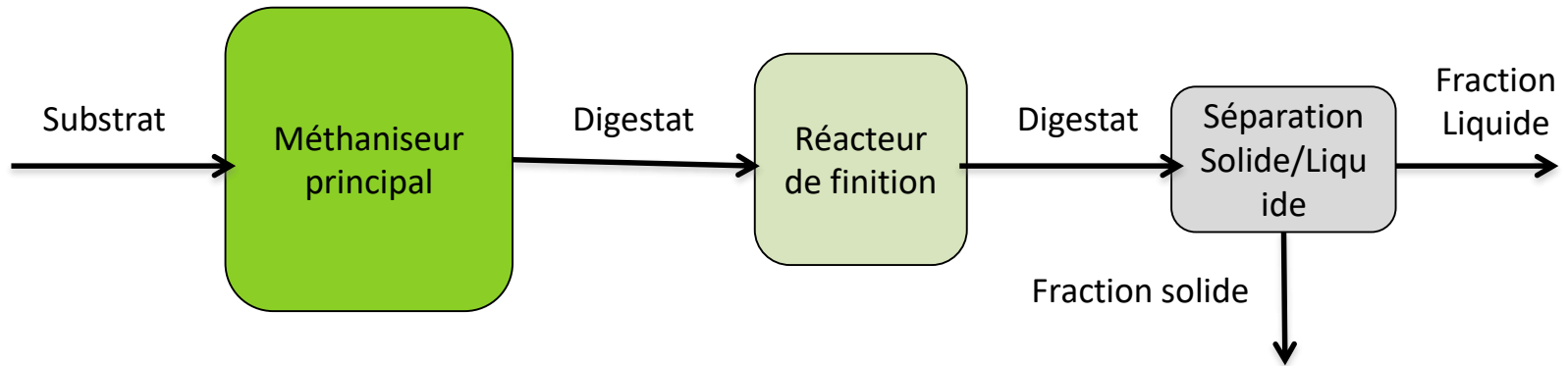


Méthanisation en 3 étapes pour l'amélioration de la production de biogaz :

Comparaison de procédés physico-
chimiques et impact du digestat sur
les performances du procédé

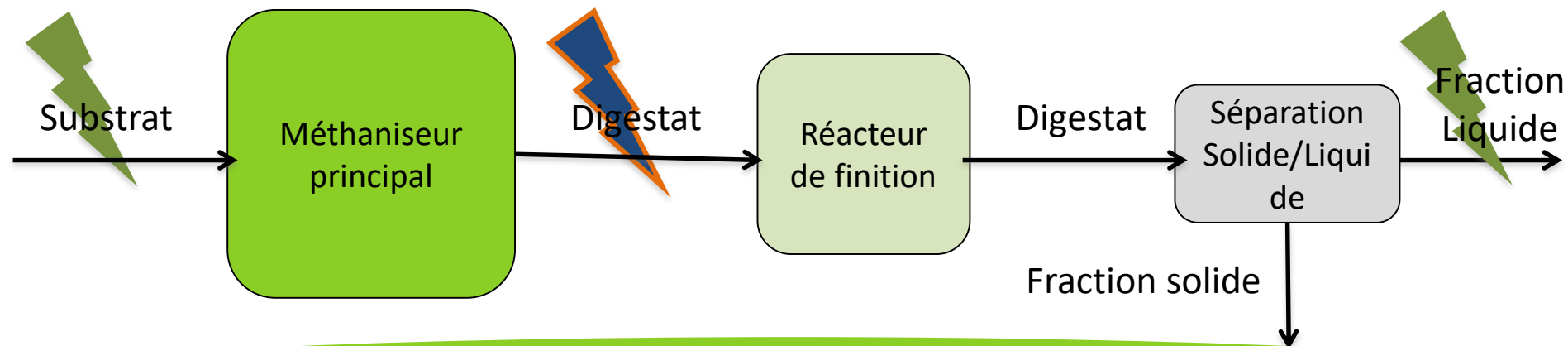
Pourquoi intégrer un prétraitement sur une filière de méthanisation en 2 étapes



- Méthanisation en 2 étapes en co-digestion
- Verrous de la méthanisation: biodégradabilité
 - Prétraitement des substrats : recherches > appliqués
 - Majorité des études : prétraitement des substrats
- Retour d'expérience industrielle de l'AAMF
 - Système de broyage sur digestat avant finition : ➡ de biogaz

