

Conditions pour l'implémentation de la recirculation du digestat solide à grande échelle : théorie et mise en pratique

-

Ulysse Brémond, A. Bertrandias, M. Quaak,
J. Jimenez, R. Escudié, JP. Steyer, H. Carerre

LBE, INRAE Narbonne
Bioénergie de La Brie
Air Liquide, Campus Innovation Paris



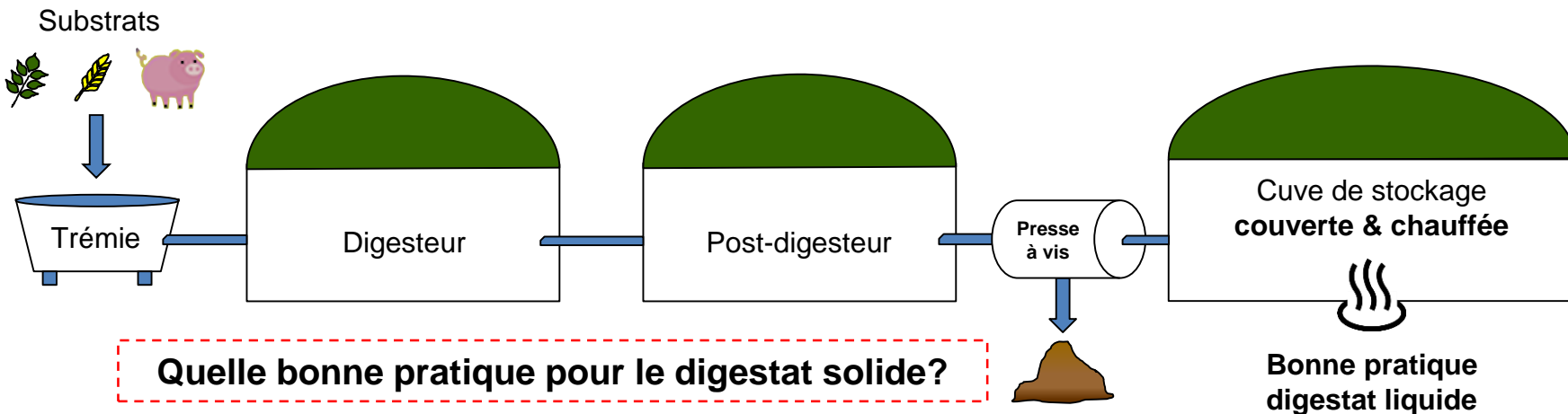
Problématique



Comment baisser les coûts de production de la filière méthanisation?

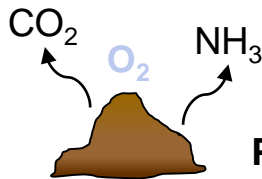
Maximiser la production de biogaz par volume d'intrants → Meilleure gestion des digestats

Co-digestion + temps de séjour hydraulique (TSH) empiriquement décidé = CH_4 résiduel dans digestat⁽¹⁾



(1) Ruile et al, (2015) Degradation efficiency of agricultural biogas plants – A full-scale study

La recirculation du digestat solide



Principalement stocké à l'air libre puis épandu.
Perte de carbone et émissions d'ammoniac⁽²⁾

CH_4 Potentiel méthane du digestat solide est compris entre **50-200 Nm³ CH₄/tonne MV⁽³⁾**.



**La recirculation
une bonne
alternative**

- Découple temps de séjour solides et liquides
- ↗ potentiellement l'efficacité du méthaniseur
- ↘ émissions de GES et polluants
- Pas d'investissement supplémentaire
- Déjà appliquée dans certains méthaniseurs

**MAIS
reste peu étudiée**



Présenter la théorie + Outil pour déterminer si c'est une bonne pratique

(2) Rincón et al, (2019) Chemical and odor characterization of gas emissions released during composting of solid wastes and digestates

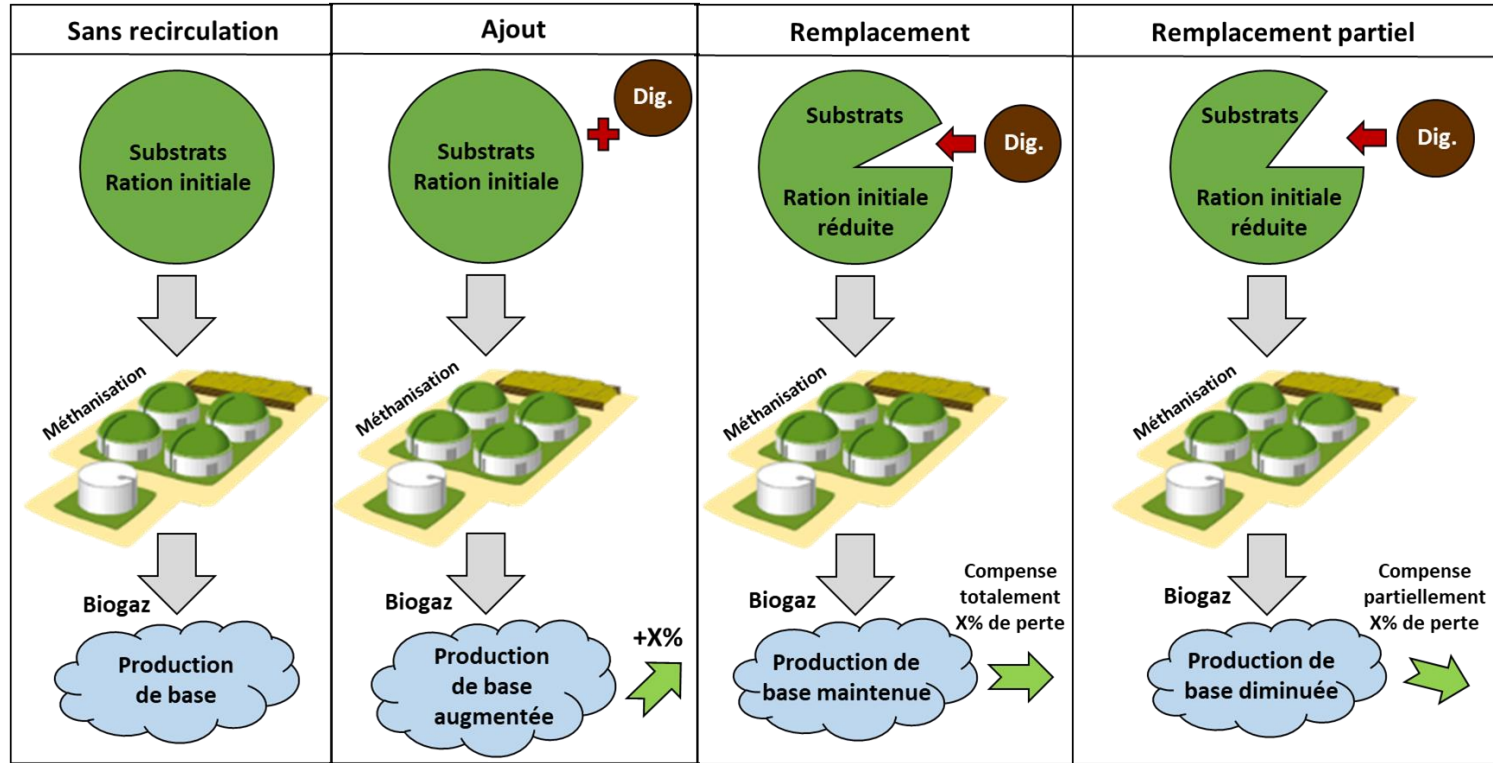
(3) Monlau et al, (2015) New opportunities for agricultural digestate valorization: Current situation and perspectives

