintenir une température stable du digestat.
- Profile des températures : **pics de température** aux pics d'ensoleillement, **pics de chauffage** dans la nuit.
- **Proximité des résultats en dynamique et en régime permanent**, lorsque les données météorologiques sont utilisées et moyennées correctement.



|                        | Dynamique | Régime permanent | Erreur (%) |
|------------------------|-----------|------------------|------------|
| Chauffage janvier (kW) | 29,7      | 29,9             | 0,7        |
| T biogaz (°C)          | 25,6      | 25,5             | 0,4        |
| T couverture (°C)      | 12,9      | 12,2             | 5,4        |

## Résultats du Site 1 – Août

- Ensoleillement en août permet de réduire considérablement la **puissance de chauffage (-57%)**, par rapport au mois de Janvier.
- Illustration du **problème de surchauffe à la couverture** aux pics d'ensoleillement en été.
- Validation du **modèle en régime permanent** (plus adapté aux études paramétriques et aux analyses de sensibilité).



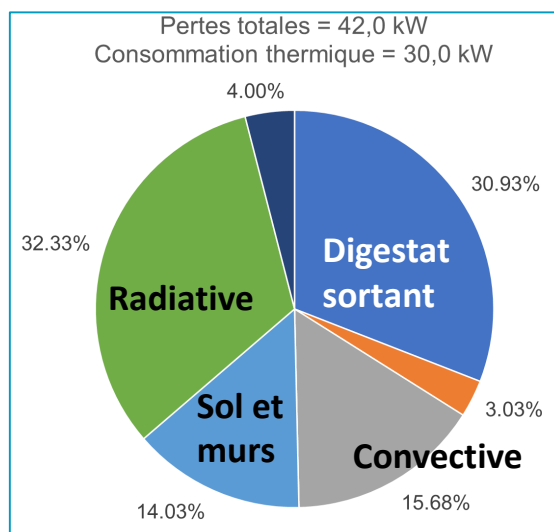
|                     | Dynamique | Régime permanent | Erreur (%) |
|---------------------|-----------|------------------|------------|
| Chauffage août (kW) | 12,8      | 12,6             | 1,6        |
| T biogaz (°C)       | 32,4      | 32,7             | 0,9        |
| T couverture (°C)   | 26,3      | 26,1             | 0,8        |



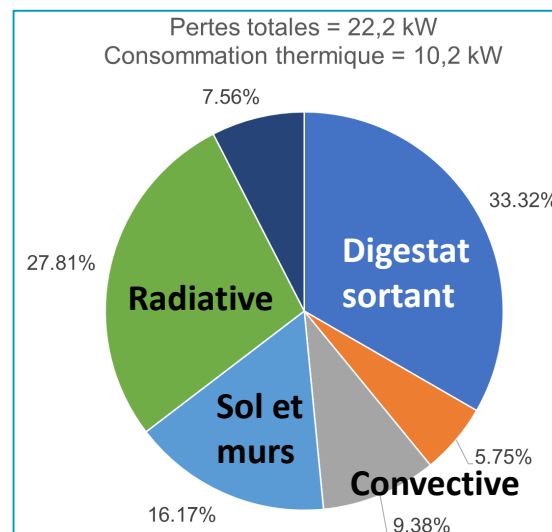
# Répartition des pertes thermiques du digestat (Site 1)

## Pertes thermiques du digestat

Hiver



Été



## Valeurs moyennes saisonnières – Consommation thermique du digesteur

|       | Énergie | Autoconsommation <sup>3</sup> |
|-------|---------|-------------------------------|
| Hiver | 30 kW   | 18%                           |
| Été   | 10 kW   | 6%                            |

