

Journées Recherche et Industrie biogaz méthanisation

16-17-18 octobre 2013

Palais des Archevêques de Narbonne

Codigestion et stratégies de mélange par approche « plans de mélange »

David Bassard

UTC - EA 4297 Transformations Intégrées de la Matière
Renouvelable

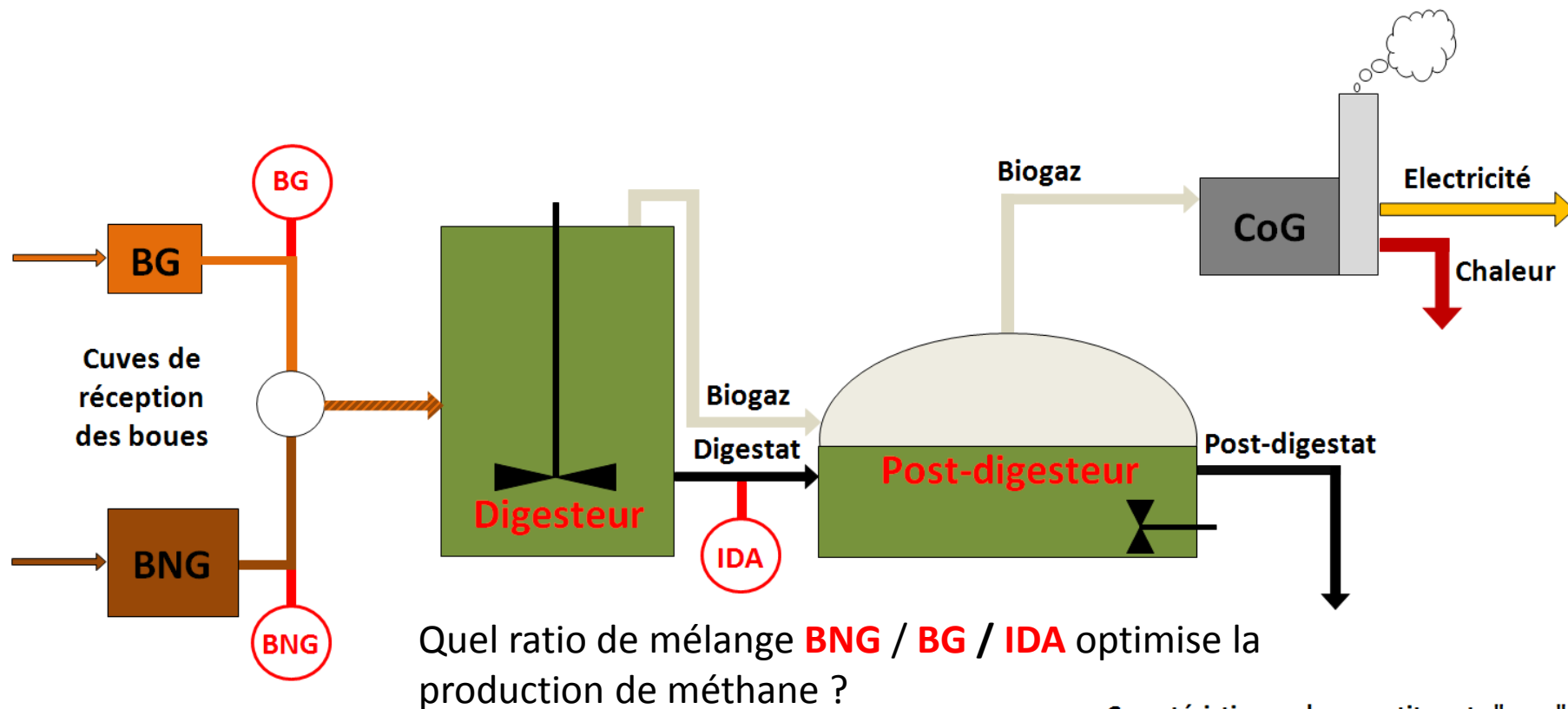
—

Département de Génie des Procédés Industriels

André Pauss (UTC) – Thierry Ribeiro (IPLB) – Maurice Nonus (UTC)
Eric Delacour – Maxime Viaut (FERTIGAZ)



Projet CODIMETH



IDA : Inoculum de digestion anaérobie

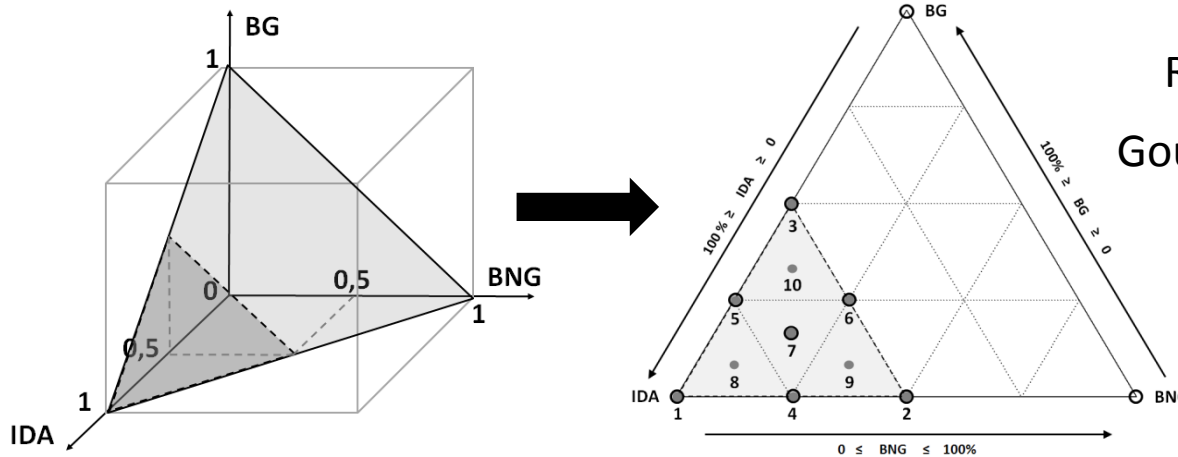
BNG : Boues non grassieuses

BG : Boues grassieuses

Caractéristiques des constituants "purs"

Références	[MS]	[MO]
	%MB	%MS
IDA	8,0	39,2
BNG	9,7	68,1
BG	18,8	85,4

Méthode des plans de mélange (PM)