Plan

1 - Les différentes stratégies

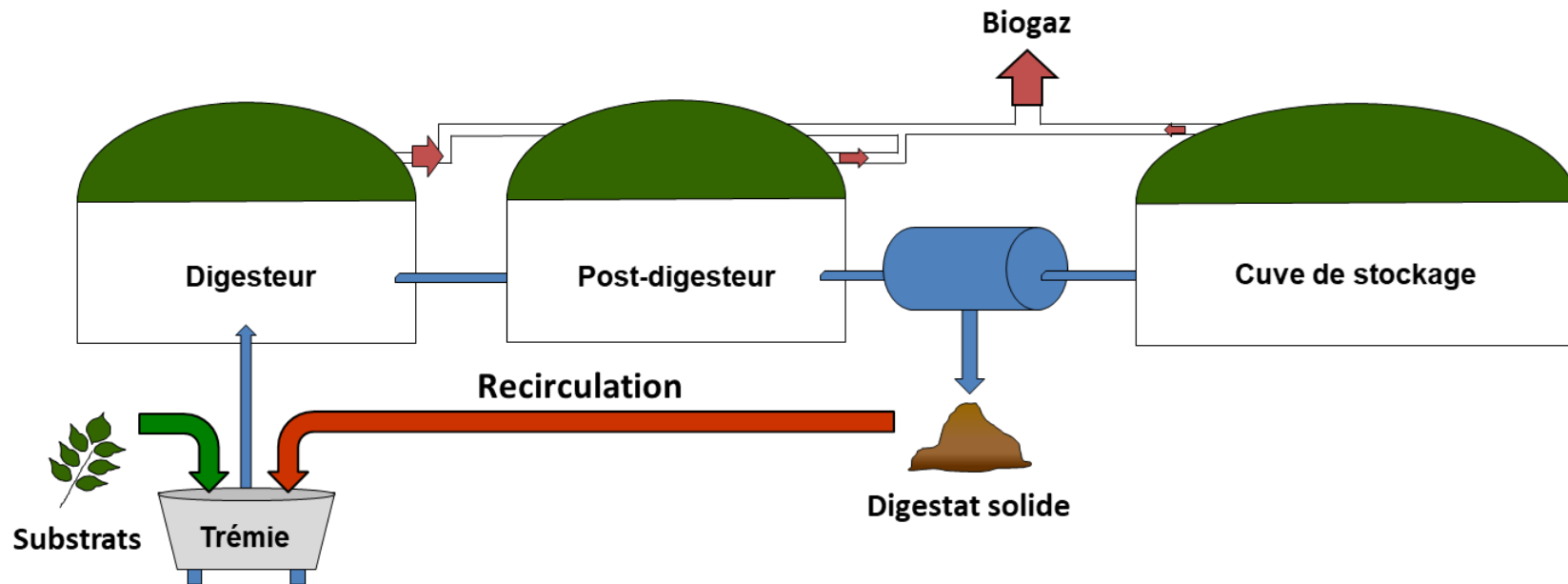
- 2 - Impact sur la production de méthane
- 3 - Impact sur l'agitation des digesteurs
- 4 - Application à grande échelle

Les différentes stratégies de recirculation



3 stratégies différentes → Se concentrer sur celles où il n'y a pas de perte de production de biogaz

La recirculation directe



1

Quel impact sur la production de biogaz du méthaniseur?

