



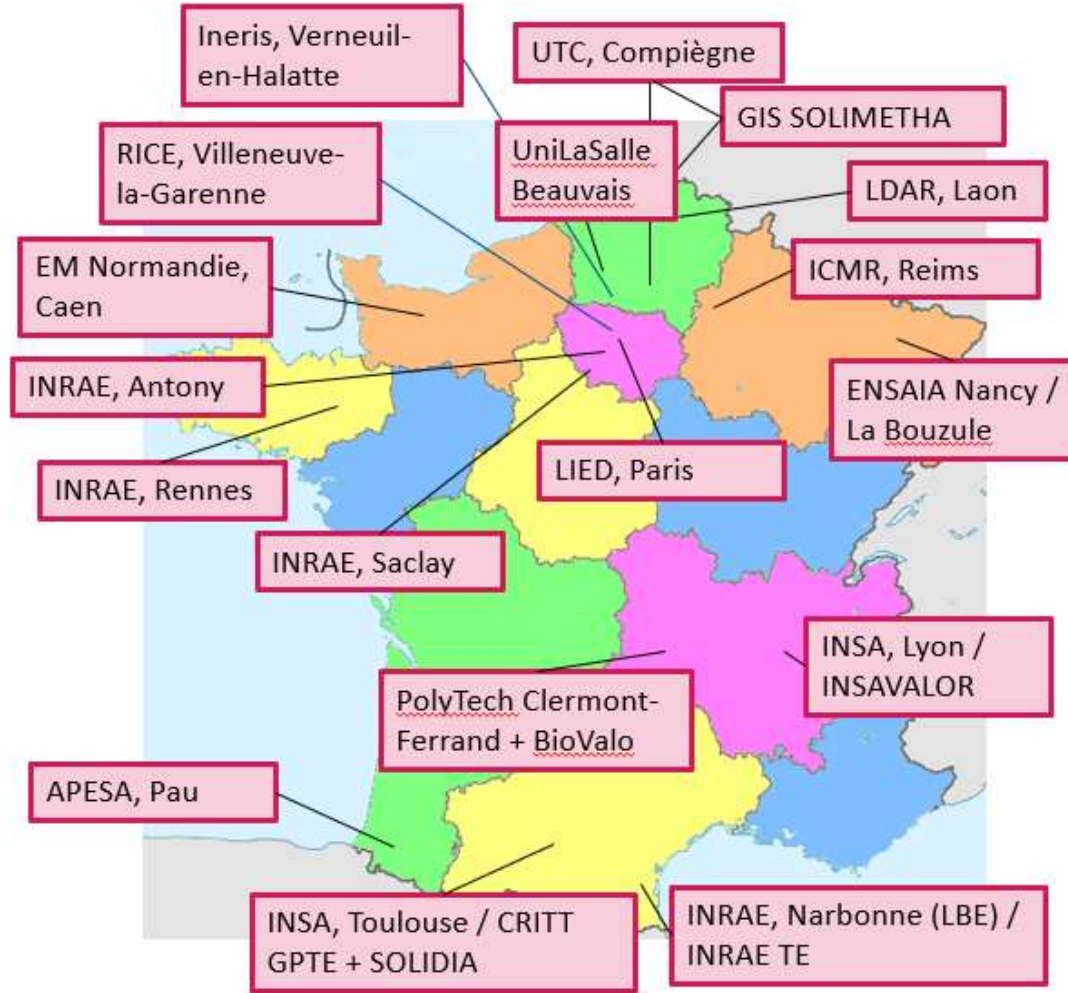
## **FLEXIMETHA :**

Flexibilisation de la production de biométhane pour répondre aux contraintes du réseau

Sébastien Pommier – INSA Toulouse  
Simon Métivier - SOLAGRO

04/12/2023

# Centre Technique national du Biogaz et de la Méthanisation



- Réseau des laboratoires
- Vecteur de diffusion des connaissances ([InfoMétha.org](http://InfoMétha.org) et [webinaires](#))
- Co-organisateur des [Journées Recherche Innovation](#)
- GT : Valorisation du CO<sub>2</sub>, Formations, Emissions fugitives
- Entité du Club Biogaz de l'ATEE, basée à La Défense
- Soutenu par l'ADEME depuis 2019

<https://atee.fr/energies-renouvelables/club-biogaz/ctbm>

# FLEXIMETHA

Flexibilisation de la production de biométhane  
pour répondre aux contraintes du réseau

*Sébastien Pommier – INSA Toulouse*

*Simon Métivier – SOLAGRO*



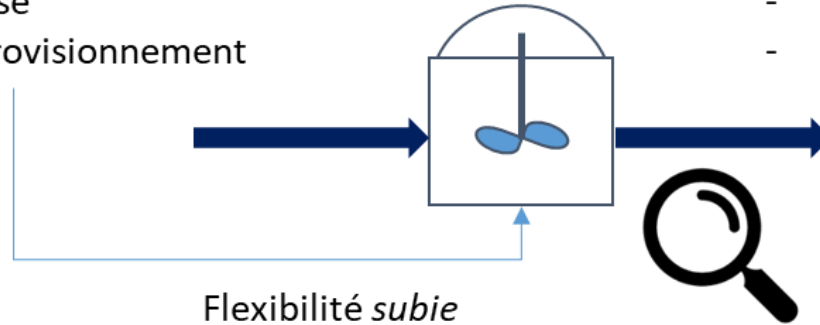
Flexibilité *recherchée*

## Intrants

- Composition de l'alimentation
- Charge admise
- Arrêts d'approvisionnement

## Réseaux

- Adaptation aux usages
- Modulation selon marchés « spot »
- Besoins en surproduction/effacement



Quelles conditions pour un changement de paradigme sur la stratégie d'alimentation des digesteurs ?



Comportement des consortiums microbiens face à ces variations de charge

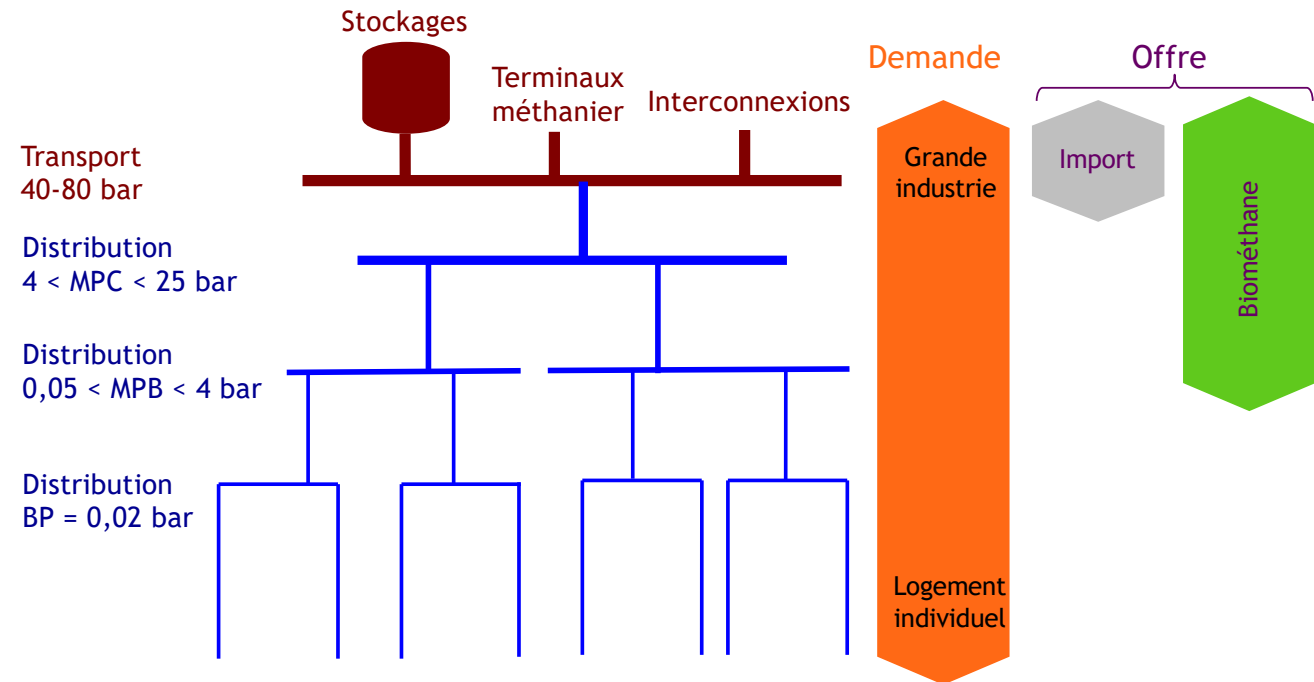
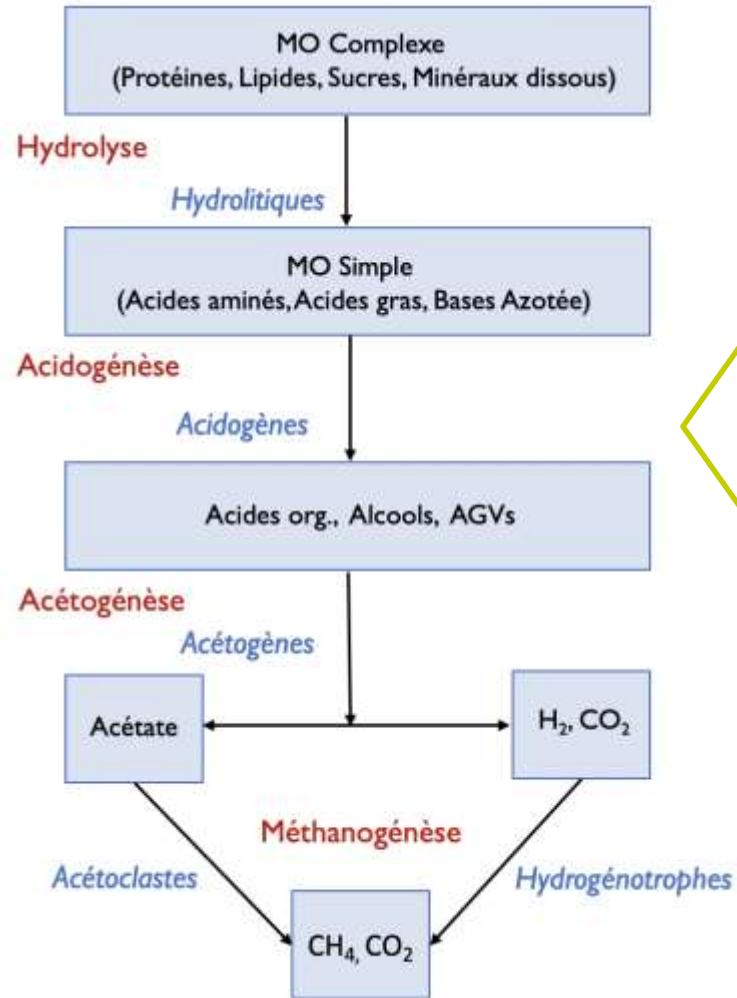


Dimensionnement et conduite des procédés

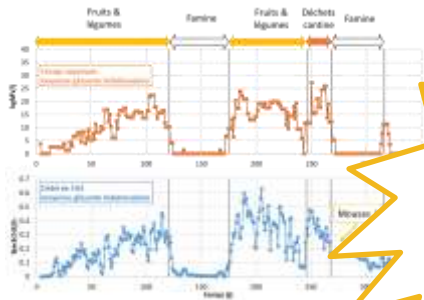


Business plan des installations

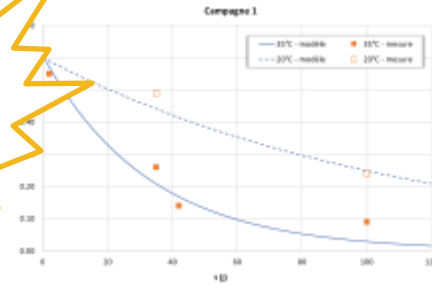




## SUIVI DE CAS PILOTE



## TESTS LABORATOIRE



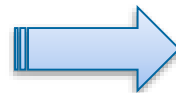
**Vu aux  
JRI 2022**

Données sur la désactivation biologique en cas de famine ou de sous-charge

## MODELISATION



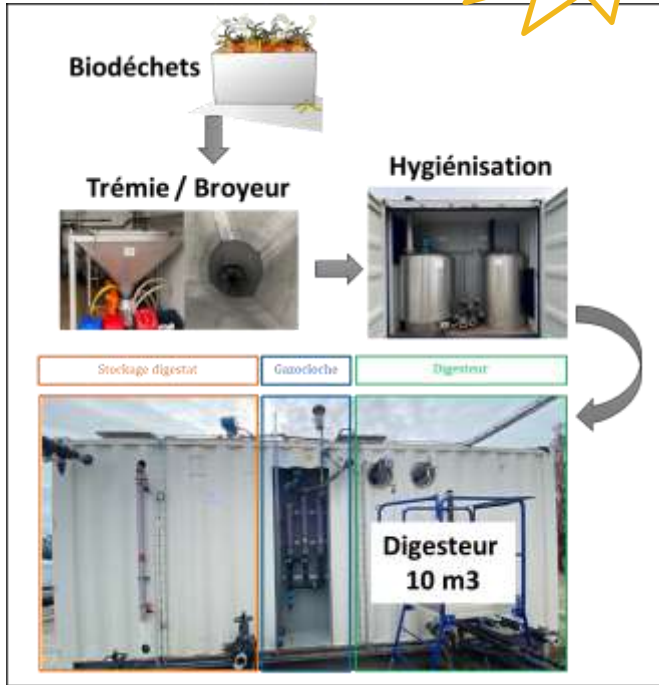
Outil de calcul numérique permettant la simulation dynamique d'une installation de méthanisation avec injection de biométhane