Rao, P. V. et S. S. Baral. 2011

Goupy, J. et L. Creighton. 2006

Smith, W. F. 2005

Contrainte fondamentale des mélanges :

$$X_{IDA(i)} + X_{BNG(i)} + X_{BG(i)} = 100\% \quad 1 \leq i \leq 10$$

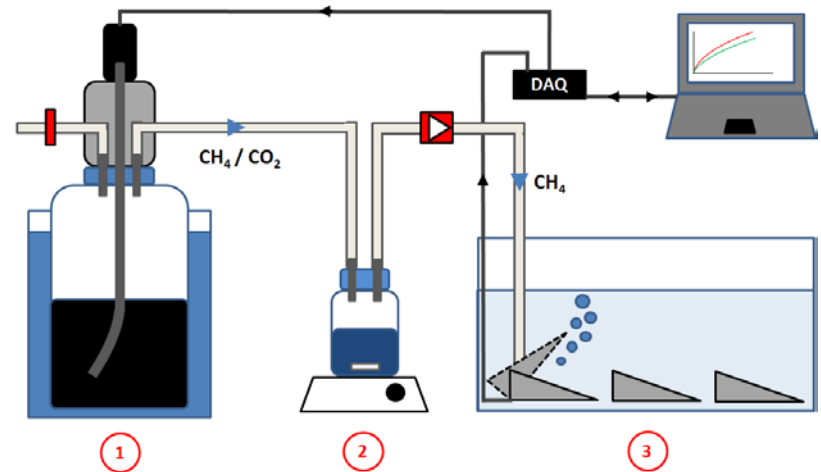
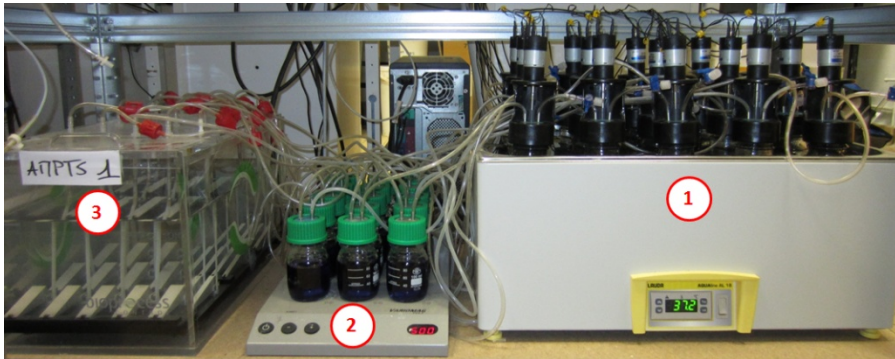
On cherche les coefficients β_j tels que :

$$y_i = \beta_1 X_{IDA(i)} + \beta_2 X_{BNG(i)} + \beta_3 X_{BG(i)} + \dots + \beta_{123} X_{IDA(i)} X_{BNG(i)} X_{BG(i)}$$

On réalise une analyse de la variance (**ANOVA**) pour évaluer la significativité :

- des β_j sur la variation globale de la réponse y_i (t-Student)
- de la variation attribuable à la régression (modèles d'ordre 1, 2 ou 3; F_{reg} -Fisher)
- du manque d'ajustement entre le modèle et les valeurs mesurées (F_{adj} -Fisher)

Dispositif expérimental : l'AMPTS



1 : Microcosmes de digestion thermostats à 37°C (15 unités / AMPTS)

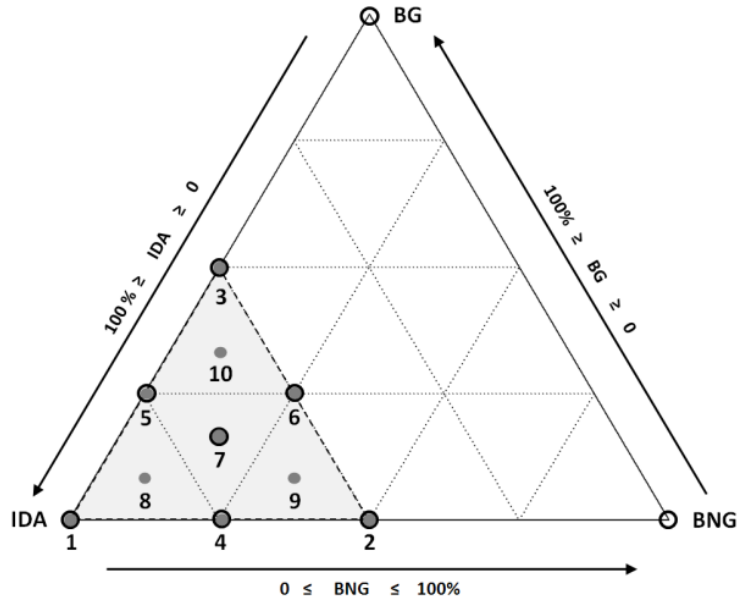
2 : Pièges à CO₂ (NaOH à 3M + 400µL de thymolphtaléine à 0,4% (m/m) dans l'éthanol)

3 : Cellules de détection du méthane produit au cours de la DA

Bilan de réalisation :

- 10 points expérimentaux pour la réalisation du PM (n°1 à 10)
- Chaque point est réalisé en triplicata
- 30 microcosmes de digestion
- 2 AMPTS

Matrice de mélange



Changement de variable $X \rightarrow Z$:

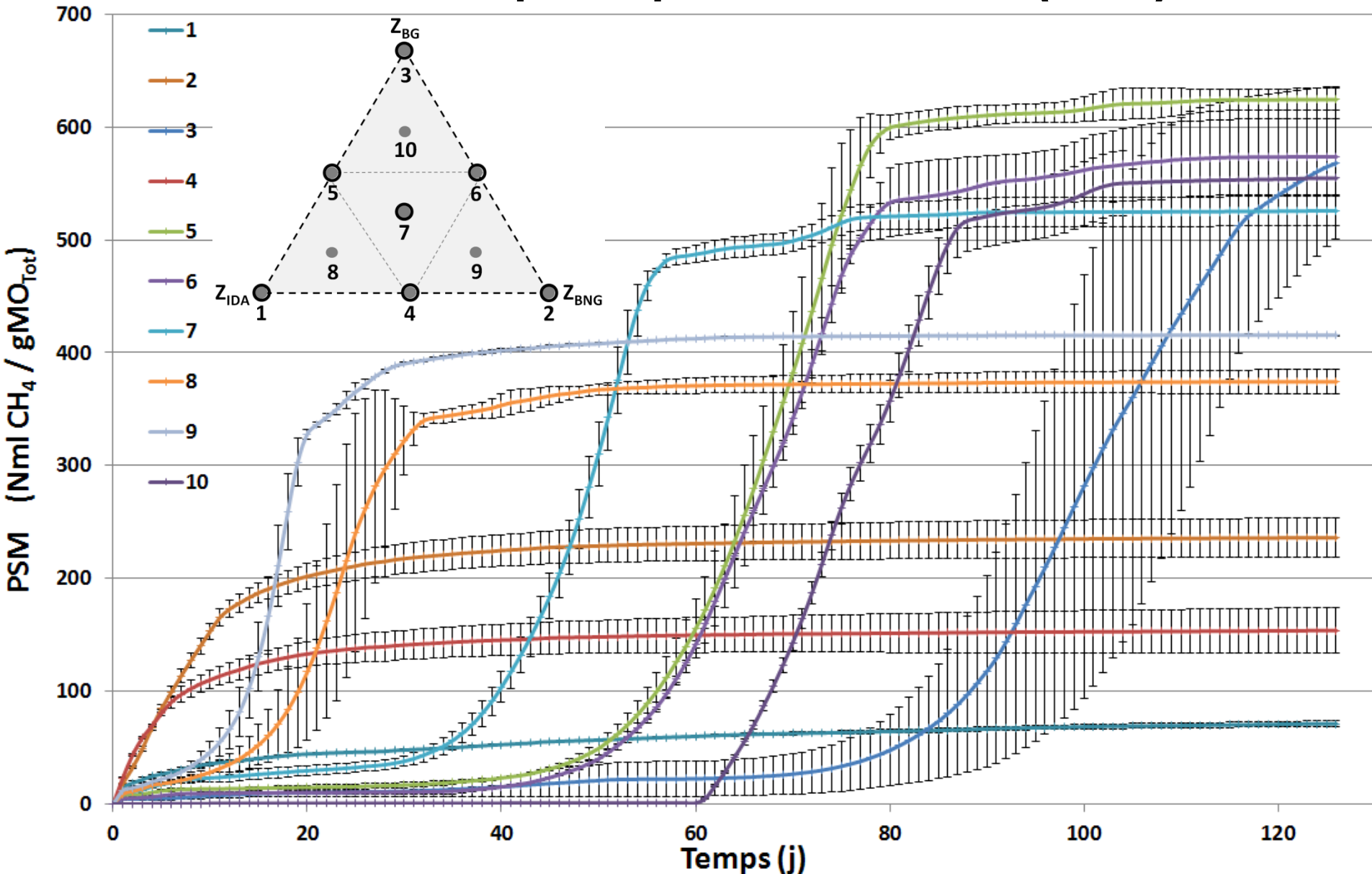
$$Z_{IDA} = 100 \times \frac{X_{IDA} - 0,5}{0,5}$$