Plan

1 - Les différentes stratégies

2 - Impact sur la production de biogaz

3 - Impact sur l'agitation des digesteurs

4 - Application à grande échelle

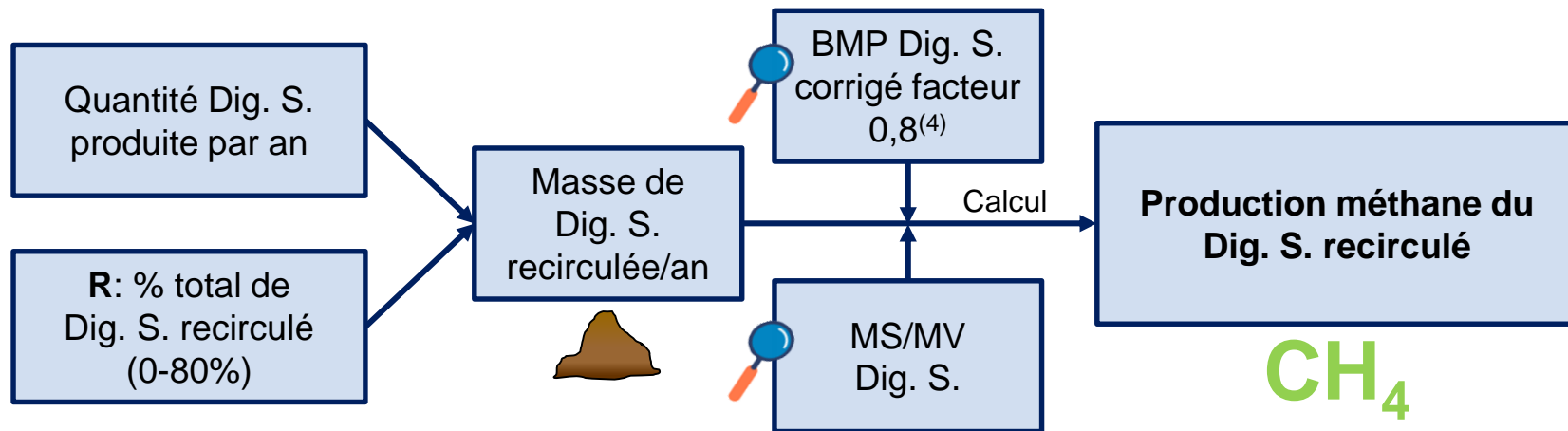
Détermination du potentiel méthane de digestats solides (Dig. S.)



Prélèvements Dig. S.

5 Méthaniseurs - Voie liquide

Équipés d'une presse à vis



(4) Holliger et al., (2017) Methane production of full-scale anaerobic digestion plants calculated from substrate's biomethane potentials compares well with the one measured on-site

Impact de la recirculation directe sur la production de méthane

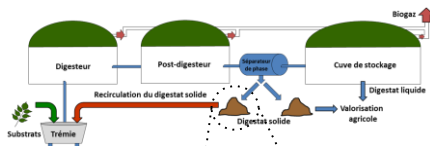
CH_4

Production du digestat solide

On compare avec:

CH_4

Production de base du méthaniseur



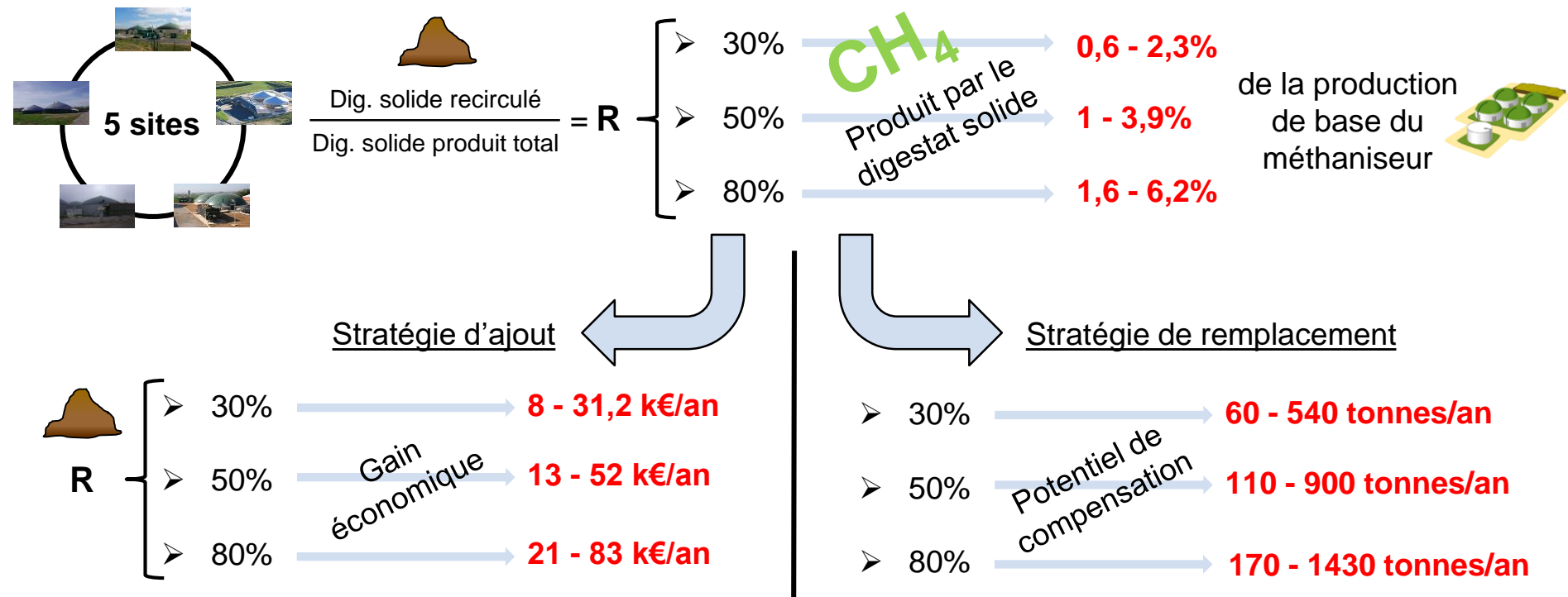
$$\frac{\text{Dig. solide recirculé}}{\text{Dig. solide produit total}} = R$$

➤ 30%	CH_4	0,6 - 2,3%
➤ 50%	Produit par le digestat solide	1 - 3,9%
➤ 80%		1,6 - 6,2%