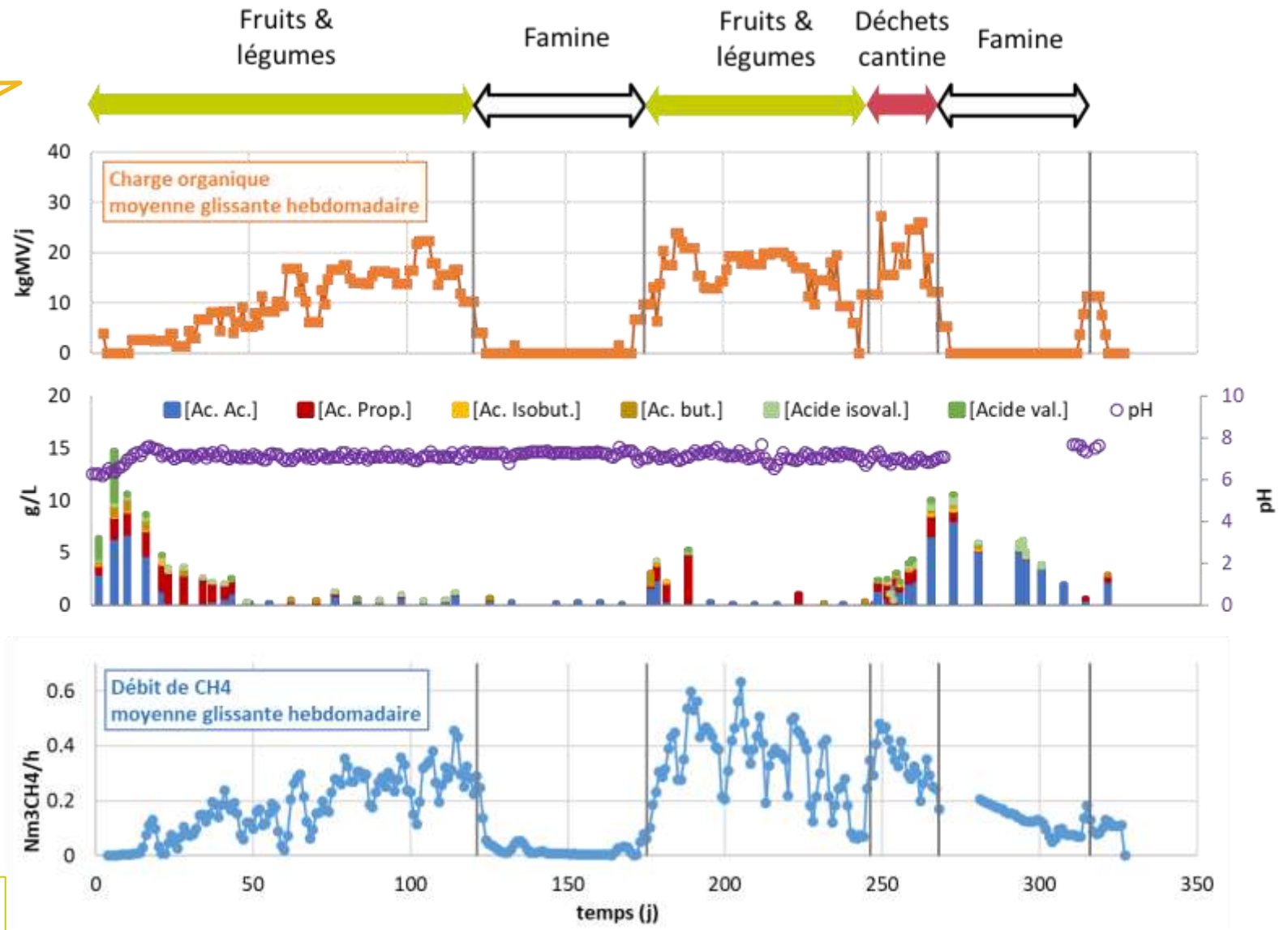
## ETUDE DE CAS

SUIVI DE CAS PILOTE

Vu aux JRI 2022

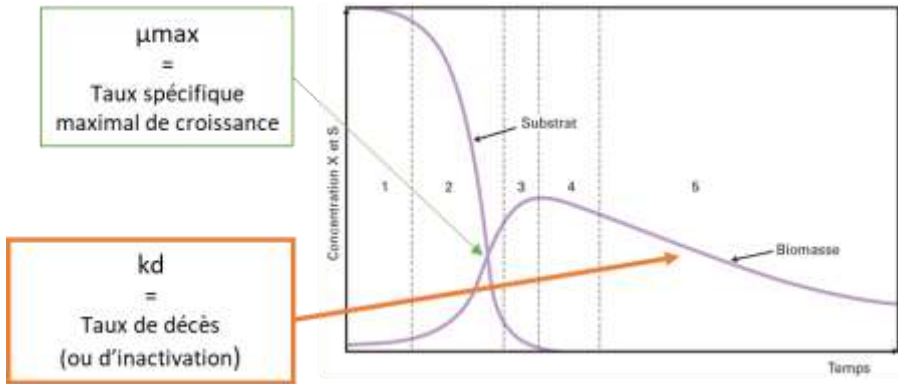


Reprise après famine = risques d'acidose



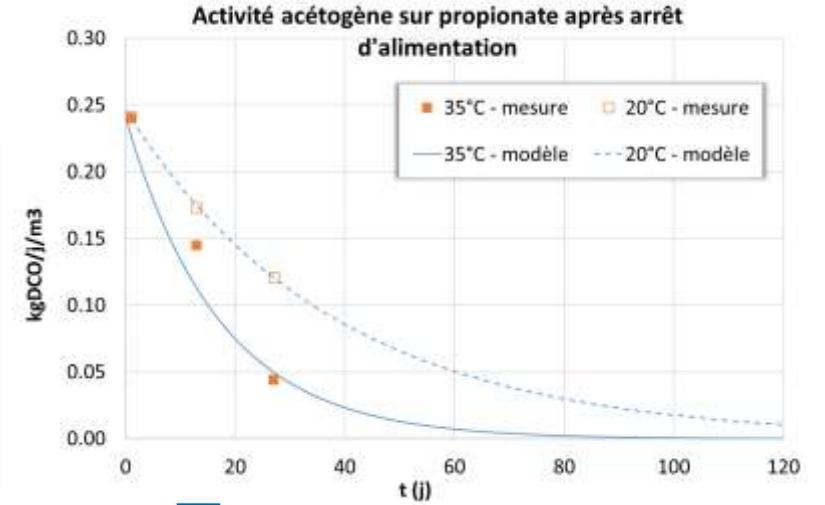


Quantification de la désactivation biologique en cas de famine ou de sous-charge

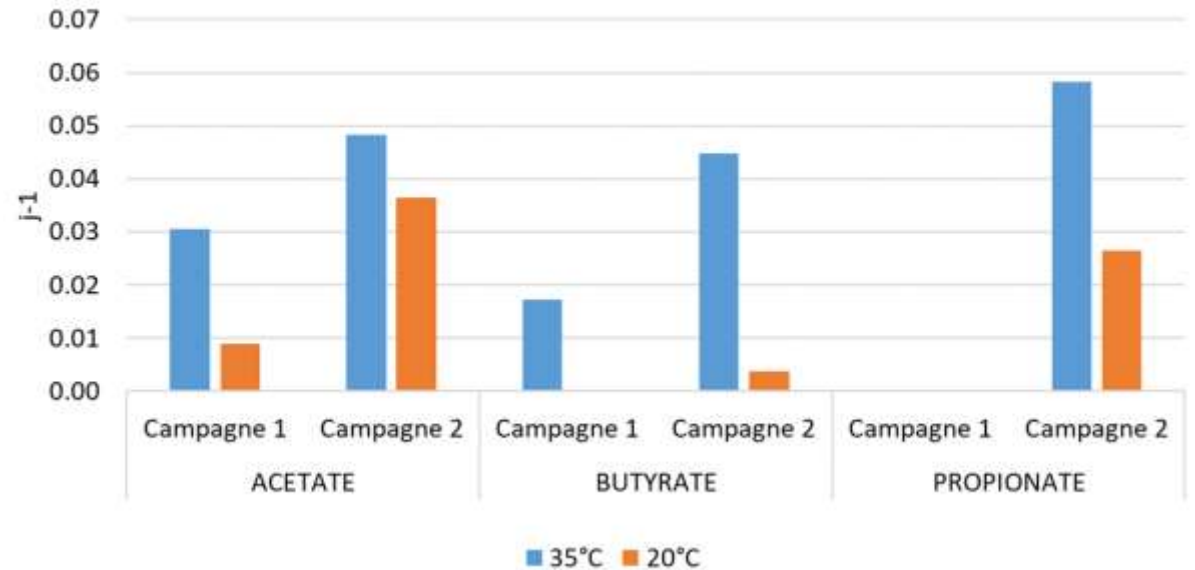


Constantes de désactivation à réévaluer à la hausse par rapport à la littérature

Tests d'activité spécifique

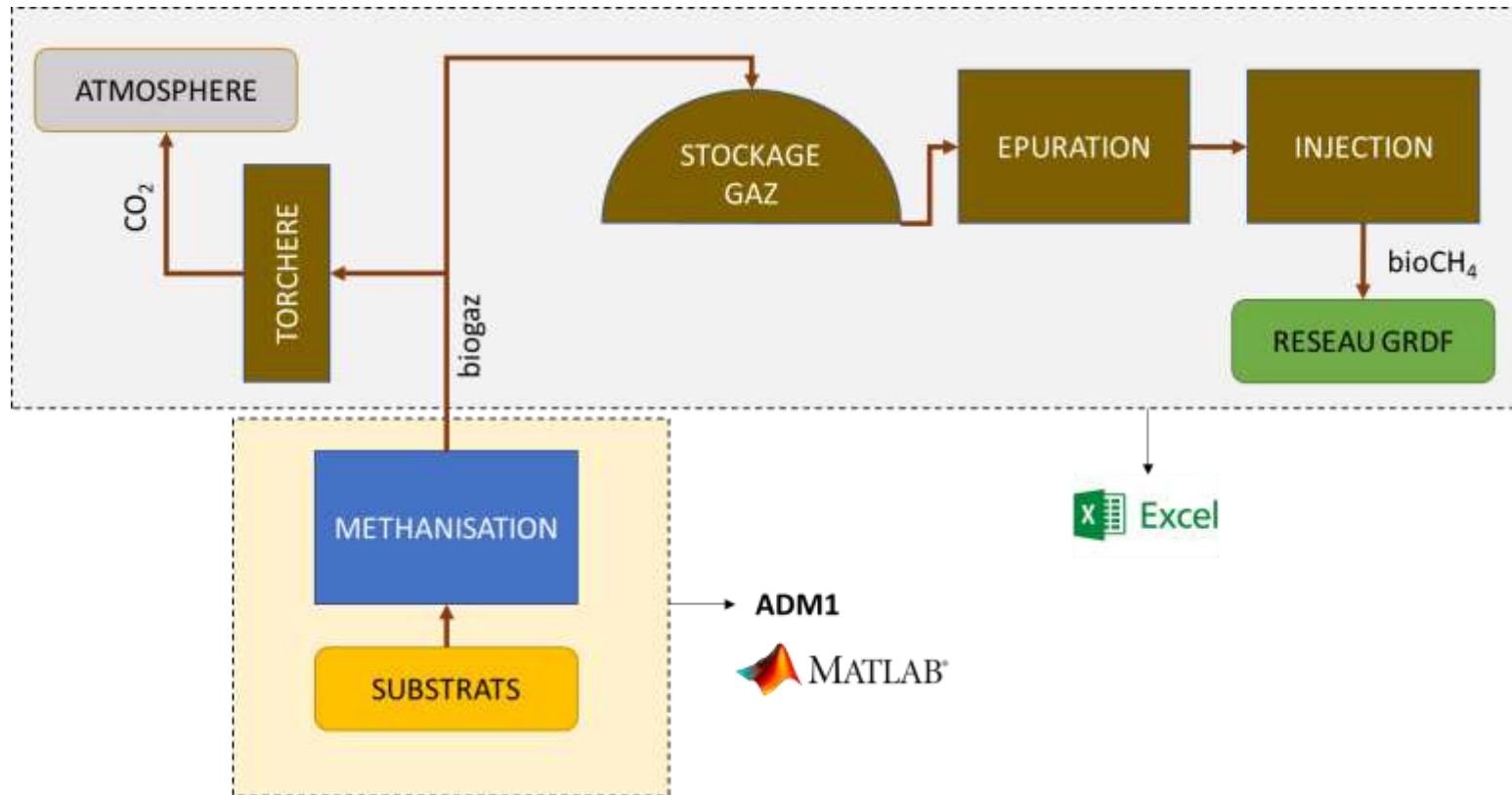


Constantes de perte d'activité spécifique

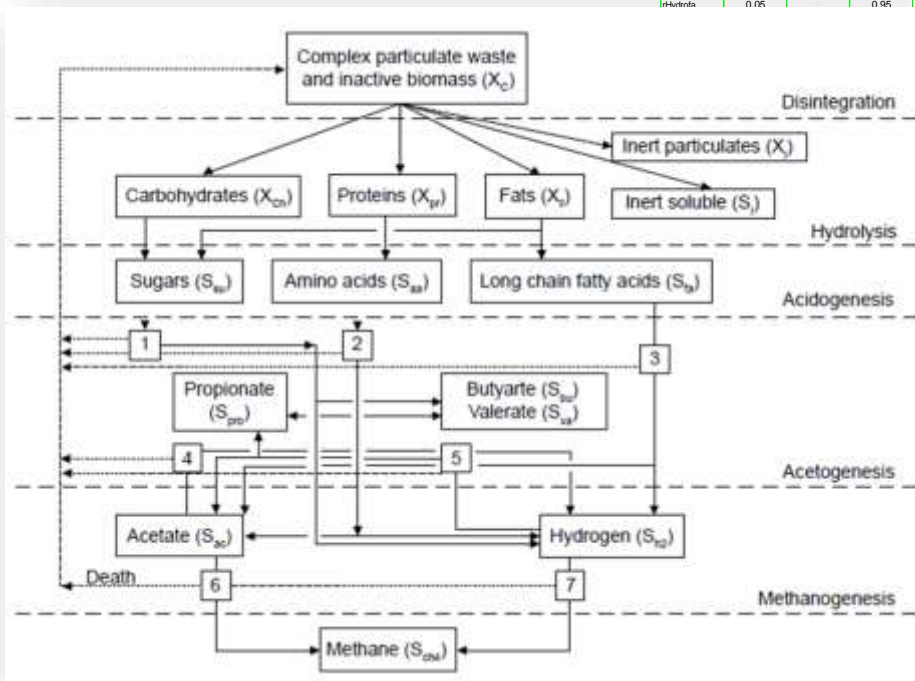




MODELISATION



	Ssu	Saa	Sfa	Sva	Sbu	Spro	Sac	Ss
	kgCOD m-3	kgCOD m-3	kgCOD m-3	kgCOD m-3	kgCOD m-3	kgCOD m-3	kgCOD m-3	kgCOD m-3
rDes	0.2	0.2	0.3					
rHydrohc	1							
rHydropt		1						
rHydrofa	0.05		0.95					
rHydrohc	1							
rHydropt		1						
rHydrofa	0.05		0.95					



	0.2116	0.1125	0.21	0.39	0.1
	-1	0.2392	0.046	0.368	0.0
			0.5076	0.658	0.2
				0.2914	0.1
				0.752	0.1
				0.5472	0.4
				-1	0.0

	Ssu	Saa	Sfa	Sva	Sbu	Ss
	kgCOD m-3	kgCOD m-3	kgCOD m-3	kgCOD m-3	kgCOD m-3	kgCOD m-3
rDes	0.2	0.2	0.3	0	0	0
rHydrohc	1	0	0	0	0	0
rHydropt	0	1	0	0	0	0
rHydrofa	0.05	0	0.95	0	0	0
rHydrohc	1	0	0	0	0	0.06
rHydropt	0	1	0	0	0	0
rHydrofa	0.05	0	0.95	0	0	0
rSglu	-1	0	0	0	0.1125	-1
rSaa	0	-1	0	0.2116	0.2392	0
rSfa	0	0	-1	0	0	0

Vitesse réactionnelle  
gCOD m-3 d-1, Mol m-3 d-2

rDes = kdis \* Xc  
rHydrohc = khyd\_RB\_ch \* Xch\_RB \* fh2o  
rHydropt = khyd\_RB\_pr \* Xpr\_RB \* fh2o  
rHydrofa = khyd\_RB\_li \* Xli\_RB \* fh2o  
rHydrohc = khyd\_SB\_ch \* Xch\_SB \* fh2o  
rHydropt = khyd\_SB\_pr \* Xpr\_SB \* fh2o  
rHydrofa = khyd\_SB\_li \* Xli\_SB \* fh2o

rdec\_XSu = kdec\_Xsu \* Xsu  
rdec\_XAa = kdec\_Xaa \* Xaa  
rdec\_XFa = kdec\_Xfa \* Xfa  
rdec\_XBu = kdec\_Xc4 \* Xc4  
rdec\_XPro = kdec\_Xpro \* Xpro  
rdec\_XAc = kdec\_Xac \* Xac  
rdec\_XH2 = kdec\_Xh2 \* Xh2  
rT\_co2 = kLa \* (Soo2 - 16 \* kh\_co2 \* Pgas\_co2)  
rT\_h2 = kLa \* (Sh2 - 16 \* kh\_h2 \* Pgas\_h2)  
rT\_ch4 = kLa \* (Sch4 - 16 \* kh\_ch4 \* Pgas\_ch4)  
rT\_nh3 = kLa \* (Snh3 - 16 \* kh\_nh3 \* Pgas\_nh3)

	Vitesse réactionnelle gCOD m-3 d-1, Mol m-3 d-2
rDes	rdis = kdis * Xc
rHydrohc	rhyd_RB,CH = khyd_RB_ch * Xch_RB * fh2o
rHydropt	rhyd_RB,Pr = khyd_RB_pr * Xpr_RB * fh2o
rHydrofa	rhyd_RB,Li = khyd_RB_li * Xli_RB * fh2o
rHydrohc	rhyd_SB,CH = khyd_SB_ch * Xch_SB * fh2o
rHydropt	rhyd_SB,Pr = khyd_SB_pr * Xpr_SB * fh2o
rHydrofa	rhyd_SB,Li = khyd_SB_li * Xli_SB * fh2o