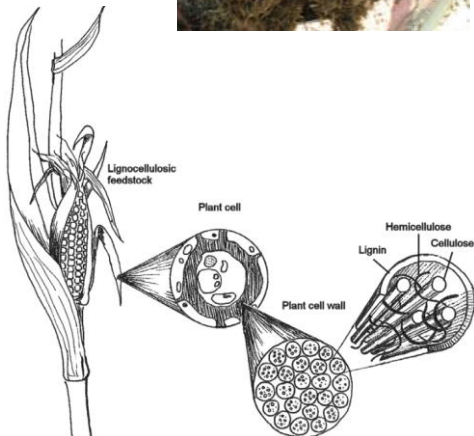
Comment intégrer un prétraitement sur une filière de méthanisation en 2 étapes?

- Positionnement du prétraitement :
 - Sur le substrat : prétraitement
 - Sur le digestat final : post-traitements
 - Sur le digestat intermédiaire : **traitement intermédiaire = digestion en 3 étapes**



Quel prétraitement appliquer?

- Action visant les composés récalcitrants (fibres)

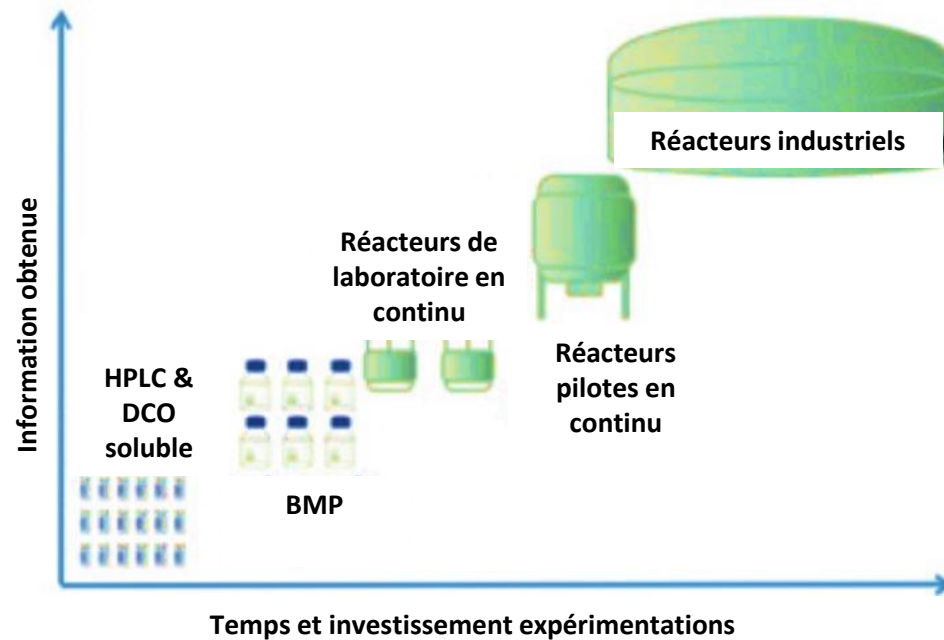


Principe	Technique
Biologique	Microbiologique Enzymatique
Physique	Mécanique Thermique Ultrasons
Chimique	Acide Basique Oxydant Electrochimique
Procédés Combinés	Explosion à la vapeur Extrusion Thermochimique