de la production de base du méthaniseur



Recirculation directe et gain économique/potentiel de compensation



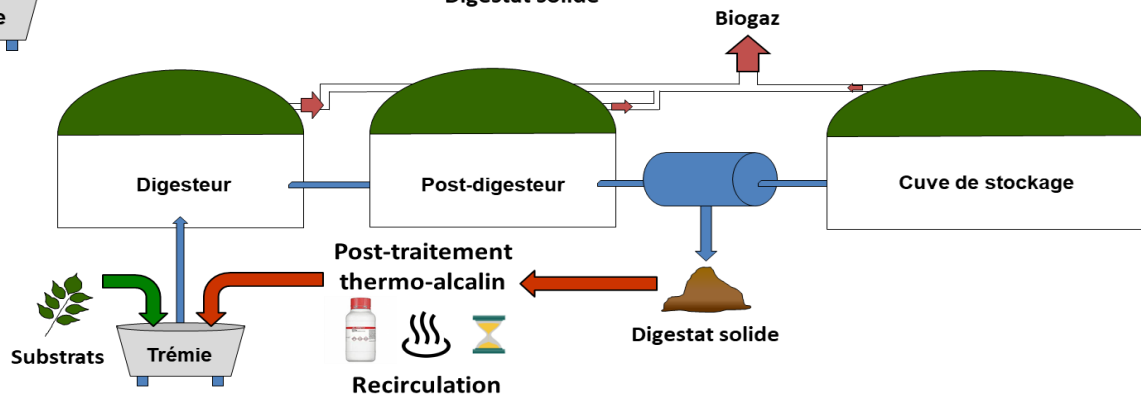
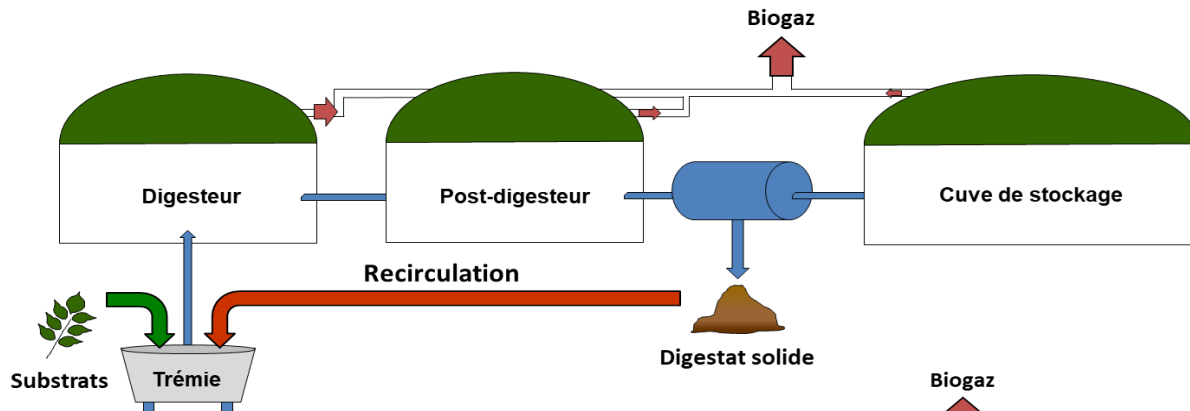
Recirculation directe → Gains potentiels faibles mais pas négligeables car absence d'investissement

Recirculation avec ou sans post-traitement?

Recirculation directe

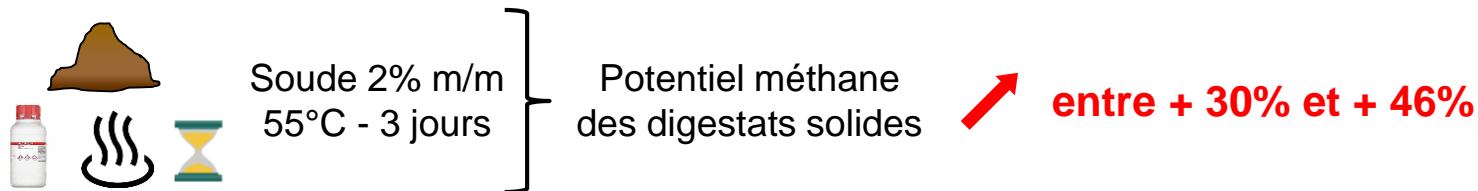
VS

Recirculation avec post-traitement



Quelle est la meilleure option d'un point de vue économique?

Intérêt de l'ajout d'un post-traitement thermo-alkalin



Par rapport à la recirculation directe:

	Stratégie d'ajout	Stratégie de remplacement
 R	➤ 30% → +2 à +7 k€/an	➤ 30% → +40 à +60 tonnes/an
	➤ 50% → +3 à +11 k€/an <i>Gain éco. additionnel</i>	➤ 50% → +70 à +100 tonnes/an <i>Potentiel de compensation additionnel</i>
	➤ 80% → +5 à +18 k€/an	➤ 80% → +110 à +160 tonnes/an

**Les gains additionnels sont trop faibles pour compenser les investissements.
La recirculation directe est la meilleure option.**

Plan

- 1 - Les différentes stratégies
- 2 - Impact sur la production de biogaz
- 3 - Impact sur l'agitation des digesteurs**
- 4 - Application à grande échelle

Recirculation directe et impact sur le digesteur

Stratégies d'ajout/remplacement → **on augmente la quantité de solide incorporée.**

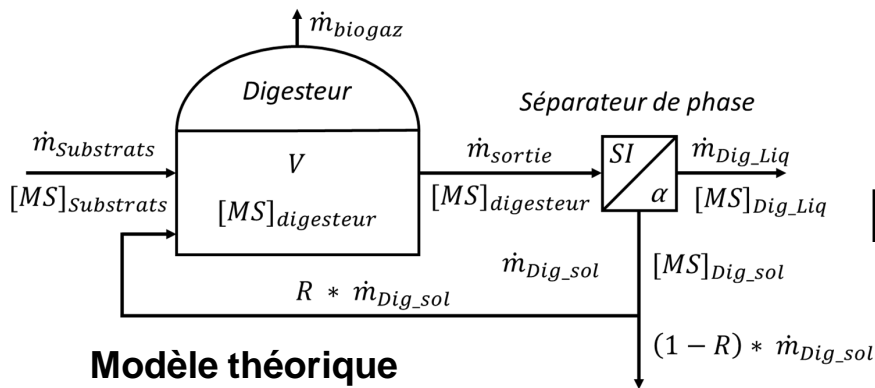


2

Comment évoluent:

- **Le temps de séjour des solides (TSS)?**
- **La teneur en matière sèche du digesteur?**

Quels impacts sur l'agitation et l'efficacité énergétique du méthaniseur?