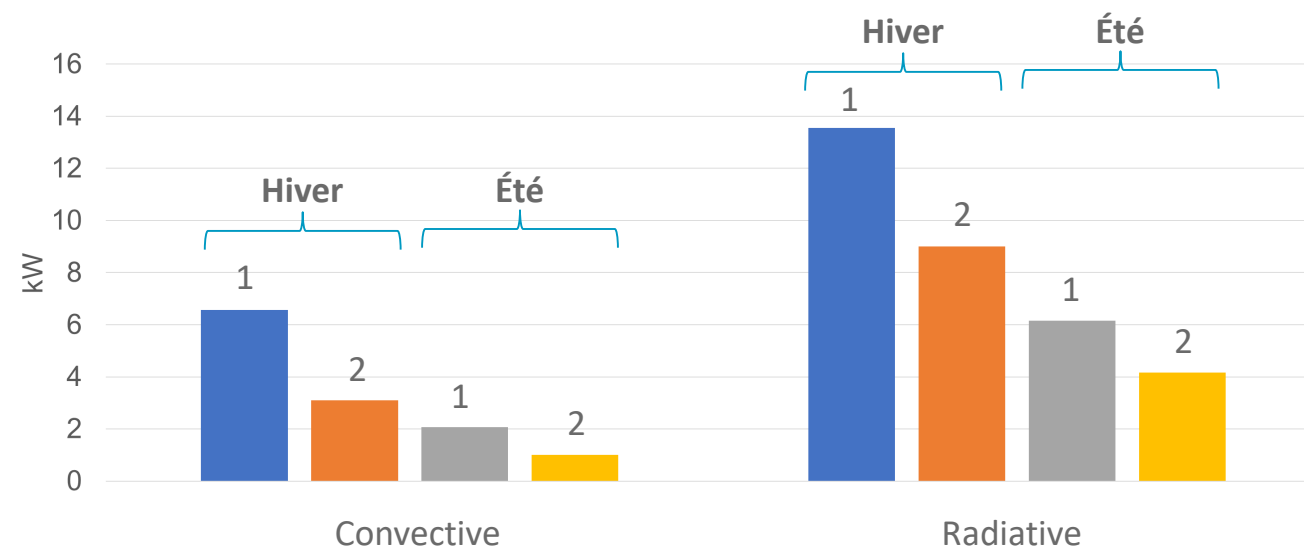
<sup>3</sup> Efficacité thermique de la chaudière = 80%  
Pertes dans les canalisations = 5%

Avec le soutien de

# Effet du nombre de membranes isolantes (Site 1)

- Considération de l'effet de **blocage convectif et radiatif** de plusieurs membranes isolantes:
  - **Réduction de 28%** de la consommation thermique en cas de double membranes.
  - **Réduction de 42%** de la consommation thermique en cas de triple membranes.

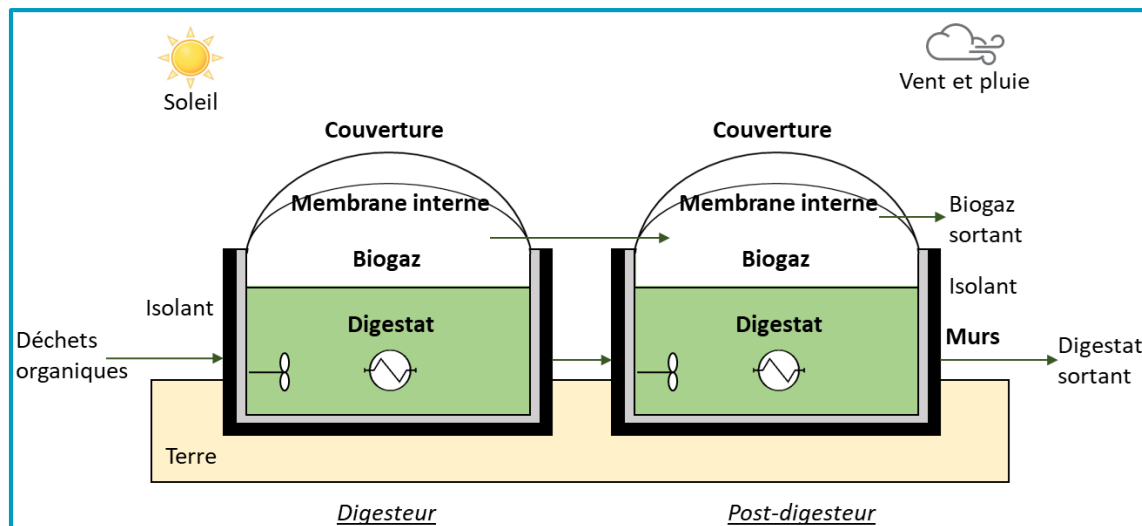
Reduction des pertes thermiques du digestat