$$Z_{BNG} = 100 \times \frac{X_{BNG}}{0,5}$$

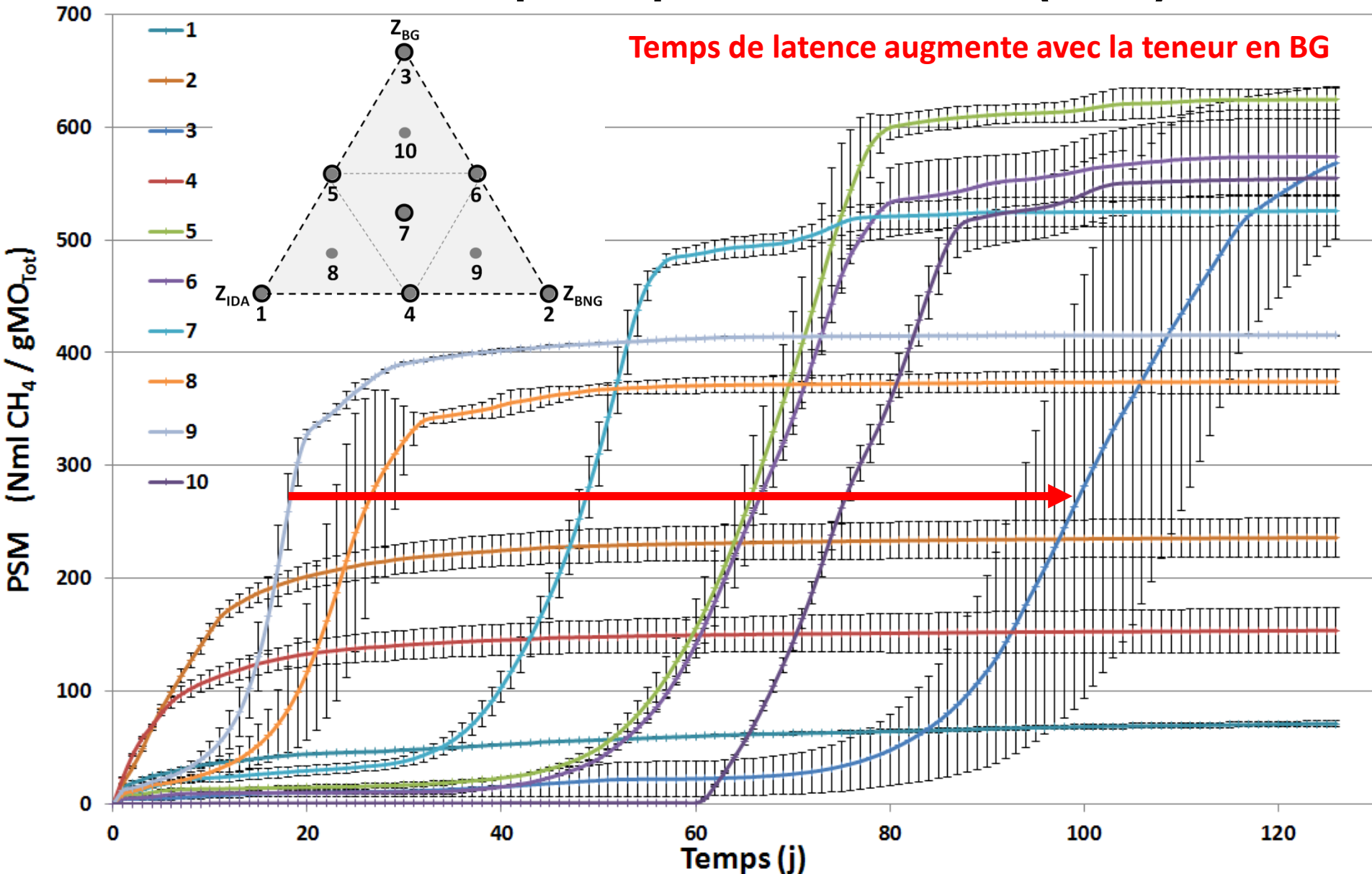
$$Z_{BG} = 100 \times \frac{X_{BG}}{0,5}$$

Références	Pourcentage dans le mélange (%MB)						Caractéristiques des mélanges		
	Constituants purs			Pseudo-composés			[MS]	[MO]	I/S (MO)
	X _{IDA}	X _{BNG}	X _{BG}	Z _{IDA}	Z _{BNG}	Z _{BG}	%MB	%MS	-
1	100	0	0	100	0	0	8,0	39,2	-
2	50	50	0	0	100	0	8,8	55,1	0,48
3	50	0	50	0	0	100	13,4	71,6	0,20
4	75	25	0	50	50	0	8,4	47,5	1,43
5	75	0	25	50	0	50	10,7	59,5	0,59
6	50	25	25	0	50	50	11,1	65,1	0,28
7	66,67	16,67	16,67	33,33	33,33	33,33	10,1	58,2	0,55
8	83,33	8,33	8,33	66,67	16,67	16,67	9,0	49,8	1,38
9	58,33	33,33	8,33	16,67	66,67	16,67	9,5	56,8	0,52
10	58,33	8,33	33,33	16,67	16,67	66,67	11,7	65,9	0,31