Coût / performance

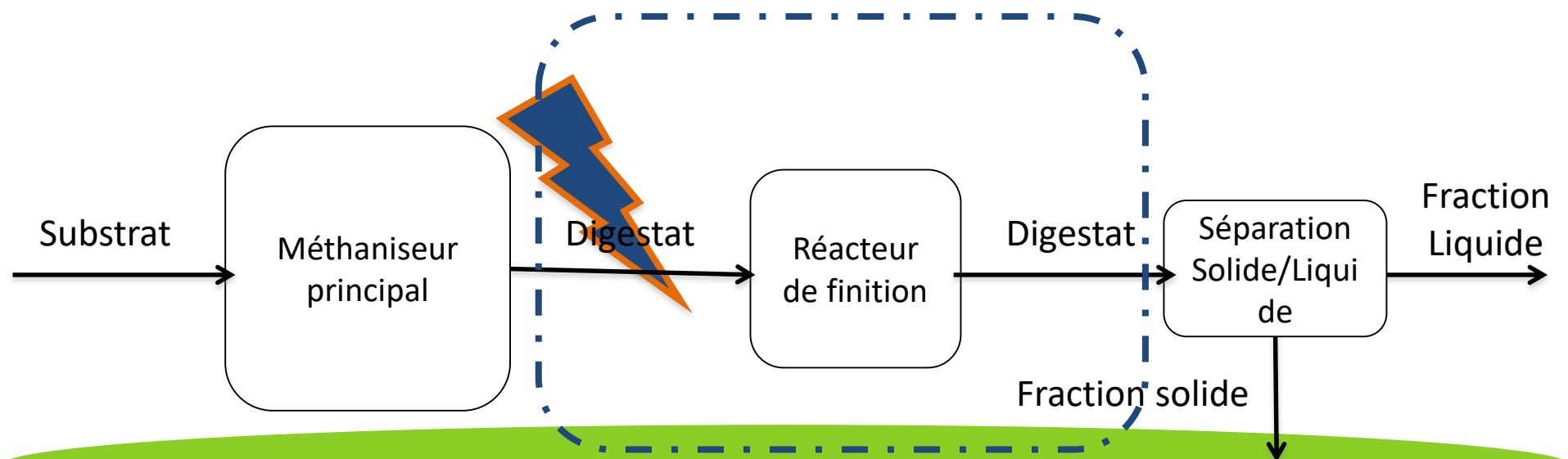
Evaluation des performances du procédé

- Des points de vigilance :
 - Transposition laboratoire/installations réelles
 - Conditions de références
 - Analyse économique (objectifs financiers) / Analyse environnementale (digestat)



Objectifs de l'étude

- Evaluation des performances du procédé à 3 étapes :
1. **DA/Broyage/DA** : production de méthane et digestat
 2. **DA/procédés physico-chimiques combinés/DA** : solubilisation de la DCO & BMP



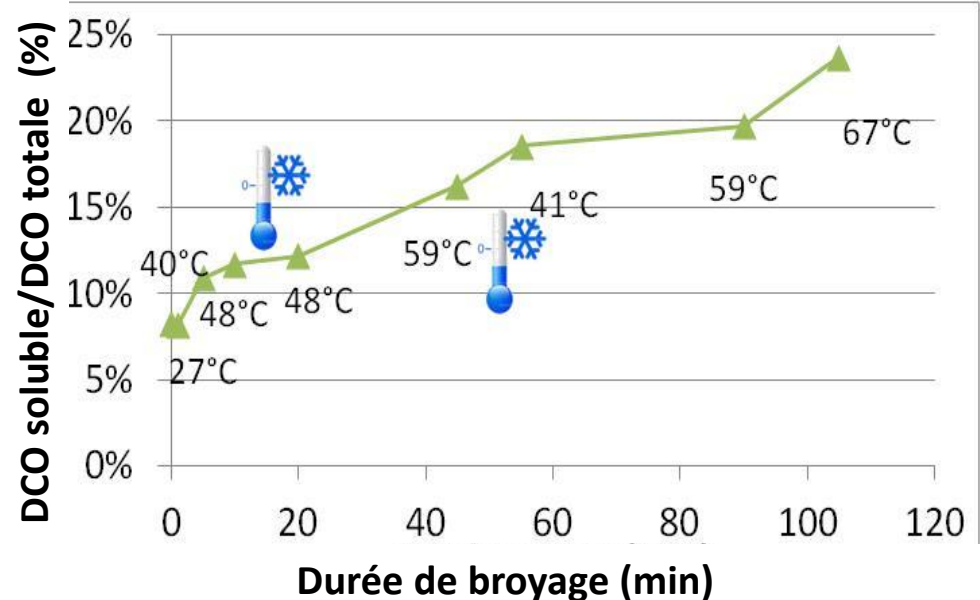
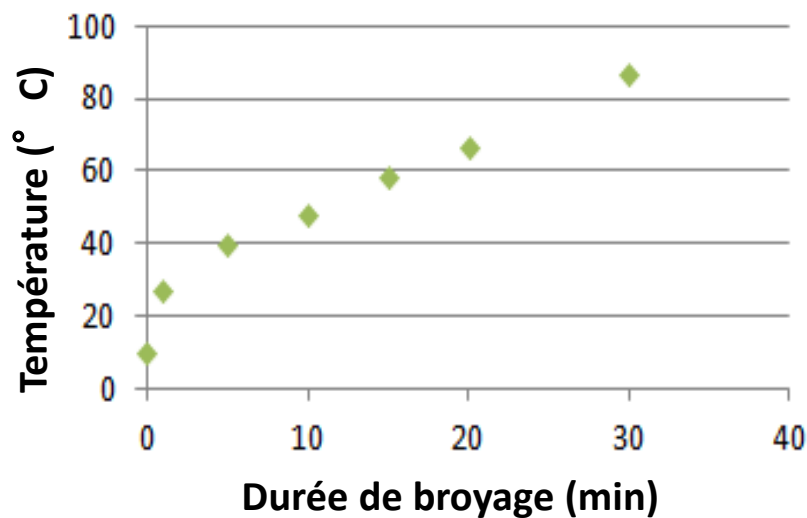
Essais de laboratoire sur digestat « réel »