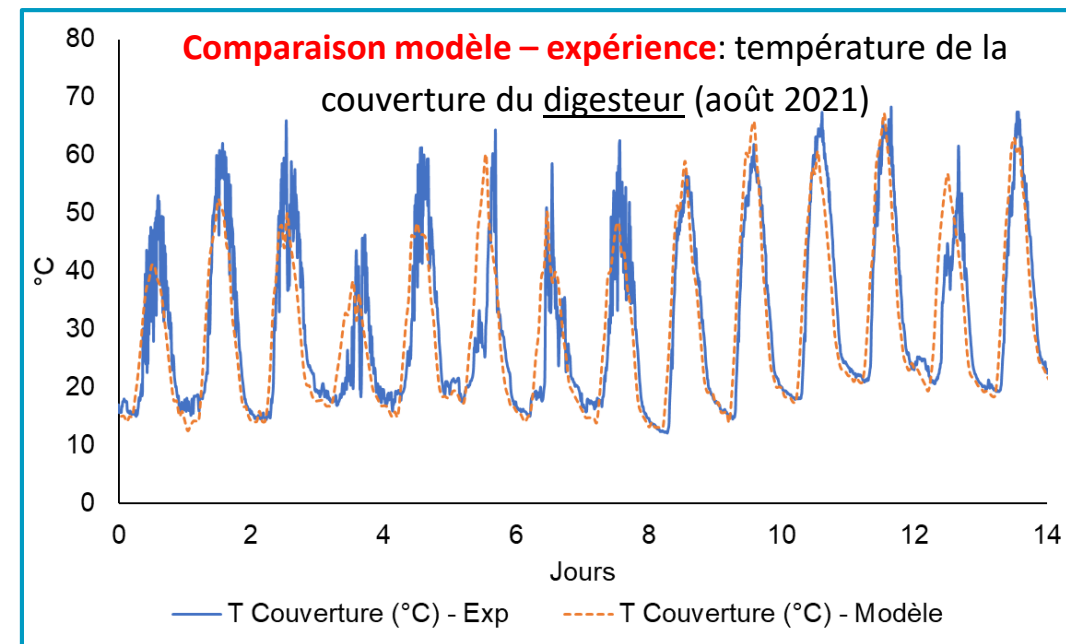
Consommation thermique du digesteur

|       | 1 Membrane | 2 Membranes | 3 Membranes |
|-------|------------|-------------|-------------|
| Hiver | 30,0 kW    | 22,0 kW     | 17,9 kW     |
| Été   | 10,2 kW    | 7,2 kW      | 5,7 kW      |

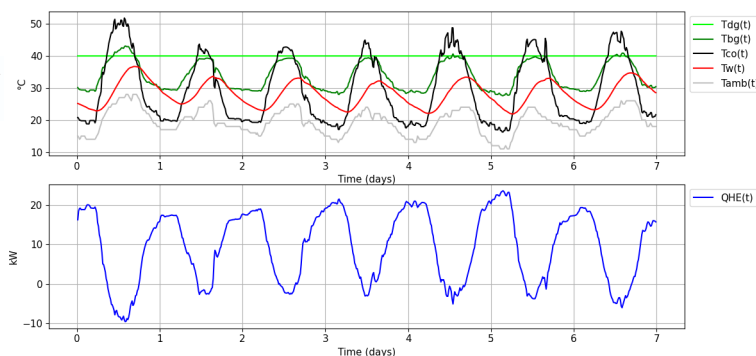
## Résultat du Site 2 (étude de deux digesteurs en série)