2 équations

TSS & MS du digesteur

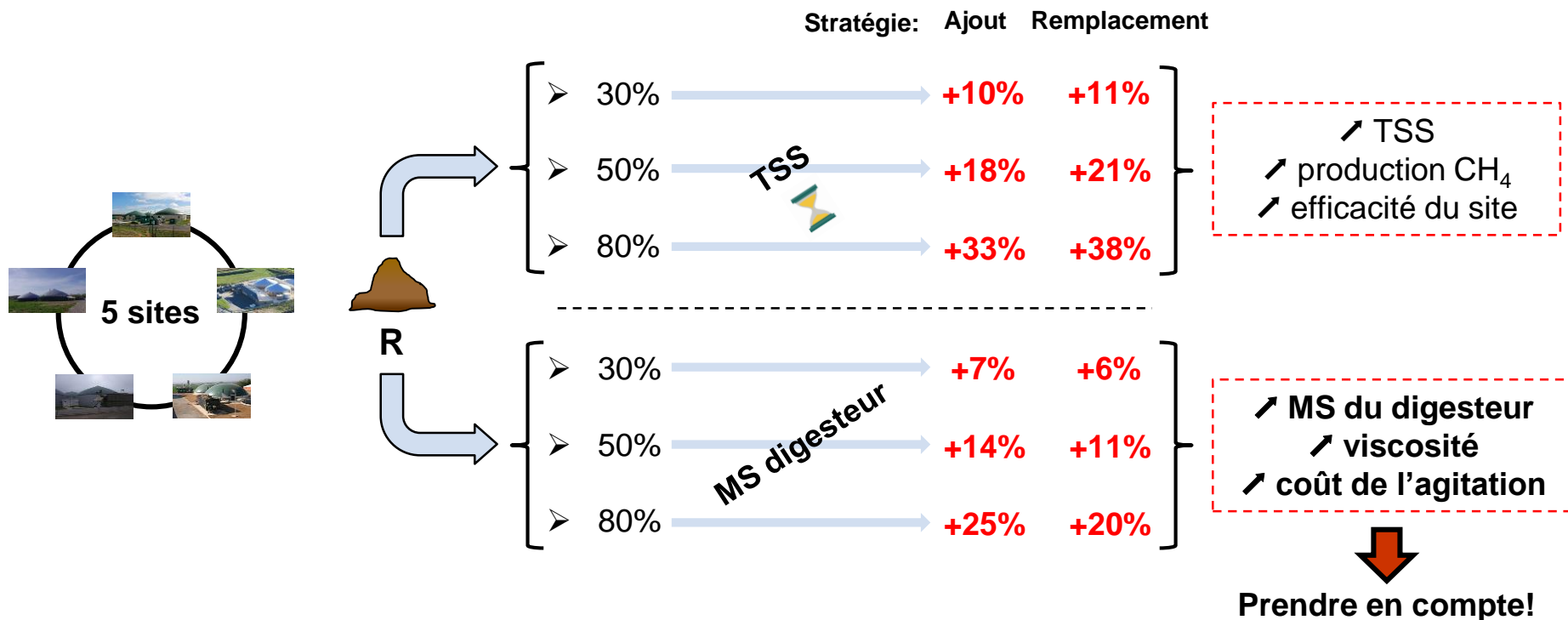
en fonction:

- séparateur de phase
- % dig. recirculé (R)

**Modèle théorique
Bilan à l'équilibre**

Recirculation directe et TSS/MS du digesteur

Les caractéristiques standards des presses à vis sont connues et nous les avons utilisées dans nos calculs⁽⁵⁾:



(5) Guilayn et al, (2019) Digestate mechanical separation: Efficiency profiles based on anaerobic digestion feedstock and equipment choice

Plan

- 1 - Les différentes stratégies
- 2 - Impact sur la production de biogaz
- 3 - Impact sur l'agitation des digesteurs
- 4 - Application à grande échelle**

Un outil d'aide à la décision

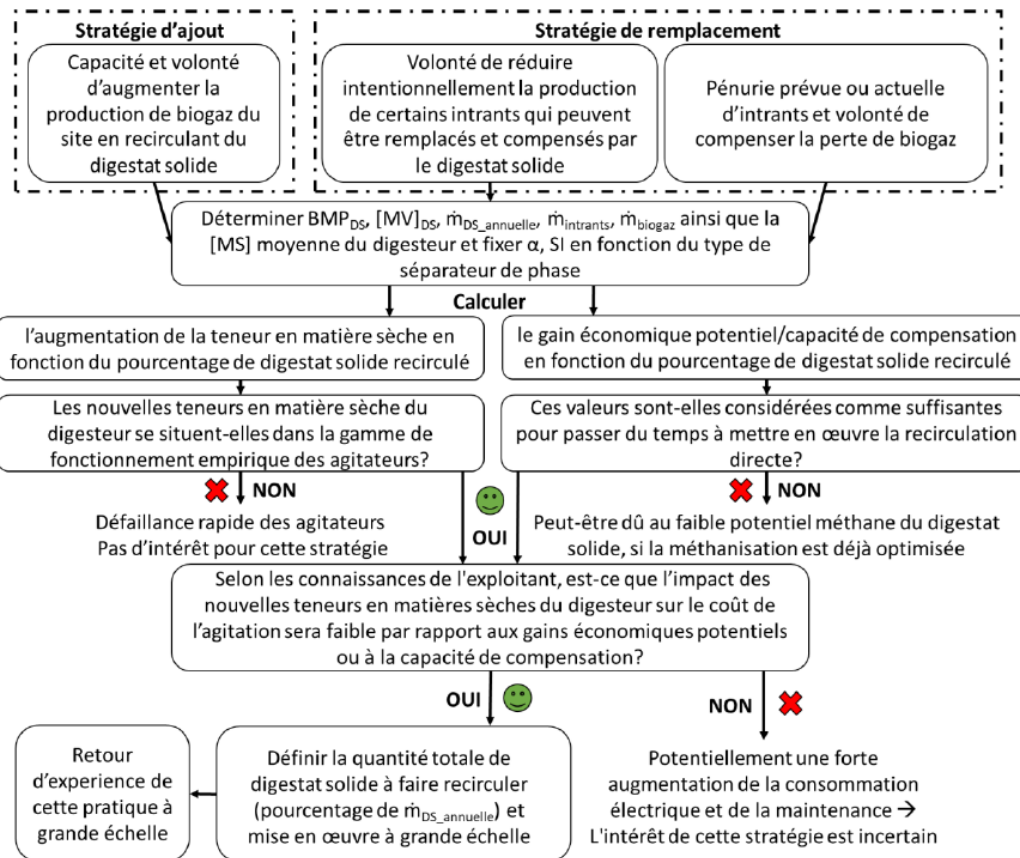


Diagramme de décision⁽⁶⁾

(6) Brémond et al., (2020) Recirculation of solid digestate at full scale: strategies, conditions and impacts (under review - Applied Energy)