rSglu	rfe,Su = km_fe_su * Xsu * Ssu / (k_s_su + Ssu) * f_ph_bac * fi_ni
rSaa	rfe,AA = km_fe_aa * Xaa * Saa / (k_s_aa + Saa) * f_ph_bac * fi_ni
rSfa	rfe,FA = km_fe_fa * Xfa * Sfa / (k_s_fa + Sfa) * f_ph_bac * fi_ni

## Paramètres cinétiques

k_m_dis	0.20	d-1
k_m_hydch_S	0.07	d-1
k_m_hydpr_S	0.07	d-1
k_m_hydli_S	0.07	d-1
k_m_hydch_M	0.20	d-1
k_m_hydpr_M	0.20	d-1
k_m_hydli_M	0.20	d-1
k_m_su	30.0	DCO.DCO-1.d-1
Ks_su	5.00E-01	KgDCO.m-3
k_m_aa	50.0	DCO.DCO-1.d-1
Ks_aa	3.00E-01	KgDCO.m-3
k_m_fa	6.00	DCO.DCO-1.d-1
Ks_fa	4.00E-01	KgDCO.m-3
k_m_c4	20.0	DCO.DCO-1.d-1
Ks_va	3.00E-01	KgDCO.m-3
Ks_bu	2.00E-01	KgDCO.m-3
k_m_pro	10.00	DCO.DCO-1.d-1
Ks_pro	3.00E-01	KgDCO.m-3
k_m_ac	2.00	DCO.DCO-1.d-1
Ks_ac	1.50E-01	KgDCO.m-3
k_m_h2	35.00	DCO.DCO-1.d-1
Ks_h2	7.00E-06	KgDCO.m-3
Ks_co2	1.00E-01	KgDCO.m-3
k_dec_Xglu	0.020	d-1
k_dec_Xaa	0.020	d-1
k_dec_Xfa	0.020	d-1
k_dec_Xc4	0.045	d-1
k_dec_Xpro	0.066	d-1
k_dec_Xac	0.048	d-1
k_dec_Xh2	0.020	d-1
kLa	10.00	d-1
pHII_aa	4.00	-
pHul_aa	5.50	-
pHII_ac	6.00	-
pHul_ac	7.00	-
pHII_h2	5.00	-
pHul_h2	6.00	-
Ks_in	2.00E-04	kmol N.m-3
Ki_h2_fa	5.00E-06	KgDCO.m-3
Ki_h2_c4	1.00E-05	KgDCO.m-3
Ki_h2_pro	1.00E-06	KgDCO.m-3
Ki_nh3	3.00E-02	kmol N.m-3

## Paramètres physico-chimiques

Ka_ac	1.74E-05	M
Ka_co2	4.73E-07	M
Kw	2.06E-14	M
Kh_co2	2.58E-02	M/bar
Kh_h2	7.29E-04	M/bar
Kh_ch4	1.15E-03	M/bar
Ka_nh4	1.09E-09	M
Ka_pro	1.32E-05	M
Ka_bu	1.51E-05	M
Ka_va	1.38E-05	M
Ka_lac	7.94E-05	M

## Composition substrats

	MS	MV	DCO	Norg	BMP
	%	%	gDCO/gM <sub>S</sub>	gN/gMS	NmL/gMS
Fumier bovin compact	24.9%	80.9%	1.50	0.02200	166.3
Lisier Bovin	9.4%	79.6%	1.50	0.02200	173.3
Ensilage CIVE d'hiver	25.0%	90.0%	1.40	0.00900	287.7
Paille de céréales	87.5%	88.8%	1.40	0.00560	195.4
Fiente volaille	57.6%	73.0%	1.40	0.03100	209.7
Eau	0.0%	0.0%	0.00	0.00000	0.0

## Programme d'alimentation

t	Fumier bovin compact	Lisier Bovin	Ensilage CIVE d'hiver	Paille de céréales	Fiente volaille	Eau
jours	T/j	T/j	T/j	T/j	T/j	T/j
0	3.45	3.45	9.19	0.43	1.28	1.06
5	3.45	3.45	9.19	0.43	1.28	1.06
10	6.90	6.90	18.39	0.85	2.55	2.13
50	13.80	13.80	36.78	1.70	5.11	4.25
108	13.80	13.80	36.78	1.70	5.11	4.25
111	13.80	13.80	0.00	1.70	5.11	4.25

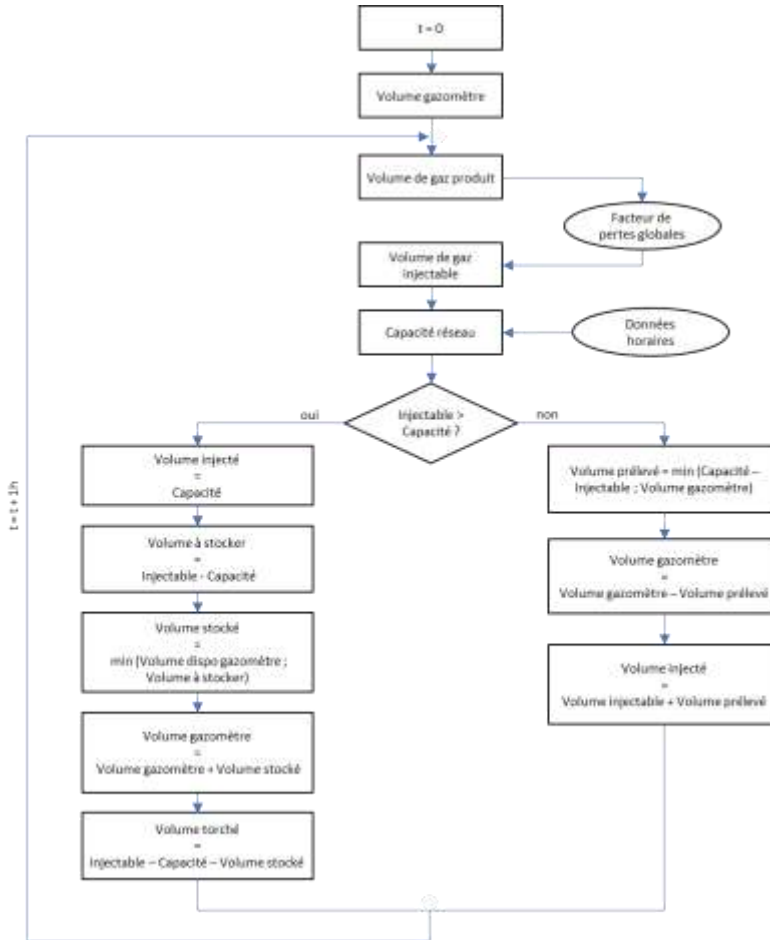
**Cinétiques de production de biogaz simulées**

**ADM1**

**Volume gazomètre**

**Performances épurateur**

**Capacités d'injection du réseau**

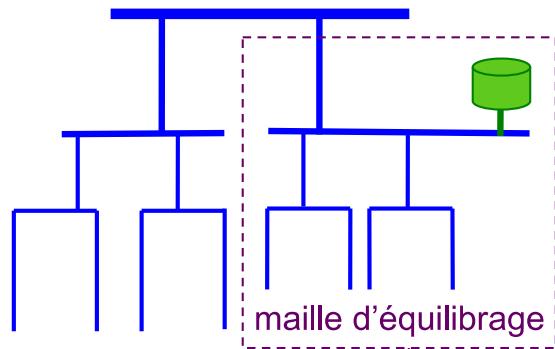
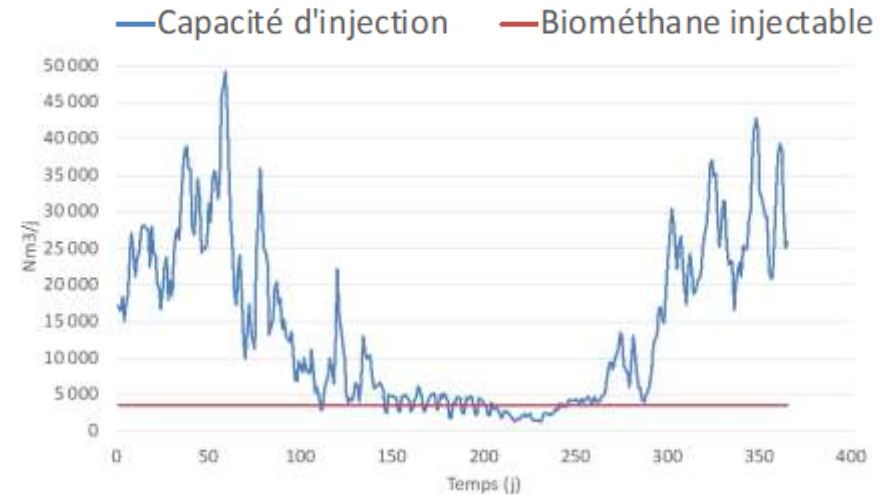