- Prélèvement : digestat du 1^{er} méthaniseur
 - Installation de co-digestion type agricole
 - Conditions opératoires :

	Volume du réacteur (m ³)	TSH (j)
Méthaniseur principal	1600	60
Réacteur de finition	700	30
Substrat	50% effluents d'élevage, 50% fumier équin, déchets verts, résidus agro-alimentaires	
Débit	24 -26	m ³ /j
Température	35	° C
Déshydratation du digestat final par presse à vis et recirculation du liquide dans le méthaniseur principal		

Méthodologie de l'étude

- Broyage au laboratoire :
 - Broyeur à couteaux (type blender cuisine)
 - Effet de la réduction de taille : accessibilité +
- Temps optimal : solubilisation / température :



10 minutes : T < 50° C mais solubilisation limitée

Dispositif expérimental en réacteurs

- 4 Réacteurs mésophiles (6L)
 - Suivi de la production de biogaz
 - Caractérisation du digestat

Réacteur	BATCH		SEMI-CONTINU	
Inoculum	Digestat brut	Digestat broyé	Anaérobie non adapté	
Alimentation	-		2/semaines (TSH : 30 jours)	
			Digestat brut	Digestat broyé

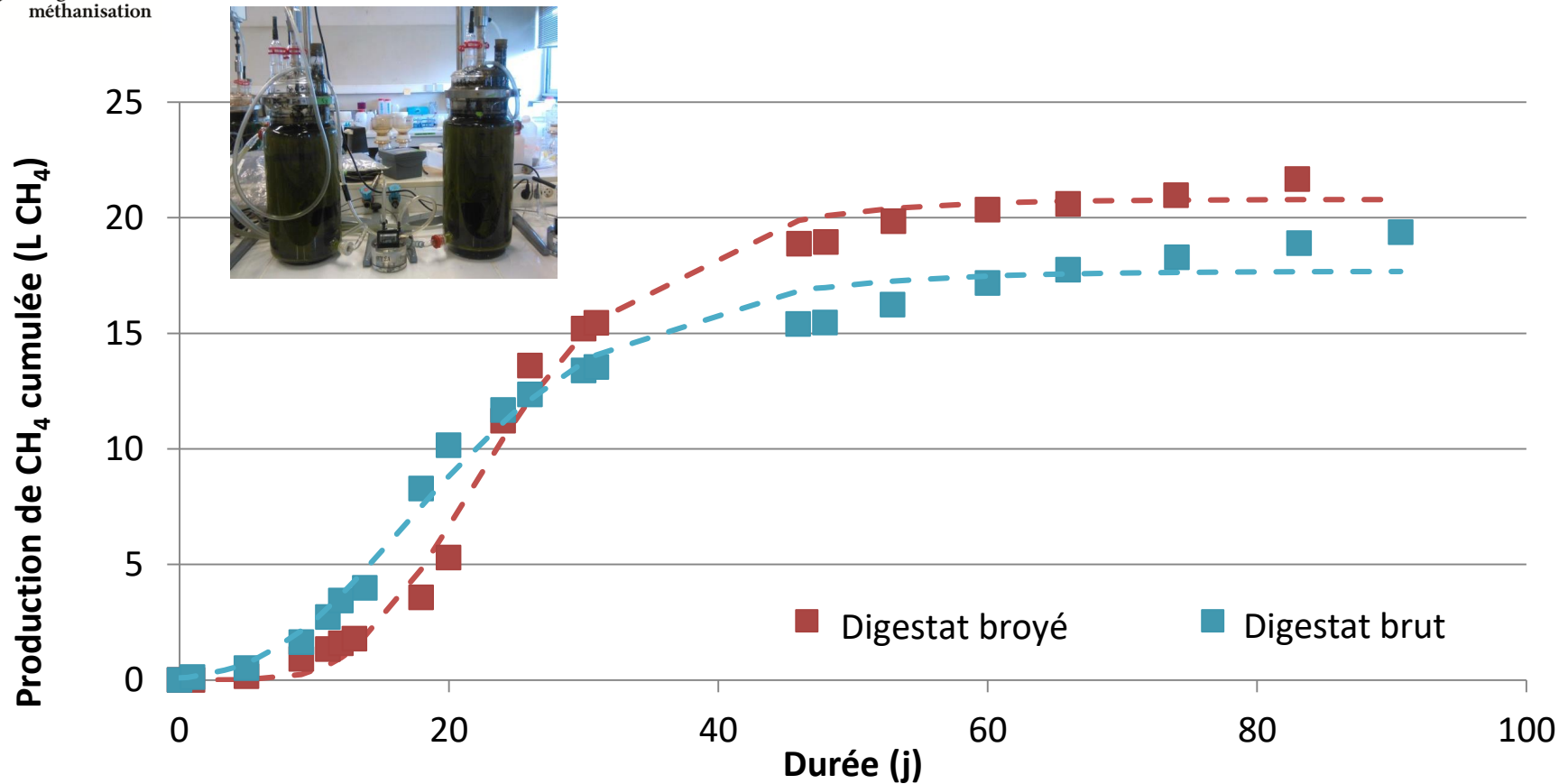


Biodégradabilité



CH₄ / élimination des solides

Production de CH₄ dans les réacteurs en batch



Substrat	Potentiel Méthane (L CH ₄)	Potentiel Méthane Spécifique (L CH ₄ /kgVS)	Débit Maximum (L CH ₄ /j)	Phase de Latence (j)
Digestat brut	18	46	0.66	3
Digestat broyé	21	53	0.95	13

+17%

+15%

Composition des digestats “épuisés”

Elimination des solides :

MS : 7.9% & 8.4%

MV: 11.5% & 12.4%

Paramètre	unité	Digestat brut	Digestat broyé
MS	g/kg	88.3	87.8
MV	g/kg	58.0	57.4
pH	-	8.14	8.22
Alcalinité totale	g CaCO ₃ /L	17.5	17.3
DCO soluble	g O ₂ /L	11.7	13.3
NTK soluble	g N-NH ₄ ⁺ /L	4.4	4.6
NH ₄ ⁺	g N-NH ₄ ⁺ /L	3.6	3.5
Cellulose	% MV	15%	14%
Hémicelluloses	% MV	14%	12%
Lignine	% MV	41%	44%
Indice de Complexité	-	63%	64%

Production de CH₄ dans les réacteurs continus

- Deux périodes d'alimentations successives :
 - même site de prélèvement
 - dates de prélèvement différentes