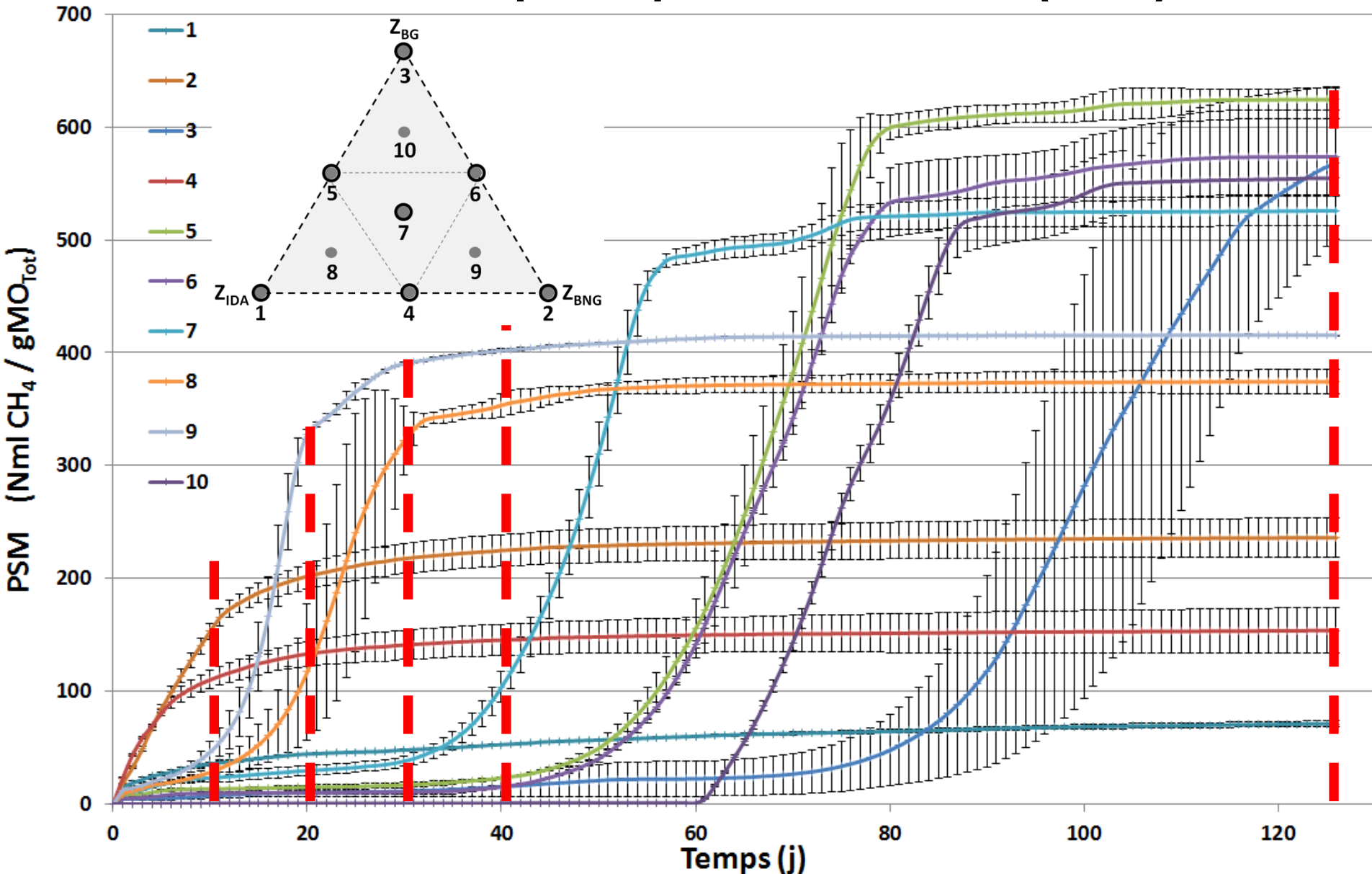
Productions spécifiques de méthane (PSM)