Démarche pour l'implémentation de la recirculation

Bioénergie de la Brie



MS digesteur 12% → 12,9%

3 Mélangeurs submersibles
Gamme de fonctionnement < 12% MS

**Stratégie non viable car risque
de casse des agitateurs**



Exemples:

Stratégie d'ajout

30% du digestat solide total

Recirculation directe

~1% production de base

10 à 15 k€/an



© KSB



© REMA GmbH



Site B



MS digesteur 10,5% → 11,3%

2 Mélangeurs à pales
Gamme de fonctionnement < 14% MS

Recirculation viable

Gains vs. ↗ coût de l'agitation?

DÉTERMINATION AU CAS PAR CAS

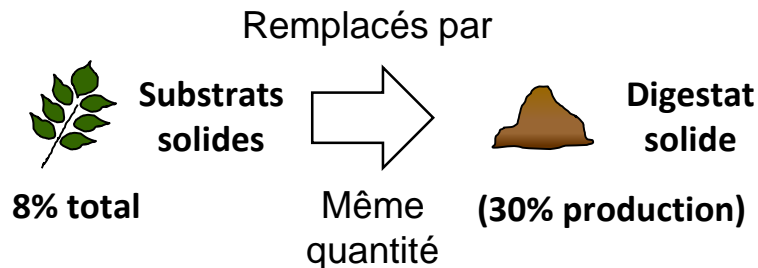
Test in-situ à Bioénergie de la Brie

Bioénergie de la Brie



Alternative: **le remplacement partiel**
+ faible impact sur la MS
mais a priori ↘ production CH₄

Pendant 4 mois au sein du méthaniseur



Pas possible de clairement évaluer l'impact
sur la production de méthane.
Trop de changements sur la même période...

**La recirculation du digestat solide n'a pas d'effet négatif
sur le procédé de méthanisation**



Conclusions

Conclusions

Stratégies et impact

CH₄



- Stratégies définies: « Ajout », « Remplacement » et « Remplacement partiel »
- Post-traitements apparaissent comme non rentables - Recirculation directe meilleure option
- Permet de produire/compenser quelques % de la production de biogaz de base d'un méthaniseur

Conditions d'application à grande échelle




- Démarche au cas par cas établie - Prend en compte la MS/agitation du digesteur - Compromis
- Sous certaines conditions → Bonne pratique facile à implémenter et peu coûteuse qui permet d'augmenter l'efficacité énergétique du méthaniseur

Perspectives



- Co-bénéfices potentiels de la recirculation (↗ hydrolyse, pouvoir tampon) à évaluer.
- Réalisation d'une étude à grande échelle pour confirmer l'effet positif de la stratégie d'ajout.
- Quels bénéfices environnementaux (ACV) et agronomiques?



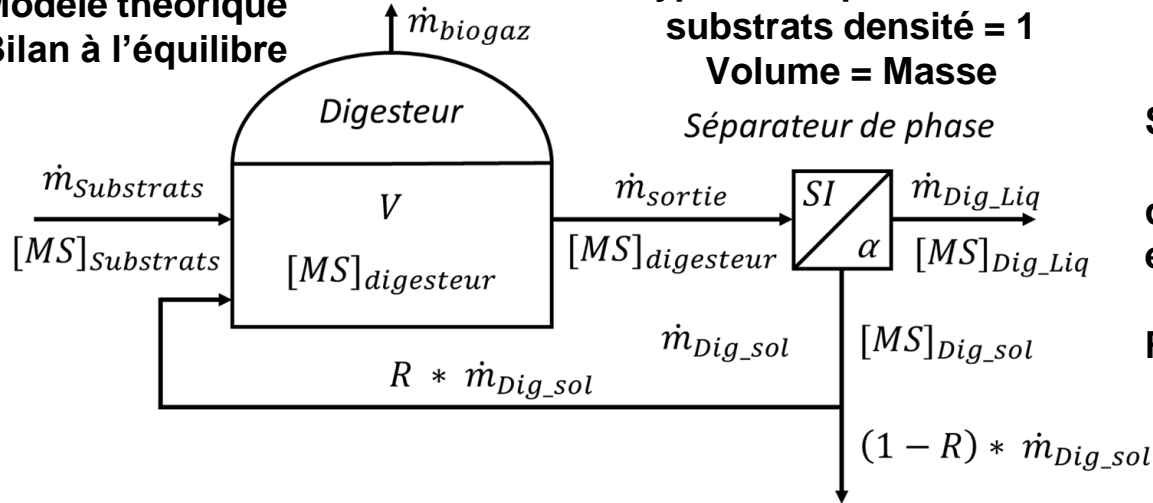
Je vous
remercie
pour votre
attention!

Caractéristiques des sites de méthanisation

Nom du méthaniseur	Site A	Site B	Site C	Site D	Site E
Type de méthaniseur	Agricole	Agricole	Agricole	Territorial	Agricole
Volume cuverie en m ³ (dig. + post-dig.)	4 000	4 400	4 000	6 400	2 400
Intrants majoritaires	Fumier – CIVE – Pulpe de betterave	Fumier – CIVE – Paille	CIVE – Pulpe de betterave	Biodéchets – Fumier	Lisier – Pulpe de betterave
Quantité d'intrants (tonnes/an)	13 600	18 000	10 500	25 000	20 000
TSH (jours)	100	84	130	88	40
Représentativité vis-à-vis du secteur	BONNE	BONNE	MOYENNE	FAIBLE	FAIBLE