**Calcul des quantités de gaz injectées, torchées et stockées dans le gazomètre**

*Pas de temps = 1 heure*

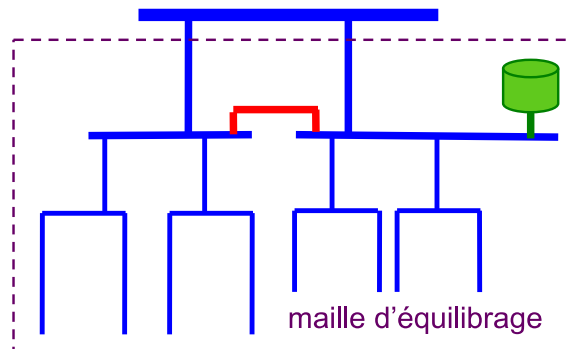


# Problématique réseaux



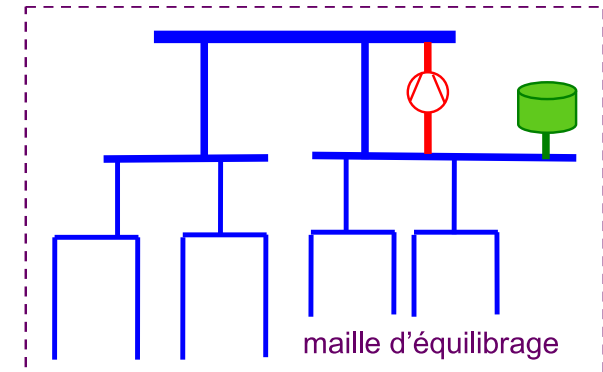
**Injection <= Consommation**

## Maillage

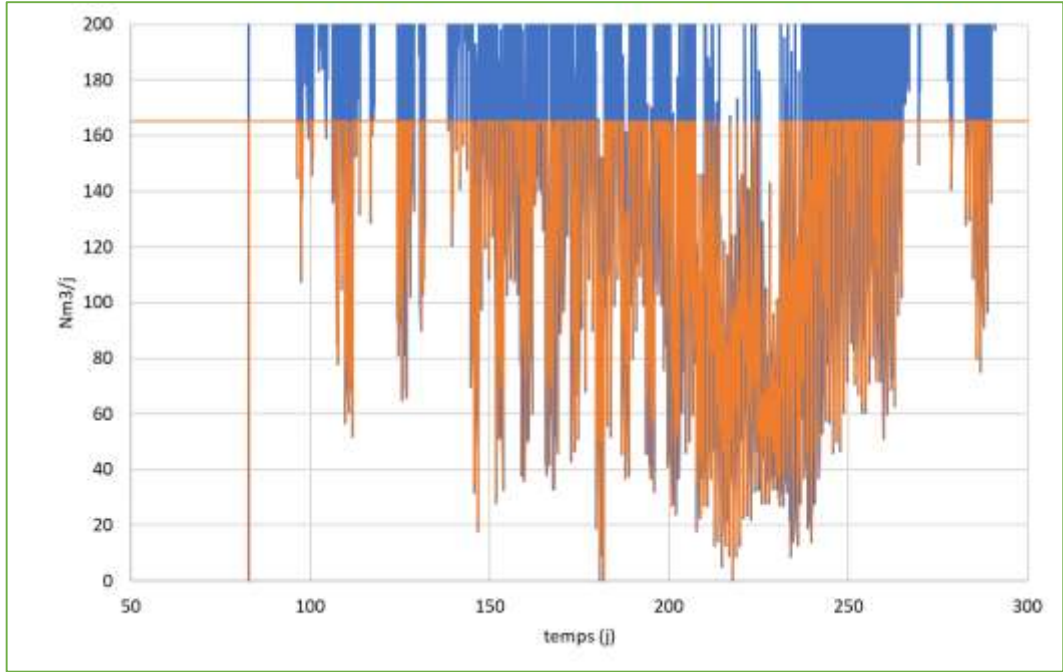
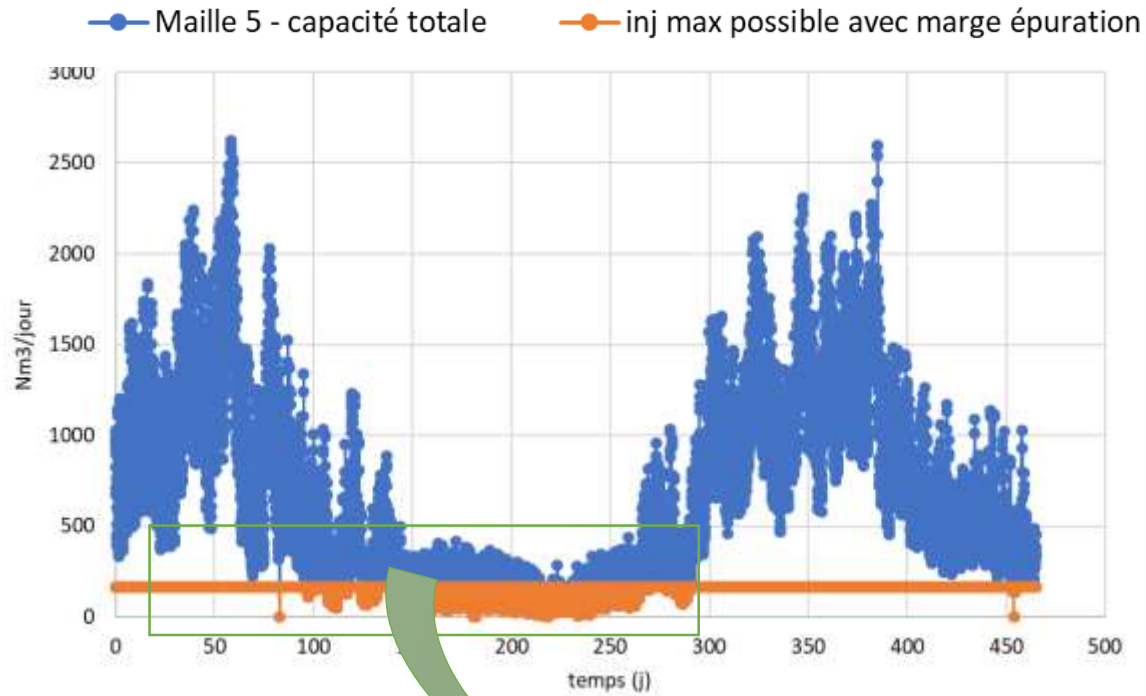


**Injection > Consommation**

## Rebours



# Maille considérée



Production > capacité maille sur plusieurs périodes

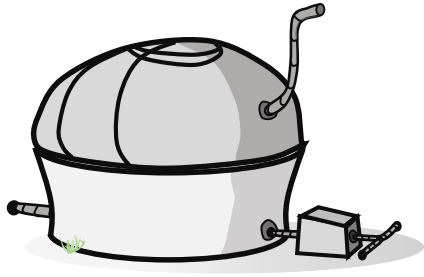
## Cas d'unité de méthanisation étudié



Type de substrat	Gisement réel (tMB/an)
Eau de pluie	1 250
Fumier bovin compact	4 050
Lisier Bovin	4 050
Ensilage CIVE d'hiver	10 800
Paille de céréales	500
Fiente volaille	1 500
<b>Total</b>	<b>22 150</b>

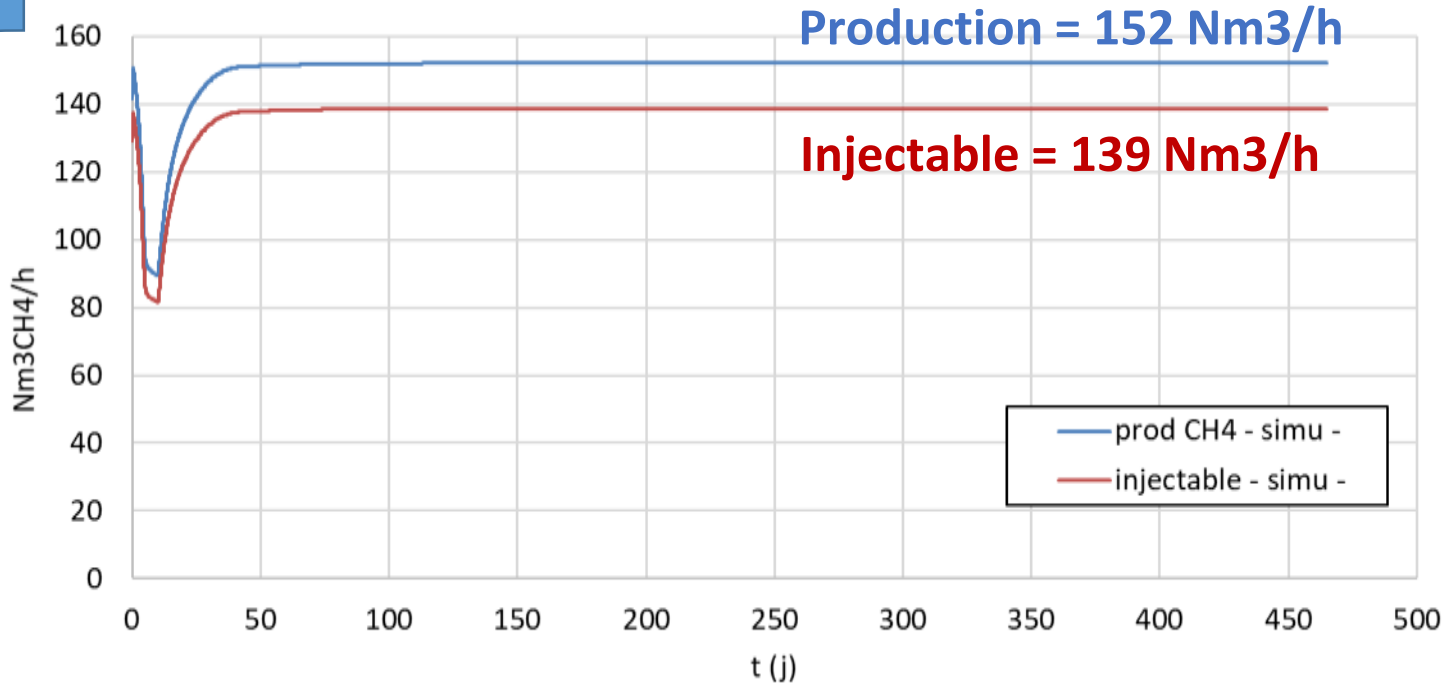
→ **Substrat pivot pour la flexibilisation**

# Cas d'unité de méthanisation étudié



Gazomètre : 1200 m<sup>3</sup> (8h de stockage)  
 Digesteur : 4250 m<sup>3</sup>  
 Temps de séjour = 70 jours  
 Taux de disponibilité du CH<sub>4</sub> pour injection = 91,2%