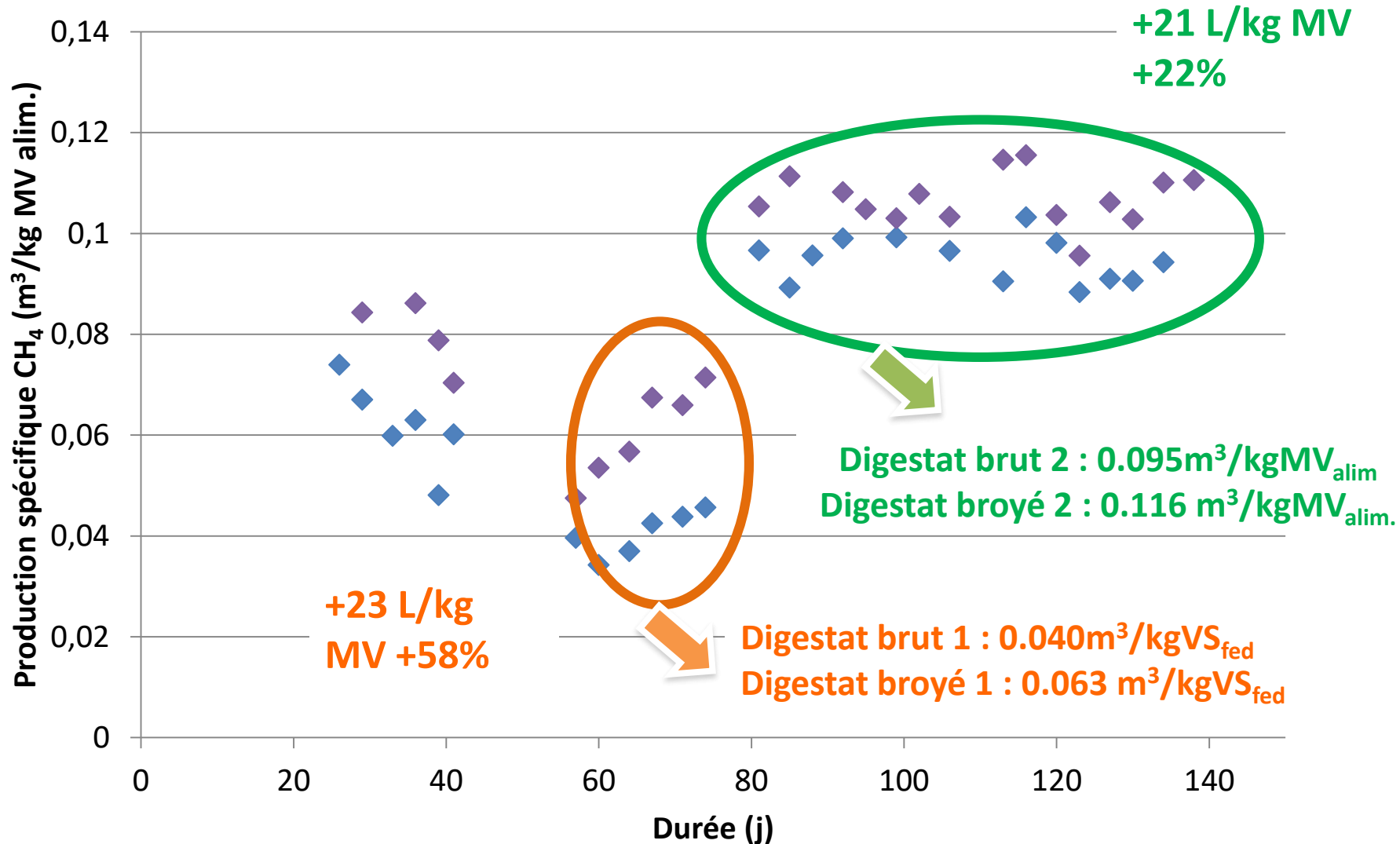
**Digestat
brut**

**Digestat
broyé**



Paramètre	Unité	1 ^{er} digestat	2 nd digestat
MS	g/kg	96	72
MV	g/kg	66	49
pH	-	8.5	8.0
Alcalinité totale	gCaCO ₃ /L	16	13
DCO totale	gO ₂ /L	113	86
DCO soluble	gO ₂ /L	9.3	10.5
NTK soluble	gN-NH ₄ ⁺ /L	4	3.5
Cellulose	% MV	19%	16%
Hémicelluloses	% MV	17%	13%
Lignine	% MV	48%	40%