Obtention des équations pour déterminer TSS & [MS] digesteur

Modèle théorique
Bilan à l'équilibre



SI: Efficacité du séparateur de phase

α : Facteur de répartition de la masse entre le digestat liquide et solide

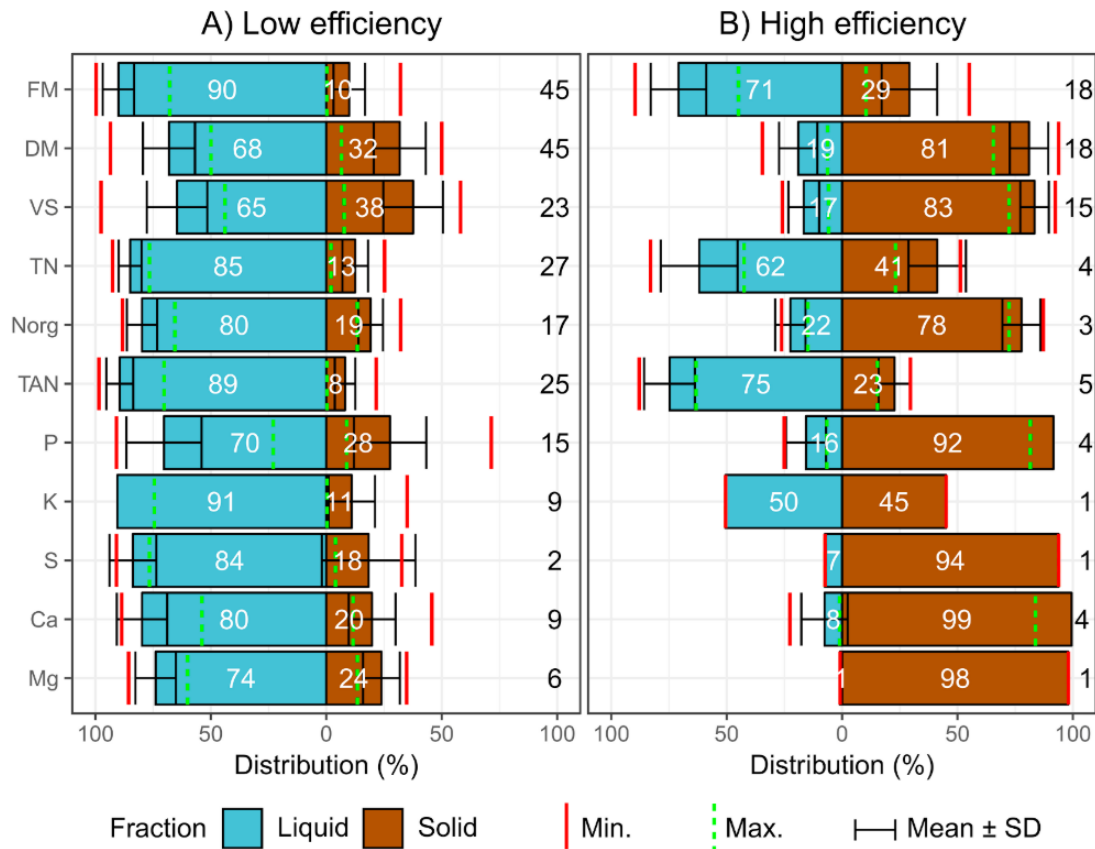
R: % de digestat total produit recirculé

Presse à vis: SI = 0,38 et $\alpha = 9$

$$TSS = \frac{(1 + \alpha - R)}{(1 + \alpha) * (1 - R * SI)} \frac{V}{(\dot{m}_{substrats} - \dot{m}_{biogaz}(R))}$$

$$[MS]_{digesteur} = \frac{(1 + \alpha - R)}{(1 + \alpha) * (1 - R * SI)} * \frac{(\dot{m}_{substrats} * [MS]_{substrats} - \dot{m}_{biogaz}(R))}{(\dot{m}_{substrats} - \dot{m}_{biogaz}(R))}$$

Caractéristiques des séparateurs de phase



Guilayn et al, (2019)
Digestate mechanical separation: Efficiency profiles based on anaerobic digestion feedstock and equipment choice

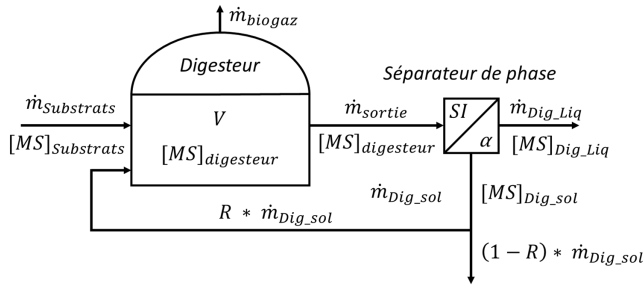
Temps de séjour hydraulique et recirculation

$$TSH_{classique} = \frac{V}{\frac{\dot{m}_{substrats}}{D_{operation}}}$$

$$TSH_{précis} = \frac{V}{\frac{(\dot{m}_{substrats} - \dot{m}_{biogaz})}{D_{operation}}}$$

Nom du site	Site A	Site B	Site C	Site D	Site E
TSH_{précis} (jours)	100	84	130	88	40
TSH_{précis} (jours) pour R=0%	123	102	172	98	45
Stratégie	Addition				
TSH_{précis} pour R=30% (jours)	123	102	172	99	45
TSH_{précis} pour R=50% (jours)	124	102	173	99	45
TSH_{précis} pour R=80% (jours)	124	103	173	99	45
Stratégie	Remplacement				
TSH_{précis} pour R=30% (jours)	125	103	173	101	46
TSH_{précis} pour R=50% (jours)	126	104	174	102	47
TSH_{précis} pour R=80% (jours)	127	105	176	105	48

➤ TSH versus recirculer le digestat solide



$$TSH_{classique} = \frac{V}{\frac{\dot{m}_{substrats}}{D_{operation}}}$$

Si TSH augmente à volume constant alors $\dot{m}_{substrats}$ diminue

1) Est-ce possible?

2) Si oui

Efficacité énergétique ➤

Production de biogaz ???