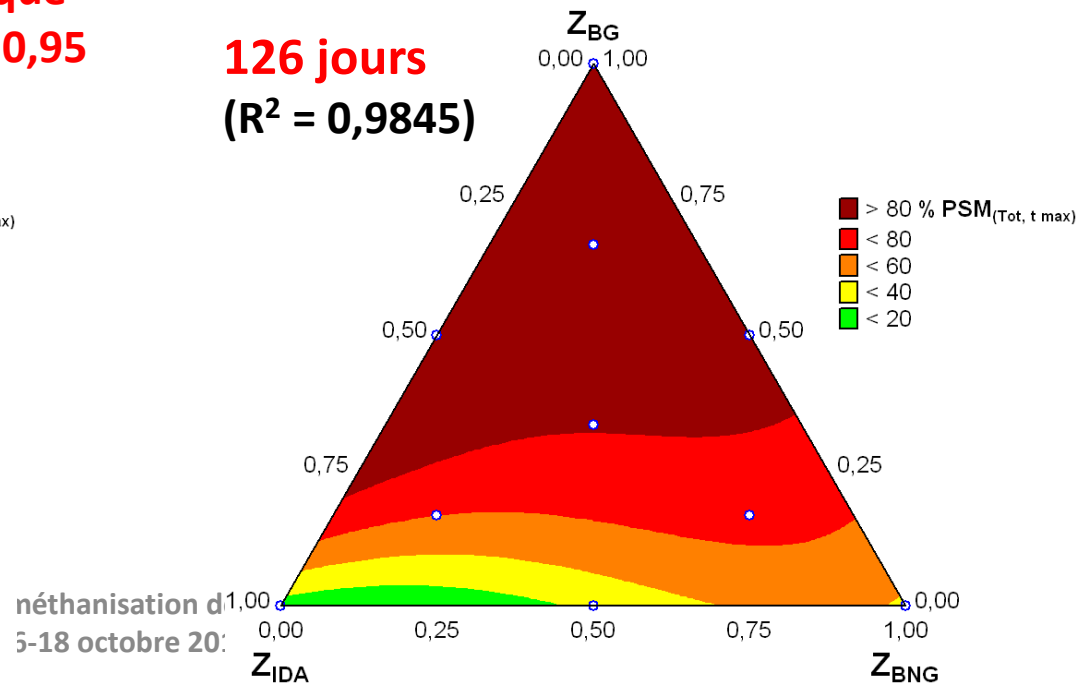
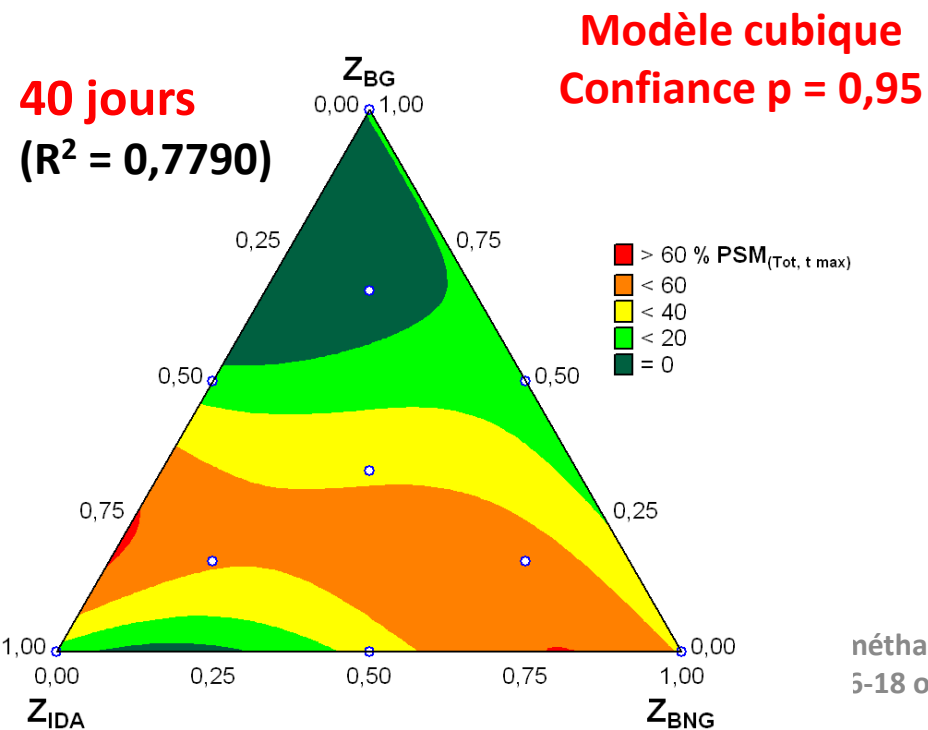
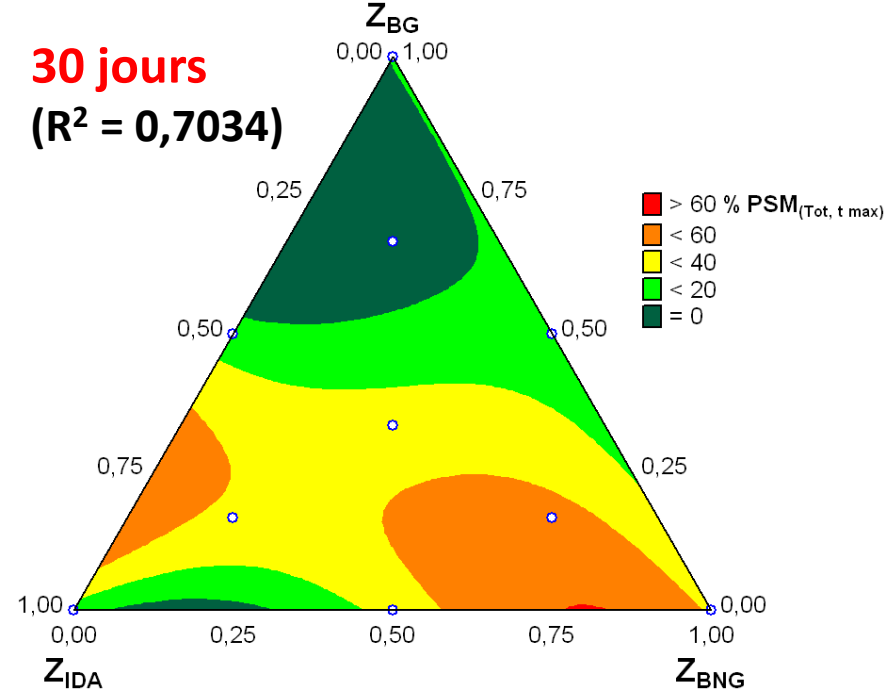
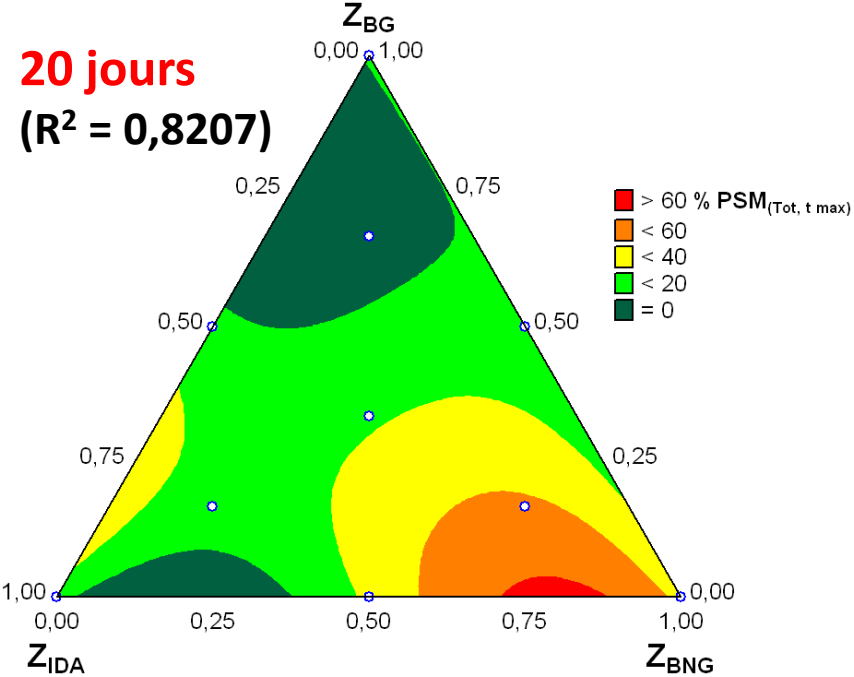


Productions spécifiques de méthane (PSM)



Productions spécifiques de méthane (PSM)





Résultats du PM

Pourcentage dans le mélange **optimal** (%MB)

Références	Pseudo-composés			Constituants purs		
Nombre de jours	Z _{IDA}	Z _{BNG}	Z _{BG}	X _{IDA}	X _{BNG}	X _{BG}
10	0	100	0	50	50	0
20	20	73	27	60	36,5	13,5
30	20	80	0	60	40	0
40	80	0	20	90	0	10
126	60	0	40	80	0	20
Moyenne				68,0	25,3	8,7

Bilan mélange optimal sur une dynamique de 126 jours :

- IDA \approx 66,7 %MB
- BNG \approx 24,8 %MB
- BG \approx 8,5 %MB
- I/S (MO) \approx 0,7