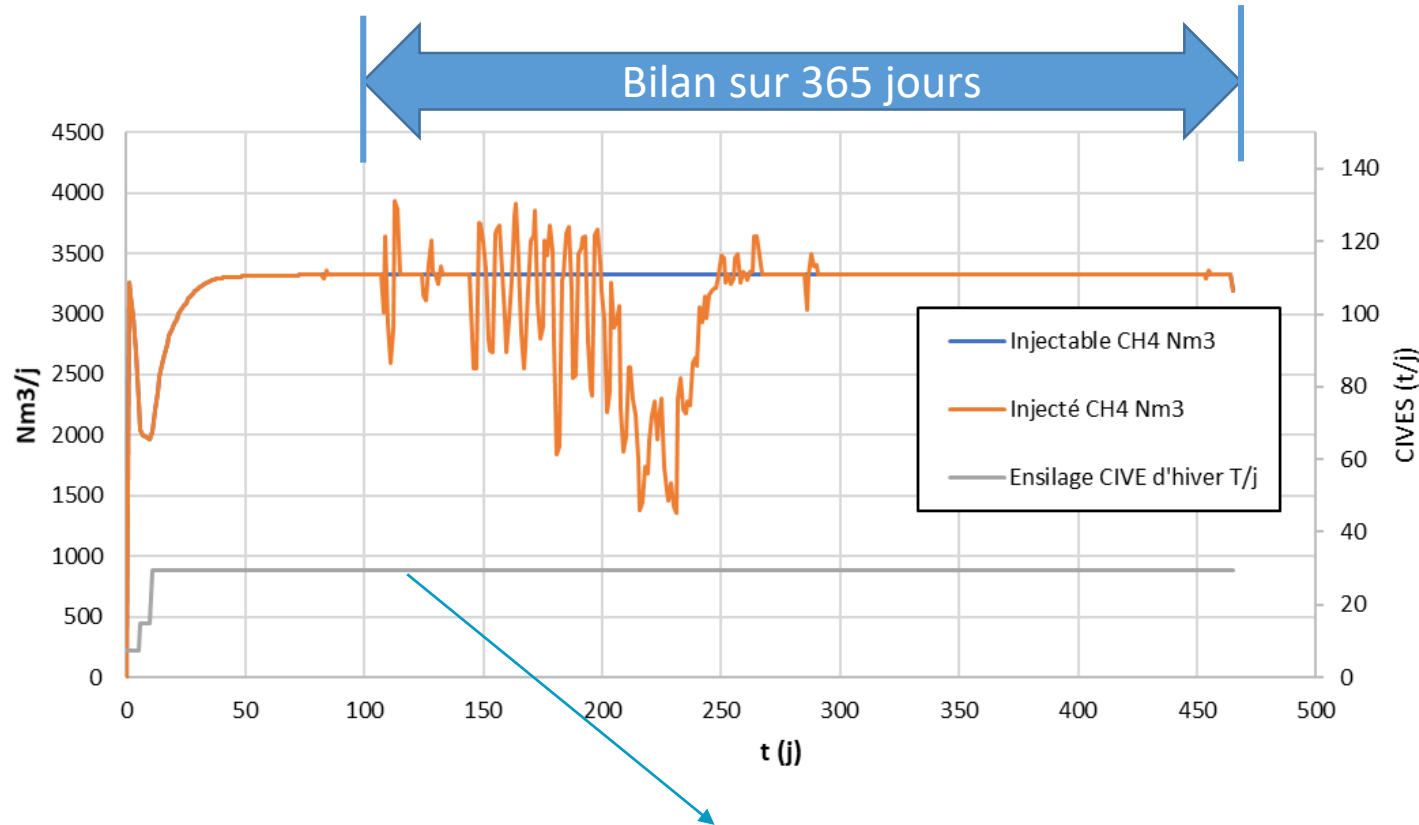
Simulation  
 # capacité initiale



**Dimensionnement  
 poste d'injection  
 =  
 +10% / production  
 =  
 165 Nm<sup>3</sup>/h**



# Approche pour analyser des scénarios flexibles



## Performances

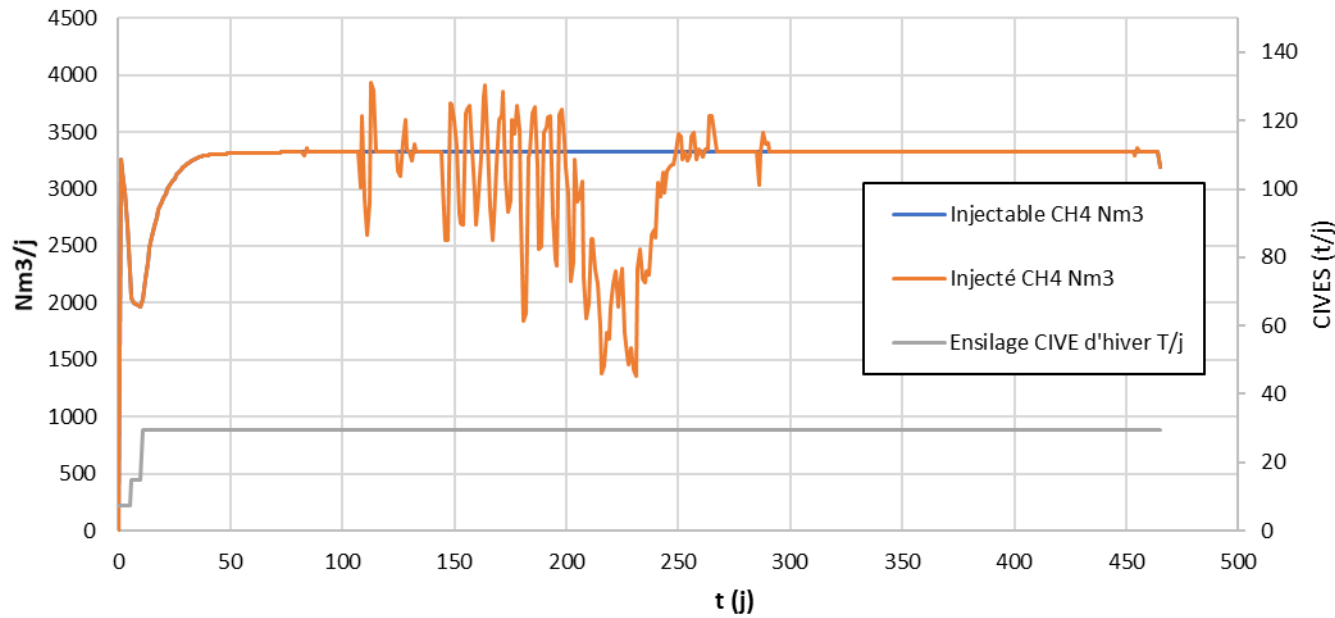
Production injectable	Injection réalisée	Torché
<i>Nm3CH4</i>	<i>Nm3CH4</i>	<i>Nm3CH4</i>

**Adaptation du tonnage d'ENSILAGE CIVE pour ajuster production à demande réseau**

Simulation  
# Test 0 : production constante

Scénario de base : on maintient la production constante, même pendant les périodes d'injection restreinte

Biométhane produit et injecté

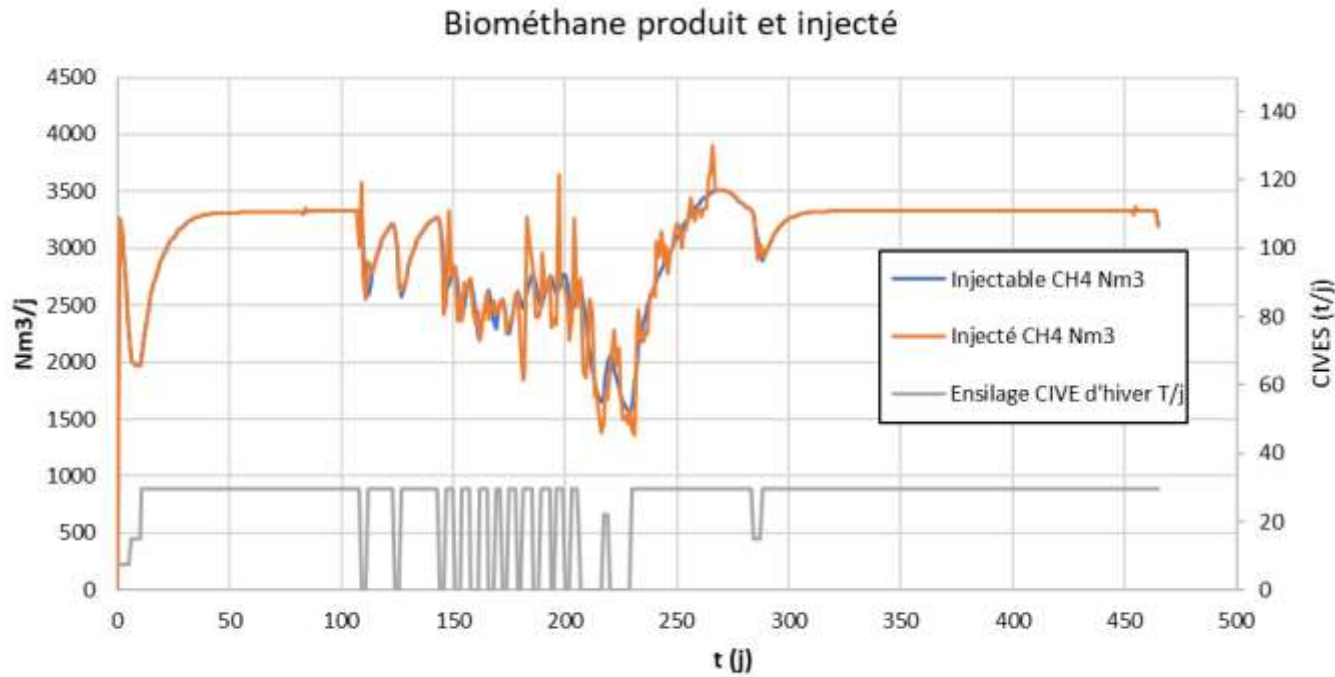


Production injectable	Injecté	Perdu
<i>Nm3CH4</i>	<i>Nm3CH4</i>	<i>Nm3CH4</i>
<b>1 218 006</b>	<b>1 1162 417</b>	<b>55 589</b>

**Pertes = 4,6% en torchère**

Simulation  
# Test 5 : effacement

On cesse d'alimenter en CIVES la veille des jours où il y a un besoin d'effacement

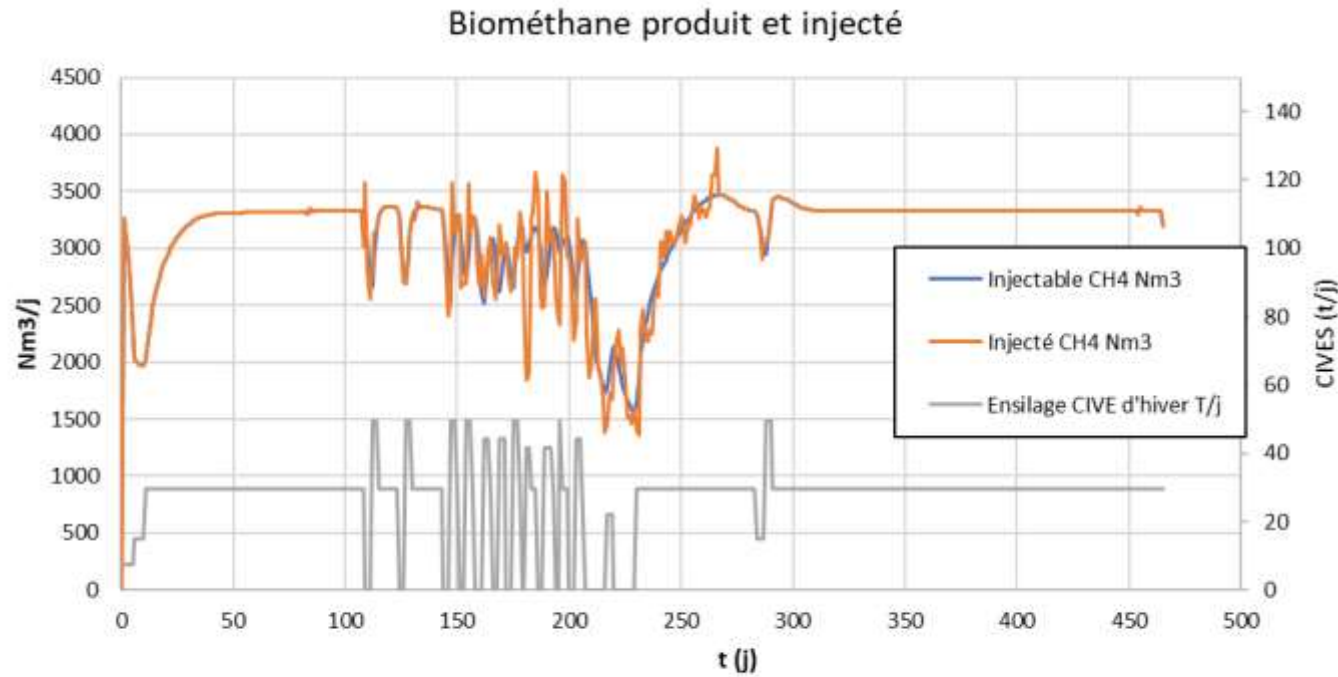


Production injectable	Injecté	Perdu
<i>Nm3CH4</i>	<i>Nm3CH4</i>	<i>Nm3CH4</i>
<b>1 109 950</b>	<b>1 108 875</b>	<b>1 075</b>

**Pertes = 0,1% en torchère**

Simulation  
# Test 6 : effacement + surcharge

On cesse d'alimenter en CIVES la veille des jours où il y a un besoin d'effacement et on applique une surcharge les 2 premiers jours après l'effacement, lorsque l'injection maximale redevient possible



Production injectable	Injecté	Perdu
<i>Nm3CH4</i>	<i>Nm3CH4</i>	<i>Nm3CH4</i>
<b>1 148 278</b>	<b>1 142 646</b>	<b>5 632</b>

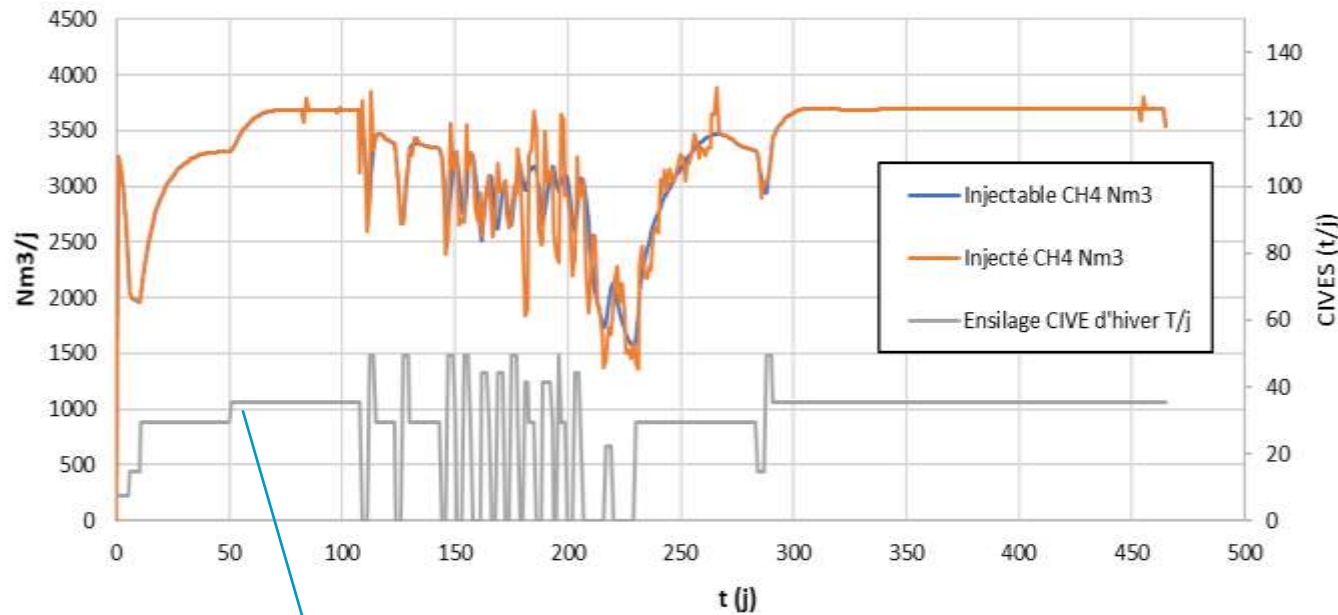
**Pertes = 0,5% en torchère**

### Simulation

# Test 7 : effacement + surcharge + CIVES annuelles maintenues

On cesse d'alimenter en CIVES la veille des jours où il y a un besoin d'effacement et on applique une surcharge les 2 premiers jours après l'effacement, lorsque l'injection maximale redevient possible  
On répartit la quantité de CIVES manquant sur les périodes hivernales pour avoir le tonnage du cas de base sur la période de fonctionnement à injection max