Si on recircule le digestat solide:

Stratégie d'ajout

TSH constant

Efficacité énergétique ➤

Production de biogaz ➤

Stratégie de remplacement

TSH augmente légèrement

Efficacité énergétique ➤

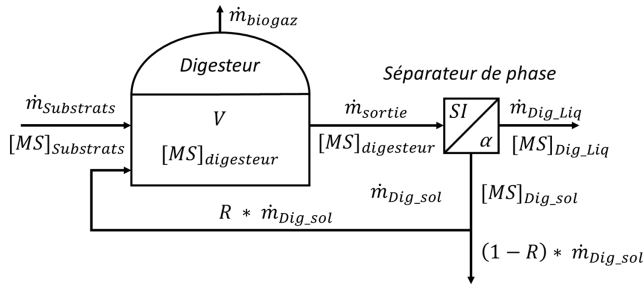
Production de biogaz constante

Deux options différentes

L'intérêt de la recirculation repose sur le découplage du temps de séjour des solides et des liquides

Cet intérêt se renforce quand la cuve de stockage est couverte et chauffée

➤ TSH versus recirculer le digestat solide: un exemple



$$TSH_{\text{classique}} = \frac{V}{\frac{\dot{m}_{\text{substrats}}}{D_{\text{operation}}}} = \frac{4000}{\frac{20000}{342}} = 69 \text{ jours}$$

-10% ↓ +11%

$$TSH_{\text{classique}} = \frac{V}{\frac{\dot{m}_{\text{substrats}}}{D_{\text{operation}}}} = \frac{4000}{\frac{18000}{342}} = 76 \text{ jours}$$

Si cuve de stockage chauffée et couverte → +50 jours en moyenne

On passe de 119 à 126 soit en fait +5,8%

Donc TSS des solides augmente de 11% et TSL de 6% mais ration diminue de 10%

Evolution de la production de biogaz incertaine (Charge appliquée?)

Test à grande échelle - évolution de la production de méthane

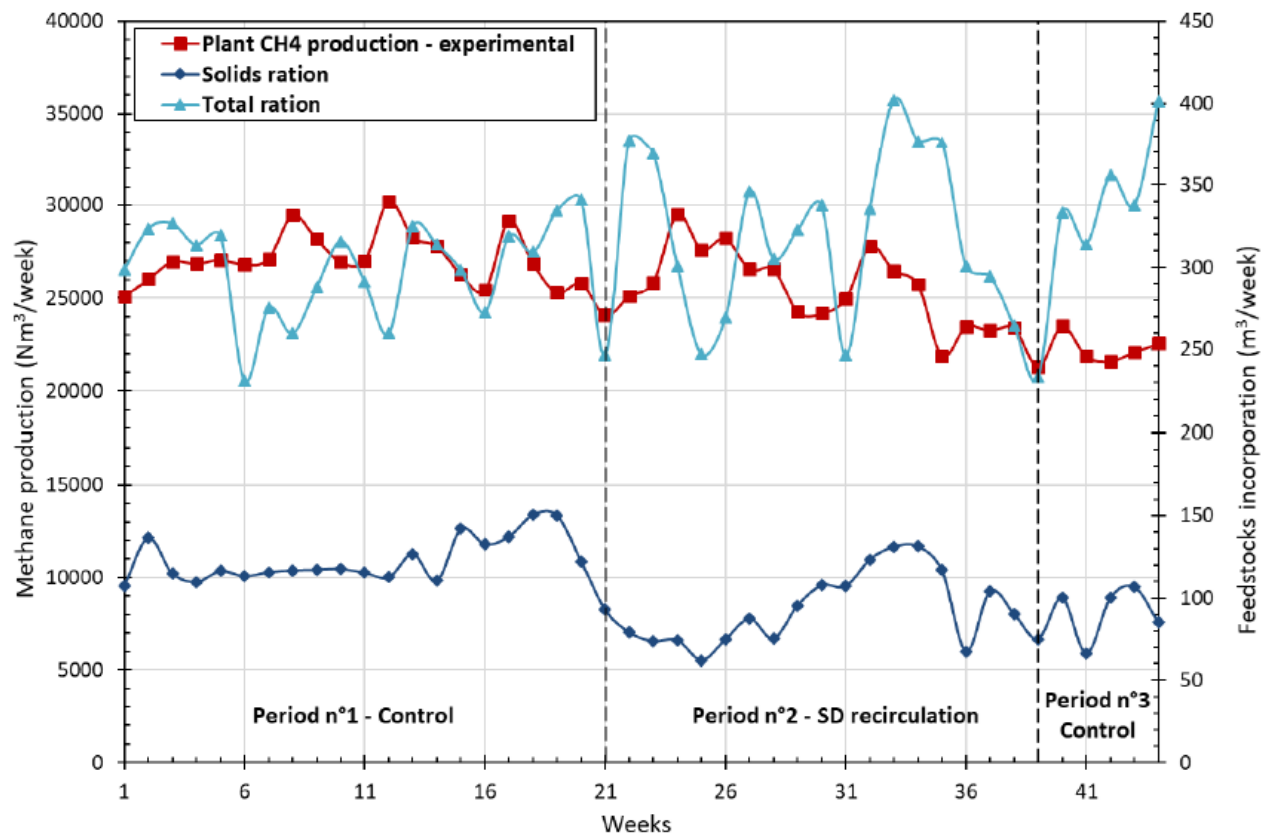


Figure 60: Weekly feedstocks supply and methane production data from full-scale trial on biogas plant A

Evolution des paramètres biologiques lors de la recirculation

	Parameter analysed	Control periods	Recirculation period
Digester	pH	8.2 ± 0.20	8.4 ± 0.14
	FOS (eq. CH ₃ COOH mg/L)	6,800 ± 690	7,060 ± 990
	TAC (eq. CaCO ₃ mg/L)	16,780 ± 2,220	14,800 ± 320
	FOS/TAC	0.41 ± 0.05	0.48 ± 0.07
Post-digester	pH	8.4 ± 0.16	8.6 ± 0.15
	FOS (eq. CH ₃ COOH mg/L)	4,600 ± 570	5,830 ± 1,230
	TAC (eq. CaCO ₃ mg/L)	17,730 ± 300	16,672 ± 800
	FOS/TAC	0.26 ± 0.03	0.35 ± 0.09

Pas d'impact significatif sur le pH et le FOS/TAC