Impact du digestat en réacteurs semi-continus

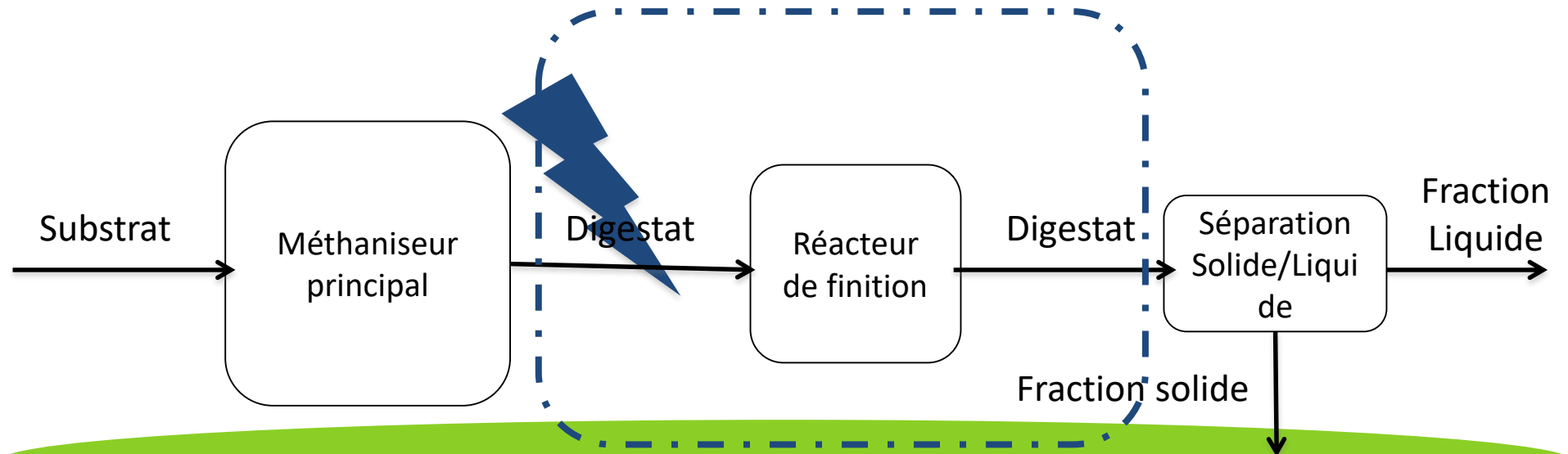


◆ Digestat brut

◆ Digestat broyé

Objectifs de l'étude

- Evaluation des performances du procédé à 3 étapes :
 1. **DA/Broyage/DA** : production de méthane et digestat