Biométhane produit et injecté

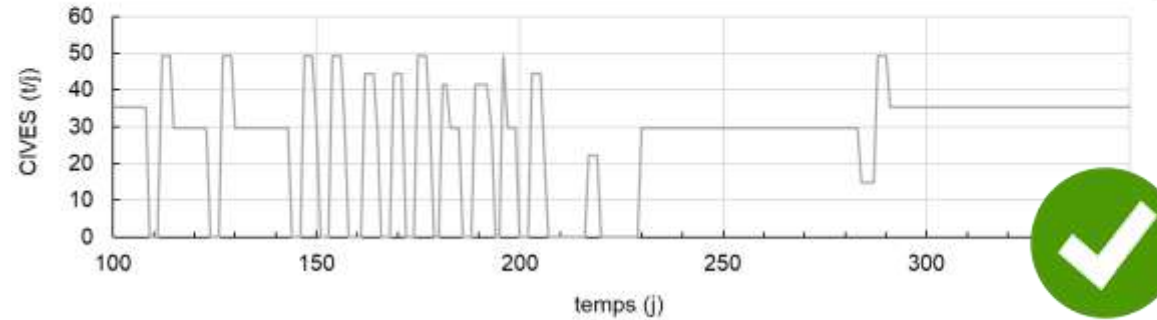
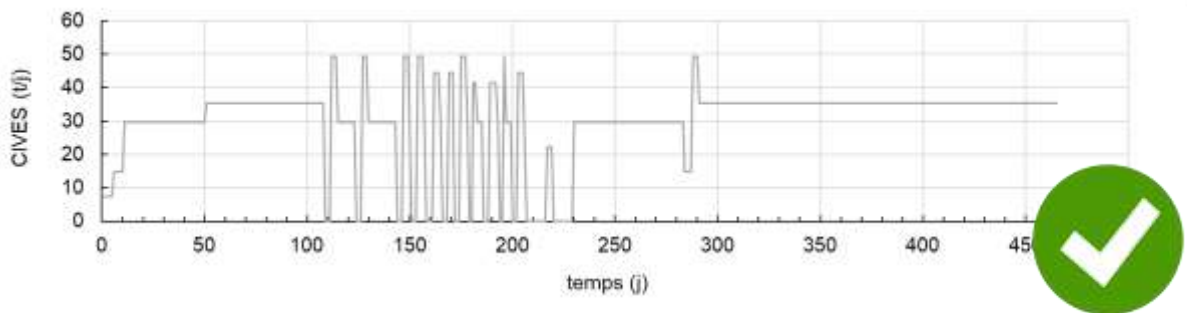
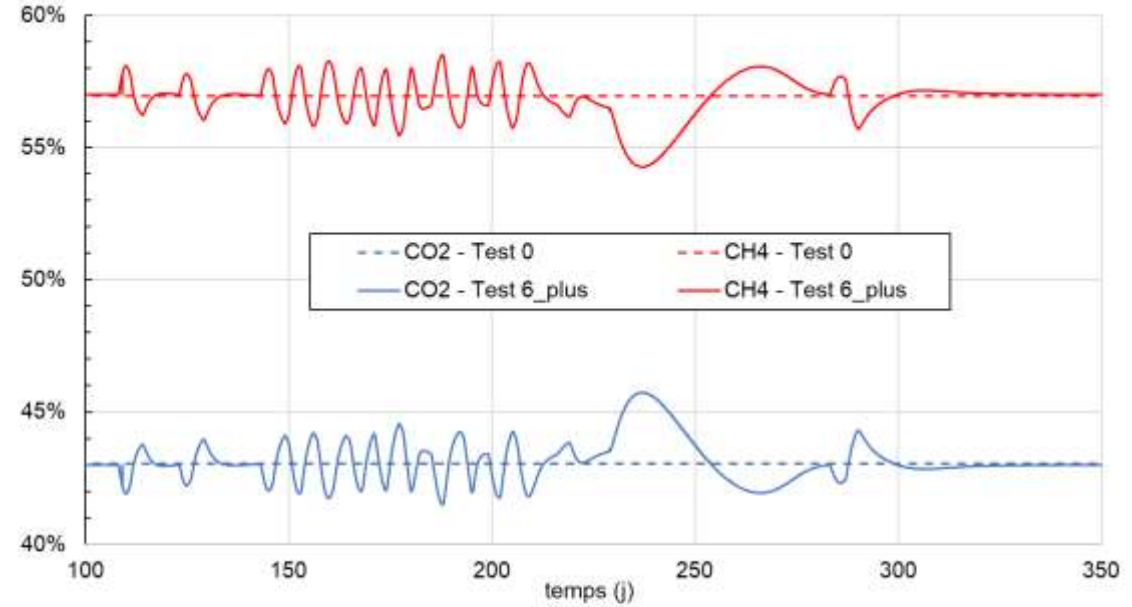
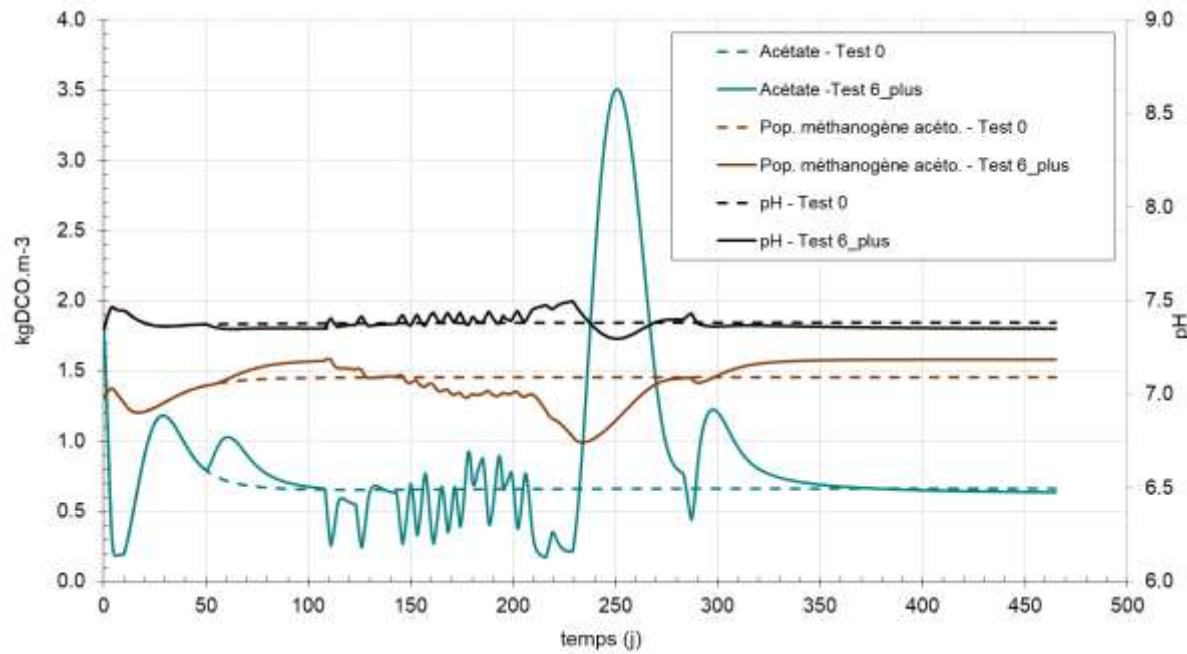


+20% de CIVES en période hivernale

Production injectable	Injecté	Perdu
<i>Nm3CH4</i>	<i>Nm3CH4</i>	<i>Nm3CH4</i>
<b>1 215 734</b>	<b>1 209 612</b>	<b>6 121</b>