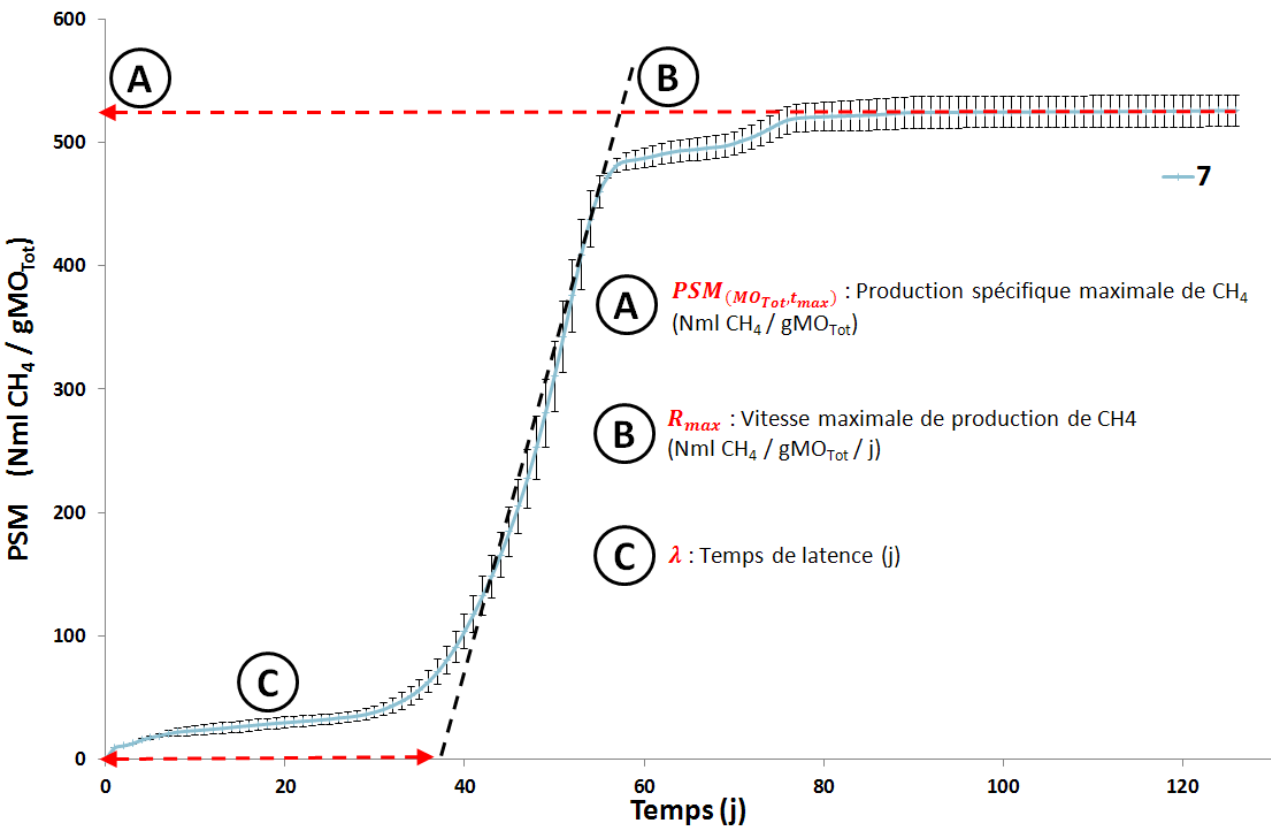
Caractéristiques des constituants "purs"

Références	[MS]	[MO]
	%MB	%MS
IDA	8,0	39,2
BNG	9,7	68,1
BG	18,8	85,4

Modélisation des profils par l'équation de Gompertz

Le modèle de Gompertz (Zwietering et al., 1990) :

$$PSM_{(MO_{Tot},t)} = \textcolor{red}{PSM}_{(MO_{Tot},t_{max})} \times \exp \left[-\exp \left[\left(\frac{\textcolor{red}{R}_{max} \times e}{\textcolor{red}{PSM}_{(MO_{Tot},t_{max})}} \right) \times (\textcolor{red}{\lambda} - t) + 1 \right] \right]$$



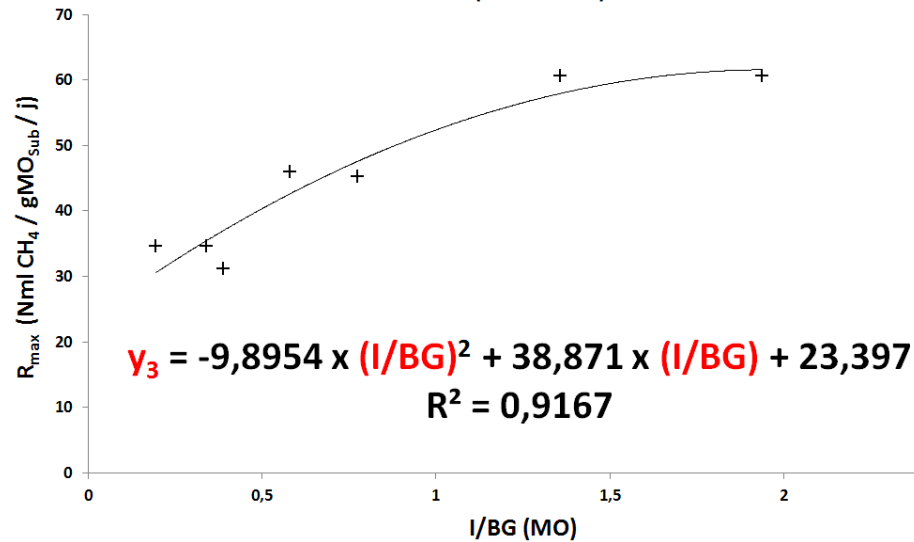
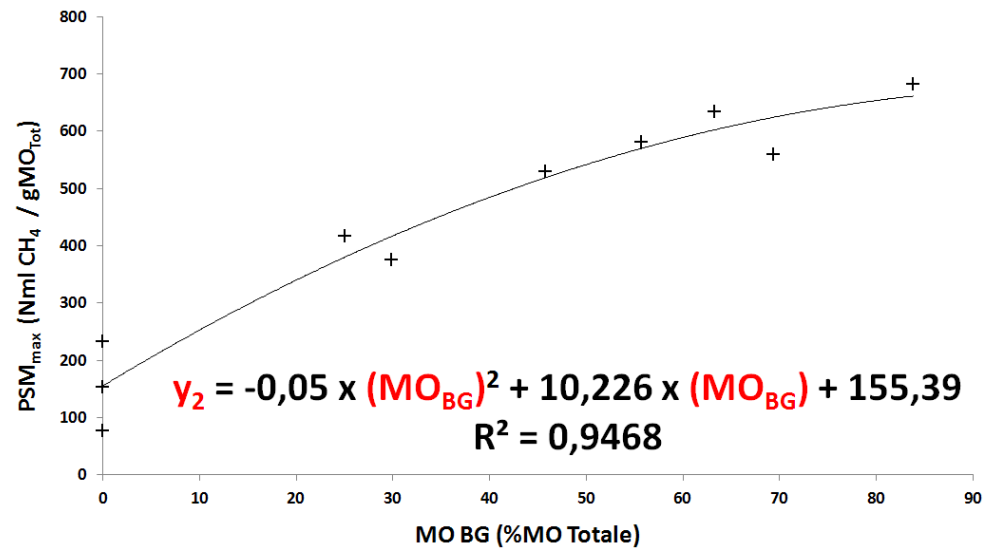
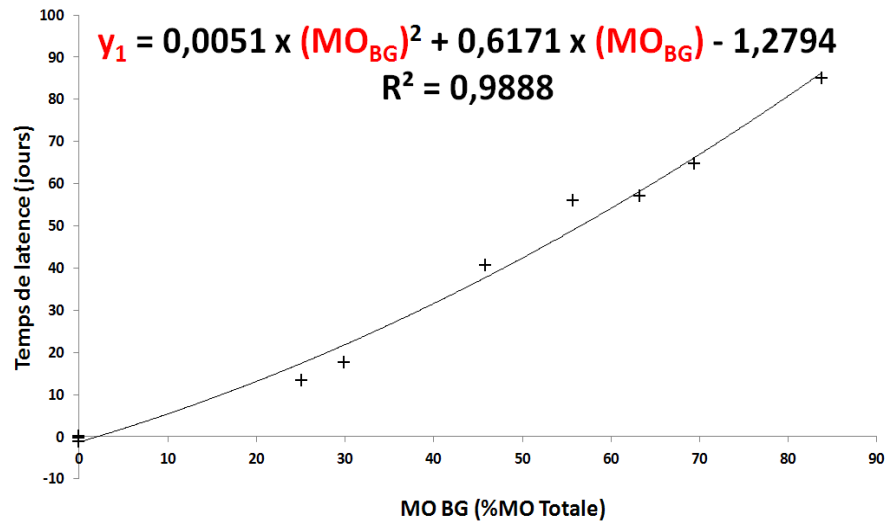
Identification des paramètres de Gompertz à l'aide du solveur « leatsq » de Scilab