Digesteur et post-digesteur anaérobie semi-enterré à plus grande échelle : volume des digesteurs  $\sim 4500 \text{ m}^3$  et production de **170 - 180  $\text{Nm}^3/\text{h}$**  de biométhane.



| Consommation thermique des digesteurs (kW) |              |        |            |                      |
|--------------------------------------------|--------------|--------|------------|----------------------|
|                                            | Expérimental | Modèle | Erreur (%) | Autoconsommation (%) |
| Janvier                                    | 161,3        | 166,1  | 3,0        | <b>8,2</b>           |
| Août                                       | 88,0         | 87,6   | 0,5        | <b>3,4</b>           |



Avec le soutien de

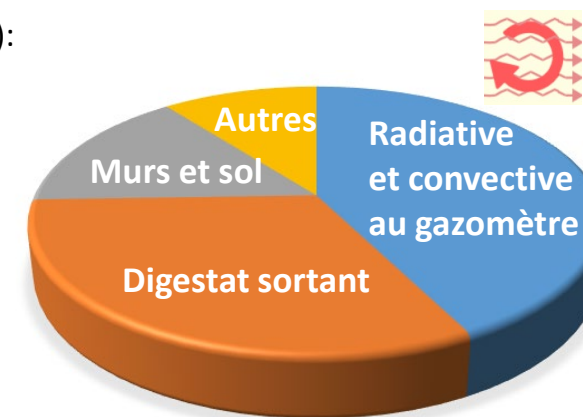
## Conclusions

### MODELE :

- **Outil de simulation du comportement thermique des méthaniseurs** en voie liquide, et de prédiction des besoins thermiques.
- Site 1 : bonne **concordance des résultats en régime permanent et dynamique**
- Site 2 : **bonne représentation des phénomènes météorologiques et des propriétés thermo-optiques des gazomètres** à membrane souple.
- **Robustesse du modèle lors des changements d'échelle** :  $V=500\text{m}^3$  vs.  $V=4500\text{m}^3$

### PERTES THERMIQUES :

- **Principales pertes du digestat dans une configuration à une seule membrane (Site 1):**
  - ❑ **Pertes radiatives et convectives (42%).**
  - ❑ **Digestat sortant (32%).**
  - ❑ **Pertes au sol et aux murs (15%).**
- **Site 1 : autoconsommation = 18%, rendement énergétique = 80%.**
- **Site 2 : autoconsommation = 6%, rendement énergétique = 90%:**
  - ❑ **Double membranes d'isolation : -28% des besoins thermiques**
  - ❑ **Utilisation de la chaleur fatale de l'épuration : -30% des besoins thermiques, et -2% d'autoconsommation.**



# Perspectives

## Modèle hautement paramétré au service des analyses paramétriques et de l'optimisation

Axes d'améliorations pouvant être étudiés et approfondis :

1) **Réduire les pertes du gazomètre :**

- ☐ **Protections multi-membranes** ( $\geq$  triple membranes).
- ☐ **Peinture et matériaux sélectifs** pour la face supérieure de la couverture.

2) **Réduire les pertes par advection :**

- ☐ **Recirculation/valorisation thermique** du digestat chaud.
- ☐ **Échangeurs tubulaires de préchauffage** des effluents entrant à partir des effluents sortants.

3) **Réduire les pertes au sol** : digesteur enterré ou semi-enterré pour bénéficier de la température stable du sol  $\sim 12^{\circ}\text{C}$  (plus difficile pour les grosses unités).

4) **Optimisation thermique de la géométrie** et des dimensions de l'unité (digesteur et gazomètre).

5) **Isolation thermique des équipements de stockage**: produits entrants, cuves de stockage (éviter l'arrivée dans le digesteur d'effluents ou de digestat liquide recirculé très froids, surtout en hiver).

Avec le soutien de





Avec le soutien de



Merci de votre  
attention