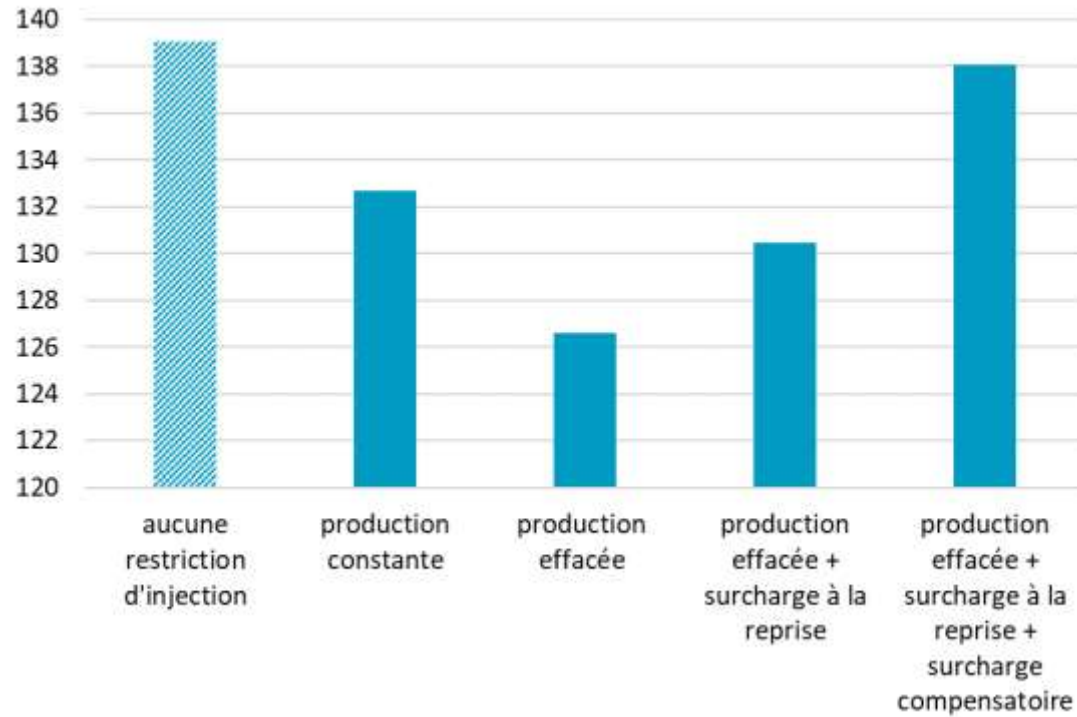
**Pertes = 0,5% en torchère**

# Conséquences sur la stabilité

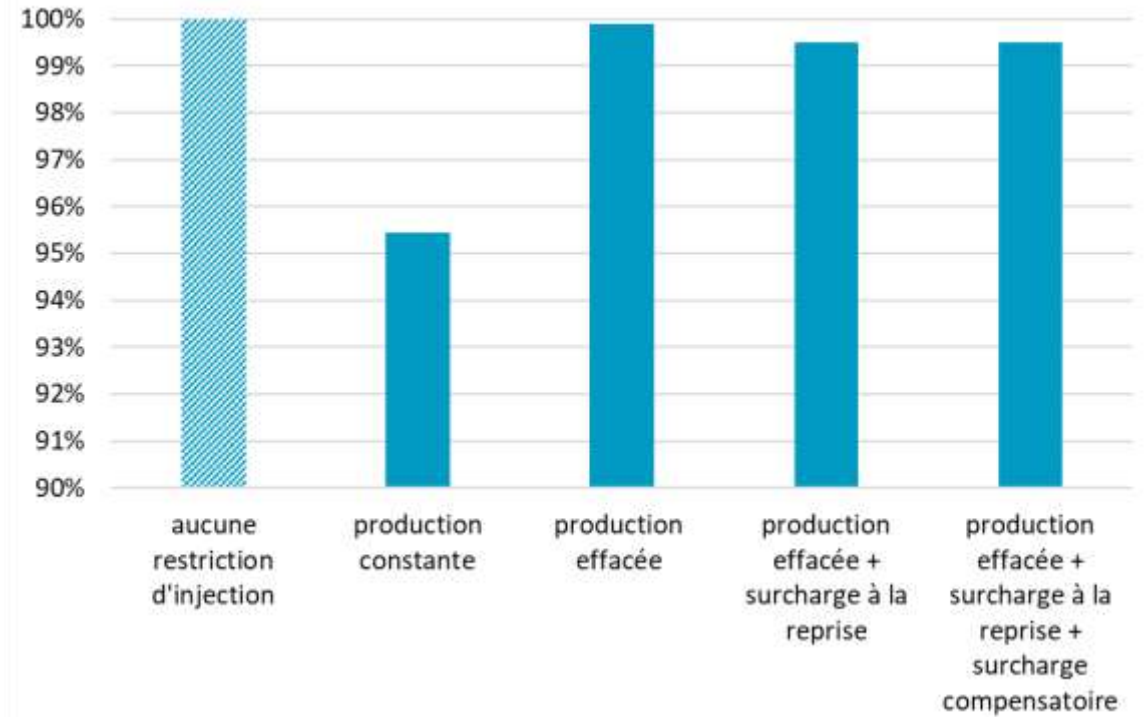


# Bilan des scénarios

Débit moyen injectée Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/h



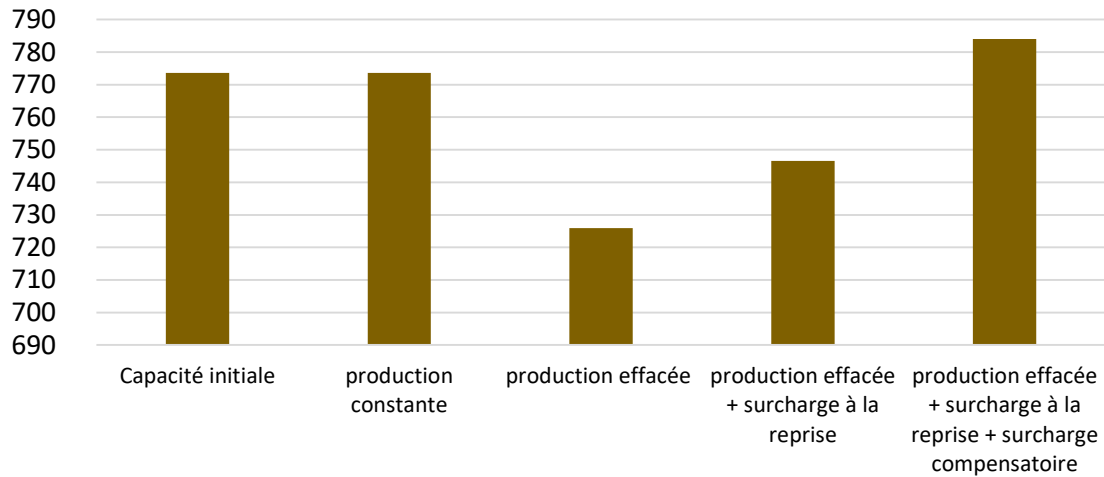
Taux d'injection %



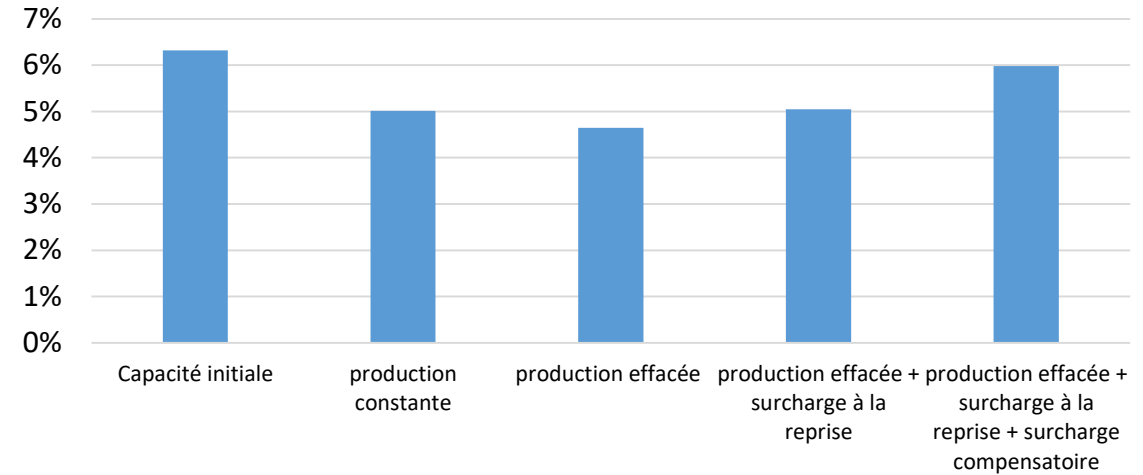
# Bilan des scénarios

Hypothèses	
Cives	0.022 k€/T
Injection	0.00109 k€/Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
OPEX	+10 k€ si flexible

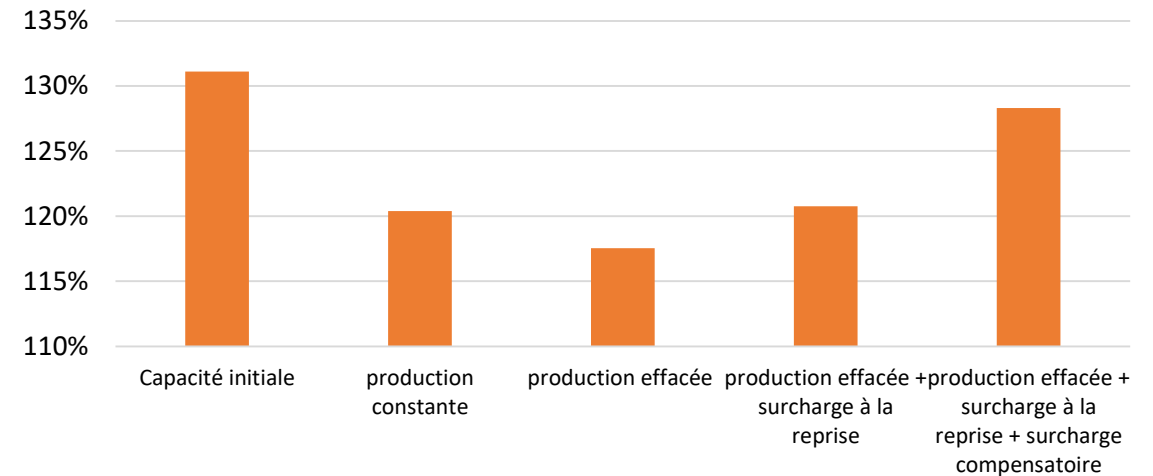
OPEX (k€/an)



TRI



DSCR





## Conclusions & Perspectives

- ❑ **Un outil de simulation** pour préparer des scénarios d'alimentation adaptés aux besoins du réseau
- ❑ **Possibilité de mieux répartir dans le temps un substrat pivot stockable** (ex. CIVES) pour conserver performances globales annuelles malgré le besoin d'effacement périodique

# FLEXIMETHA 2

2024

- ❑ **Etendre les scénarios prospectifs**, renforcer la qualité des résultats de simulation et affiner les stratégies de pilotage répondant aux contraintes réseau
- ❑ Préparer la rédaction d'un **appel à projet expérimental** de grande ampleur dans le but de réaliser une démonstration industrielle des stratégies proposées d'après les simulations

# Merci pour votre attention

Le rapport complet est disponible : <http://gpte.critt.net/fleximetha-vers-une-production-flexible-de-biogaz-pour-faire-face-aux-contraintes-des-reseaux/>

Contacts : [spommier@insa-toulouse.fr](mailto:spommier@insa-toulouse.fr) / [simon.metivier@solagro.asso.fr](mailto:simon.metivier@solagro.asso.fr)

LES INSCRIPTIONS SONT OUVERTES !