Collection de paramètres pour l'ensemble des 10 profils du PM

Modélisation des profils par l'équation de Gompertz

$$PSM_{(MO_{Tot},t)} = PSM_{(MO_{Tot},t_{max})} \times \exp \left[-\exp \left[\left(\frac{R_{max} \times e}{PSM_{(MO_{Tot},t_{max})}} \right) \times (\lambda - t) + 1 \right] \right]$$



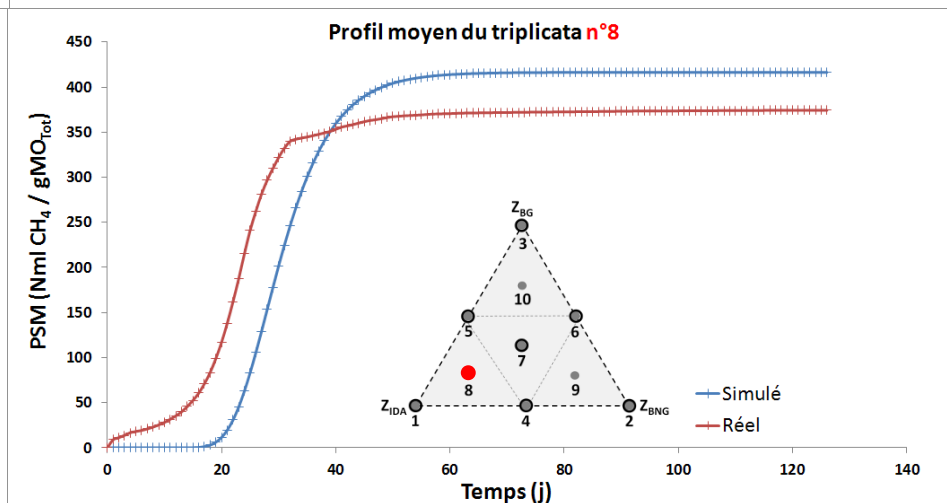
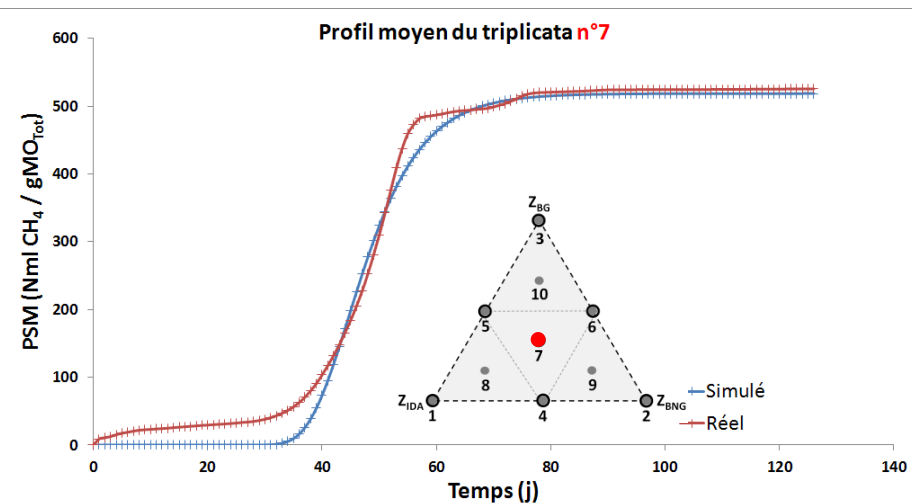
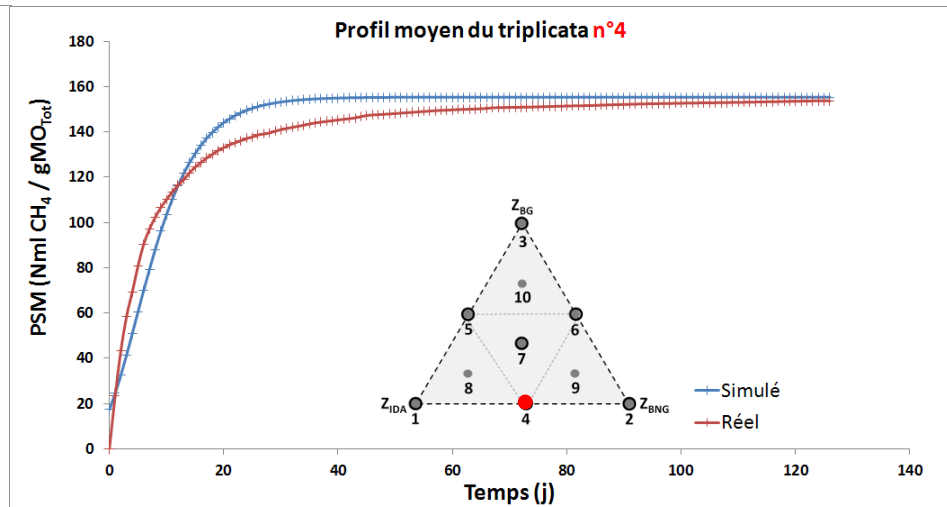
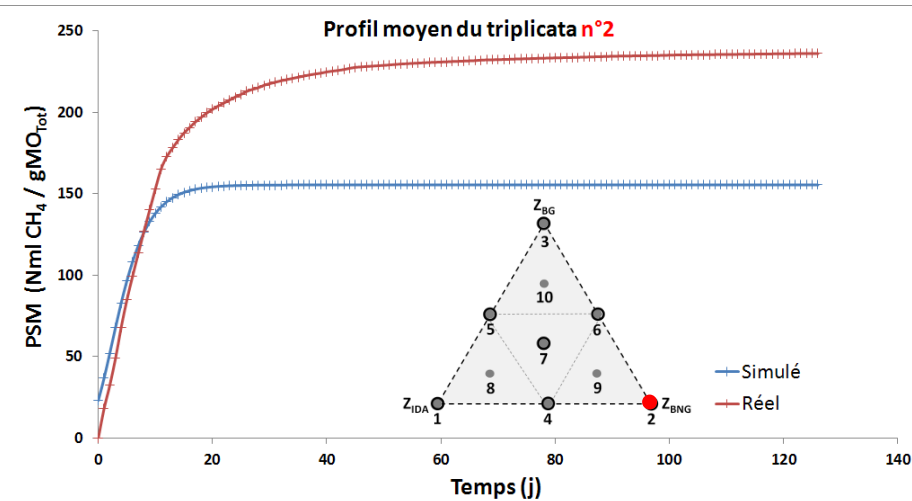
$$\lambda = y_1$$