 2. **DA/procédés physico-chimiques combinés/DA** : solubilisation de la DCO & BMP



Essais de co-traitements physico-chimiques

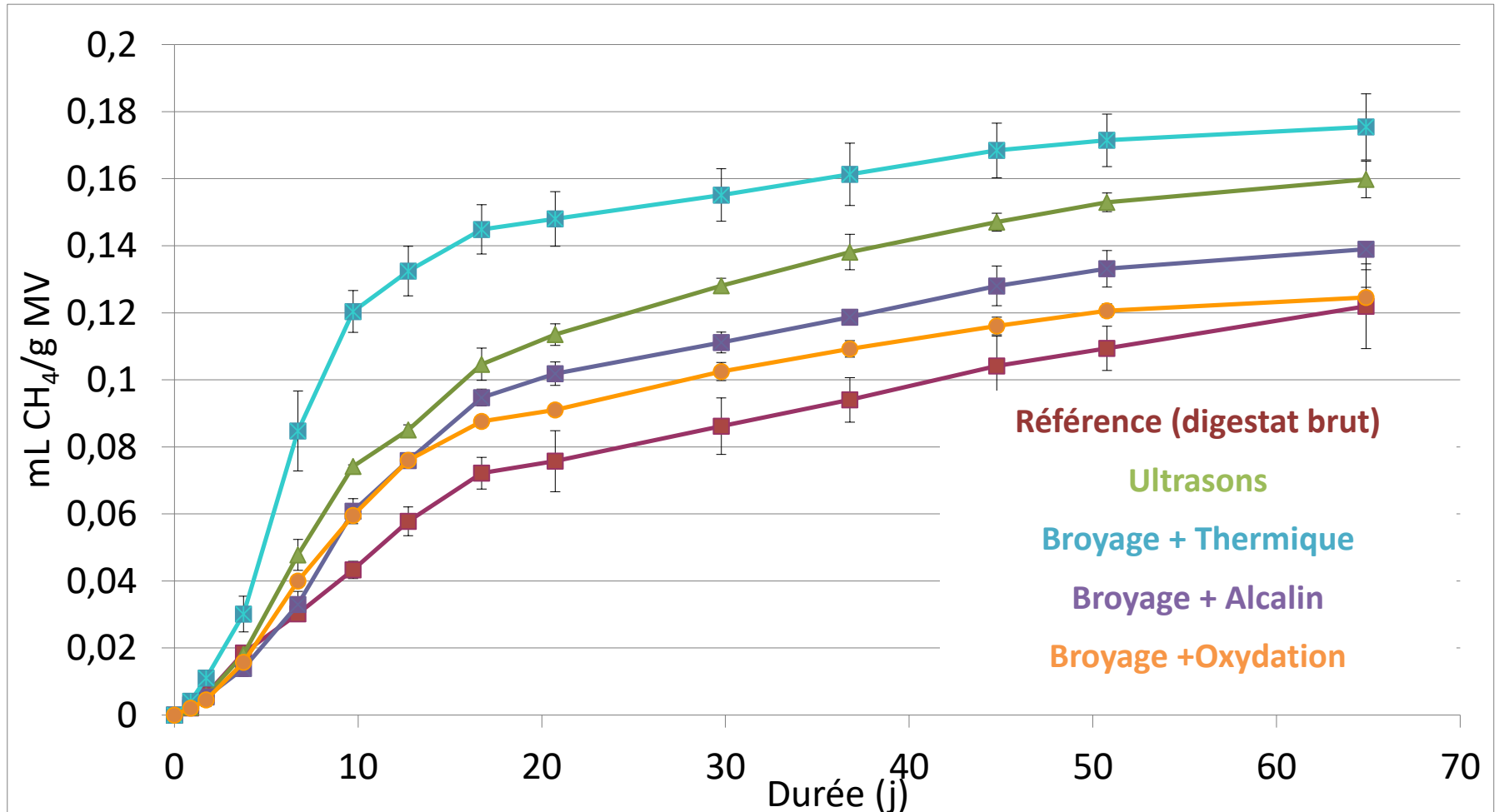
- Co-traitements physico-chimiques + BMP