**JRI**  
**2024**



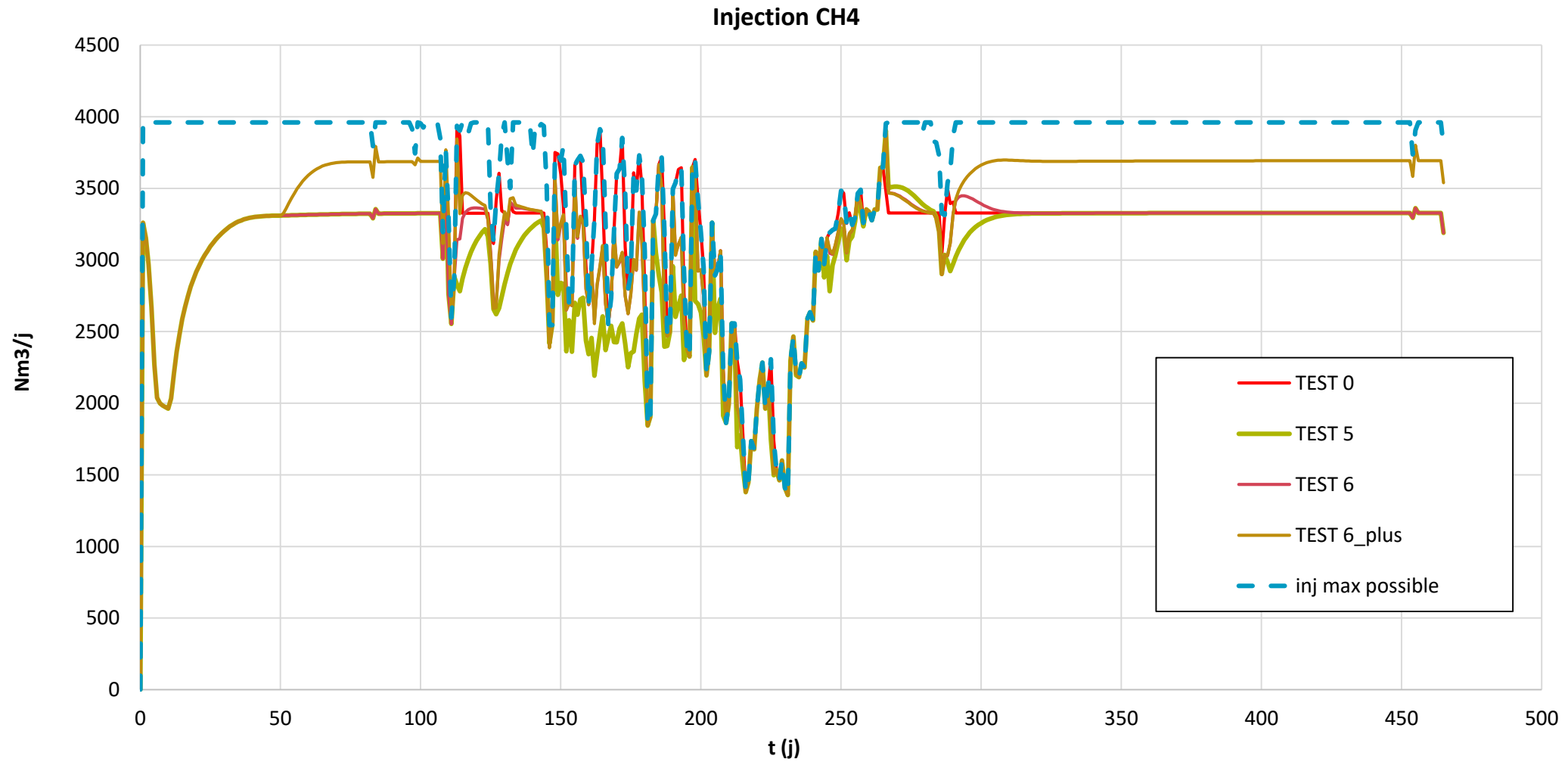
26 - 28 mars 2024 PAU

## JOURNÉES RECHERCHE INNOVATION



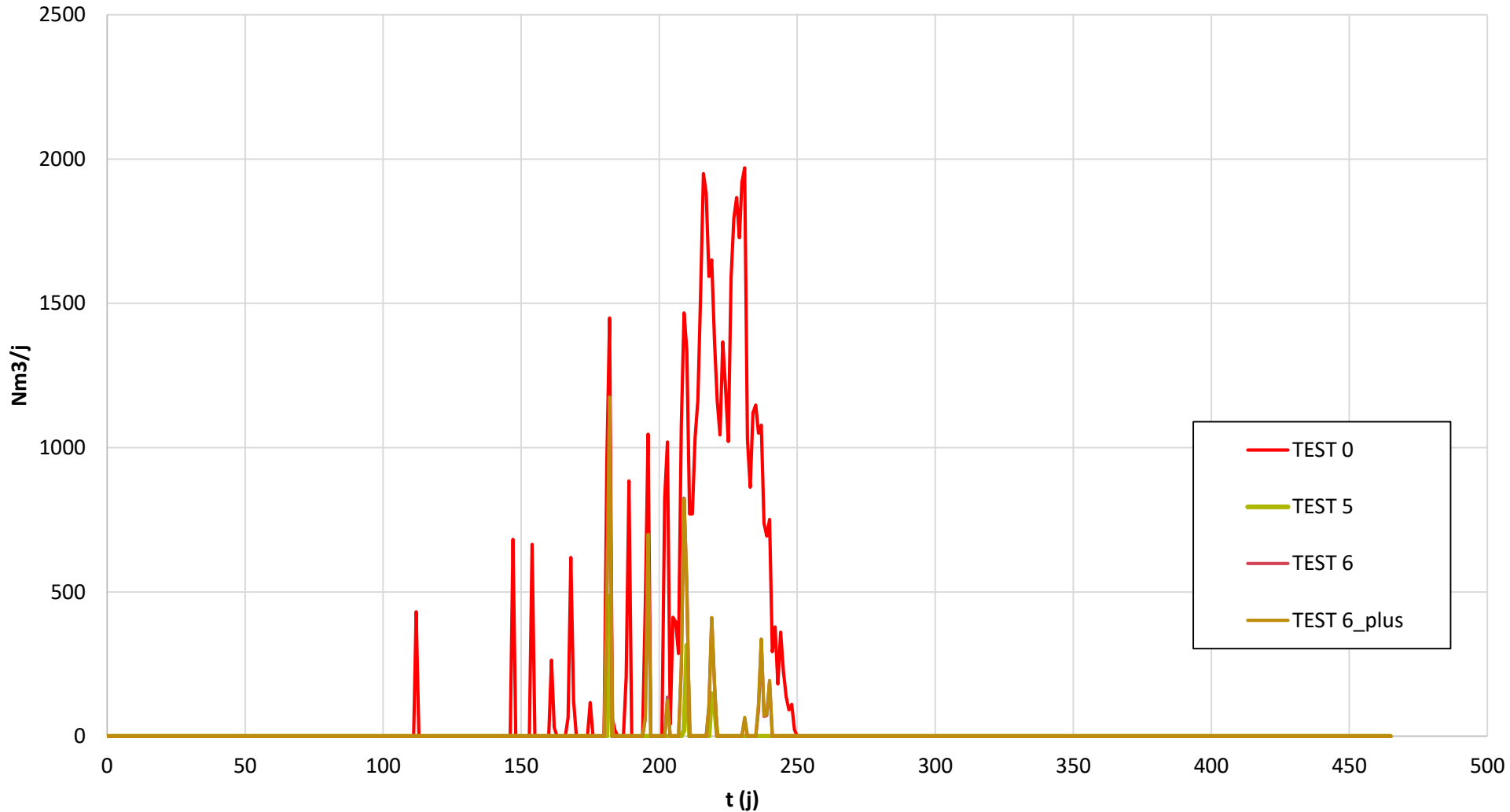
**Extra slides pour questions**

## ☐ Récapitulatif scénarios



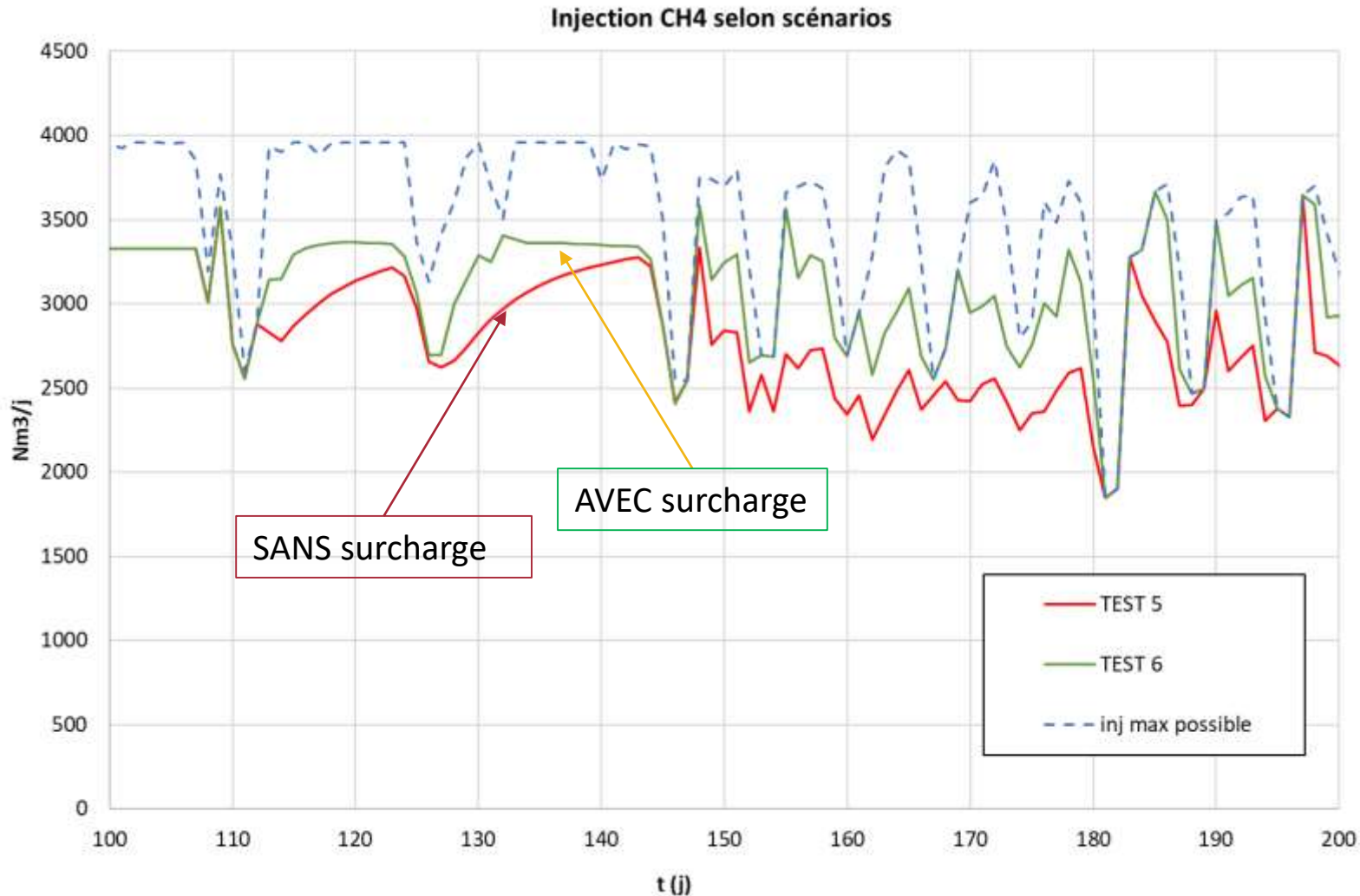
## ☐ Récapitulatif scénarios

CH4 torché selon scénarios



# Flexibilisation : adaptation à la demande réseau

- ☐ Intérêt d'une surcharge ponctuelle après effacement



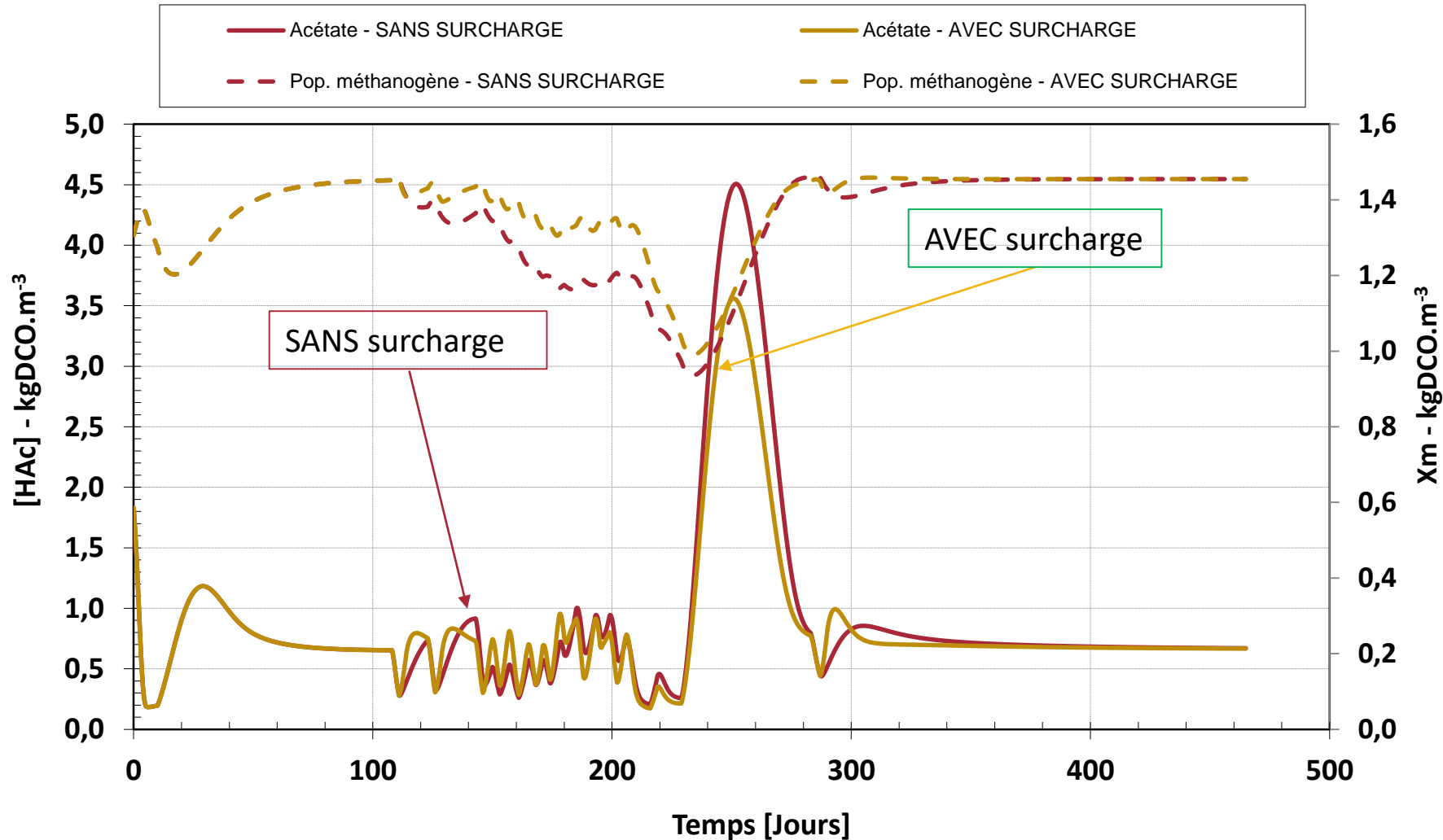
zoom

1

**Gain significatif de production injectable**

# Flexibilisation : adaptation à la demande réseau

☐ Intérêt d'une surcharge ponctuelle après effacement



2

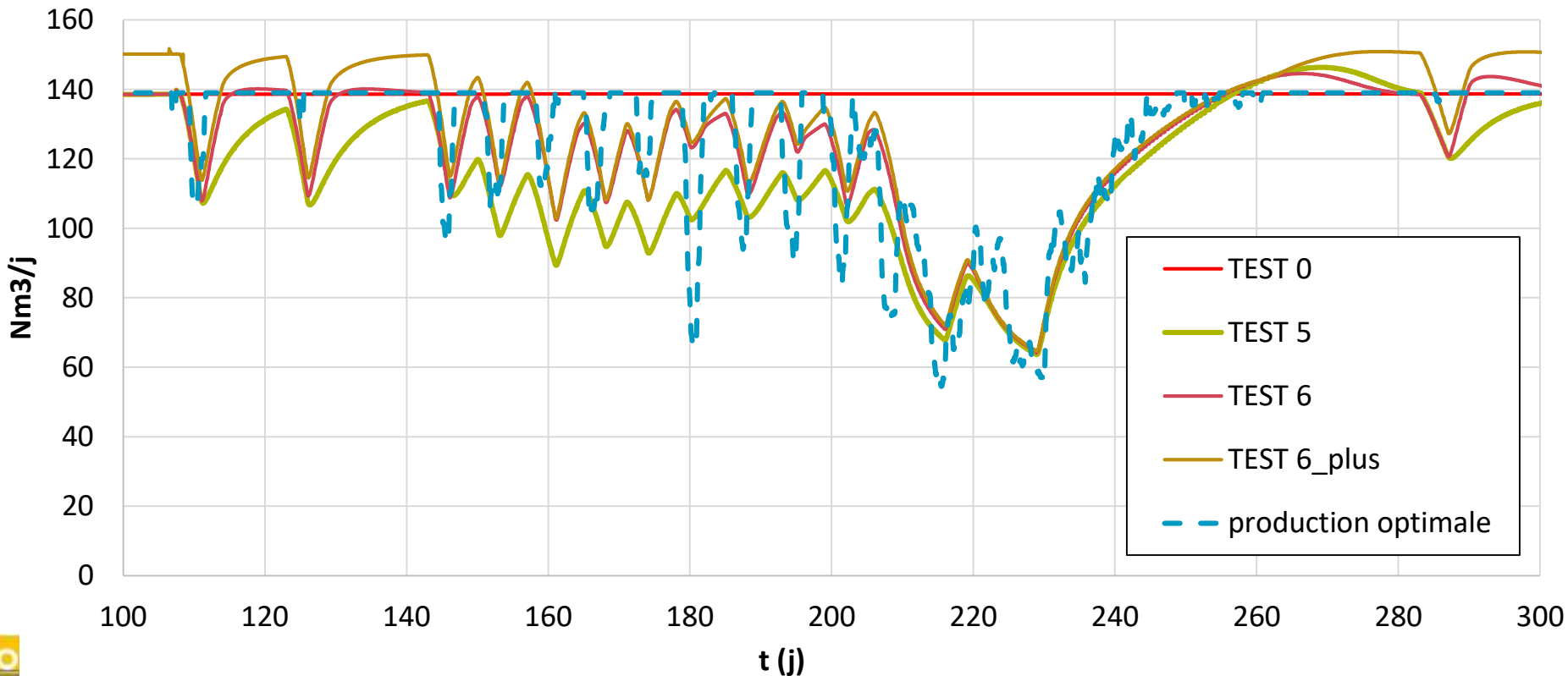
**Pas de perturbation critique de l'activité biologique**  
**+**  
**Maintien d'une activité plus élevée**



# Flexibilisation : adaptation à la demande réseau

- Très difficile de suivre une production optimale pour les effacements de courte durée
- Effacement long terme globalement faisable

Production injectable CH4 selon scénarios



## Bilan des scénarios