$$PSM_{(MO_{Tot},t_{max})} = y_2$$

$$R_{max} = y_3 \times \frac{MO_{Sub}}{MO_{Tot}}$$

Modélisation des profils par l'équation de Gompertz

$$PSM_{(MO_{Tot}, t)} = y_2 \times \exp \left[-\exp \left[\left(\frac{y_3 \times \frac{MO_{Sub}}{MO_{Tot}} \times e}{y_2} \right) \times (y_1 - t) + 1 \right] \right]$$

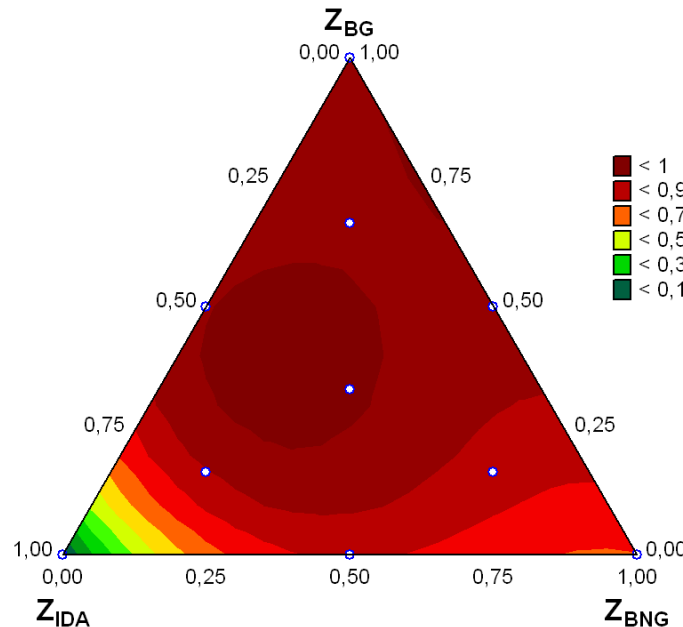


Modélisation des profils par l'équation de Gompertz

Références	Dispersion entre les valeurs simulées et réelles (R^2)
1	0
2	0,6418
3	0,9647
4	0,9506
5	0,9841
6	0,9603
7	0,9924
8	0,8873
9	0,8415
10	0,9933
Moyenne	0,8216

Bilan sur la simulation des profils de PSM :

- Prédiction des $PSM_{(t)}$ avec une justesse de 80%
- Paramètres nécessaires :
 - MO_{BG} ($\%MO_{Tot}$)
 - MO_{IDA}/MO_{BG} (ratio I/BG basé sur les MO)
 - MO_{Sub}/MO_{Tot}
- La mesure des MS/MO peut être réalisée en 30h



Modélisation de la dispersion entre les valeurs simulées et réelles (R^2) sur l'ensemble de la surface de réponse (Modèle cubique)

Conclusions

- La méthodologie des plans de mélange permet de déterminer simplement et de manière optimisée les fractions en IDA, BNG et BG pour une $PSM_{(t)}$ optimale :

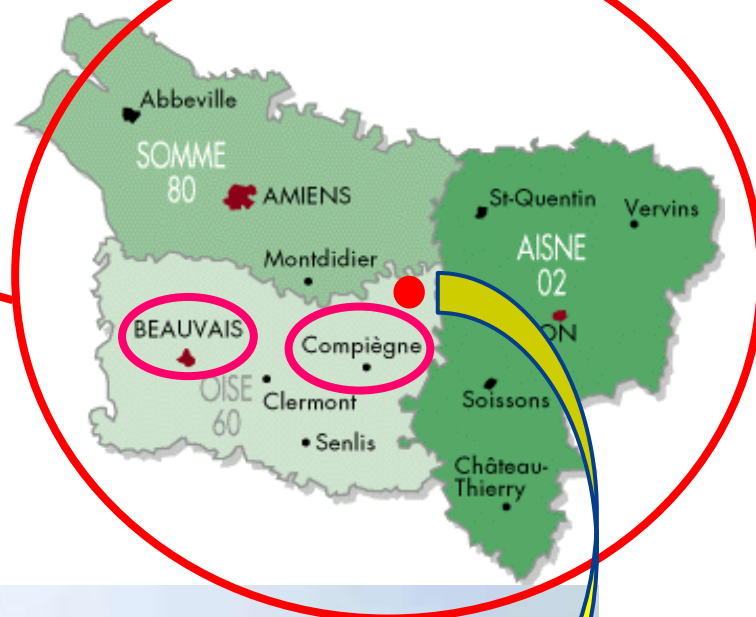
Bilan mélange optimal sur une dynamique de 126 jours :

- IDA $\approx 66,7$ %MB
 - BNG $\approx 24,8$ %MB
 - BG $\approx 8,5$ %MB
 - I/S (MO) $\approx 0,7$
- L'optimisation statistique de la surface expérimentale permet également de déterminer diverses corrélations entre les paramètres d'entrée et les réponses mesurées (non indentifiables sur des expériences ponctuelles) :

Bilan sur la simulation des profils de PSM :

- Prédiction des $PSM_{(t)}$ avec une justesse de 80%
- Les paramètres d'entrée peuvent être mesurés en 30h

MERCI POUR VOTRE ATTENTION



FERTIGAZ – Passel (Oise, 60)



JRI Biogaz méthanisation de Narbonne
16-18 octobre 2013

Bibliographie

Goupy, J. et L. Creighton. 2006, *Introduction aux plans d'expériences - 3e édition*, Dunod - L'Usine Nouvelle, ISBN 2100497448.

Rao, P. V. et S. S. Baral. 2011, «Experimental design of mixture for the anaerobic codigestion of sewage sludge», *Chemical Engineering Journal*, vol. 172, p. 977–986.

Smith, W. F. 2005, *Experimental Design for formulation*, Society for Industrial and Applied Mathematics, ISBN 0898715806.

Zwietering, M., I. Jongenburger, F. Rombouts et K. Van't Riet. 1990, «Modeling of the bacterial growth curve», *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 56, no 6, p. 1875–1881.

Logiciels utilisés pour la résolution des plans de mélanges :

- Statistica Version 8, Statsoft, USA

Identification des paramètres de l'équation de Gompertz :

- Scilab Version 5.4, Scilab Entreprises (INRIA), France