Traitement	Paramètre
Référence (digestat brut)	-
Ultrasons	1 h, 102 000 kJ
Broyage + Thermique	165° C, 15 atm*
Broyage + Alcalin	5 g NaOH / 100g MS, 80° C
Broyage +Oxydation	4g H ₂ O ₂ / 100g MS, 20° C

*Procédé Cambi

Essais de co-traitements physico-chimiques

- Co-traitements physico-chimiques + BMP



Essais de co-traitements physico-chimiques

- Co-traitements physico-chimiques + BMP

Traitement	Paramètre	Potentiel observé (m ³ CH ₄ /kgMV)	Amélioration de la production (%)
Référence (digestat brut)	-	0.122	
Ultrasons	1 h, 102 000 kJ	0.160	+31%
Broyage + Thermique	165° C, 15 atm	0.175	+43%
Broyage + Alcalin	5 g NaOH / 100g MS, 80° C	0.139	+14%
Broyage +Oxydation	4g H ₂ O ₂ / 100g MS, 20° C	0.125	+2%

Modélisation des cinétiques méthane

- Gompertz :

$$M = P \cdot \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_{\max}}{P} \cdot e (\lambda - t) + 1 \right] \right\}$$

Traitement	Paramètre	Potentiel estimé (m ³ CH ₄ /kg MV)	Maximum production rate (lCH ₄ /kgMV j)	Phase de latence (j)
Référence (digestat brut)	-	0.109	4	0.2
Ultrasons	1 h, 102 000 kJ	0.148	7	1.1
Broyage + Thermique	165° C, 15 atm	0.163	15	1.5
Broyage + Alcalin	5 g NaOH / 100g MS, 80° C	0.128	7	1.8
Broyage +Oxydation	4g H ₂ O ₂ / 100g MS, 20° C	0.115	7	1.3

Conclusions de l'étude

- Effet du broyage des digestats issus du premier réacteur
 - En batch :
 - inhibition initiale de l'activité des micro-organismes après broyage
 - Biodégradabilité améliorée (+ 15% méthane)
 - En semi-continu :
 - fonction des caractéristiques initiales du digestat (stabilisation)
- Effet des traitements combinés :
 - Amélioration de tous les BMPs
 - Parmi les procédés testés, Cambi le plus performant

Perspectives du projet

- Retour d'expériences industrielles
 - Installations de méthanisation (collecte de digestats)
 - Systèmes de broyage (autres PTs?) industriels
- Mise au point de méthodes de laboratoires transposables à l'échelle industrielle
 - Broyeurs industriels
 - Corrélation broyeur laboratoire/industriel
- Essais en collaboration sur site
 - Techniques de broyage
 - Type de digestat (substrat)

Méthanisation en 3 étapes pour l'amélioration de la production de biogaz :

Comparaison de procédés physico-
chimiques et impact du digestat sur
les performances du procédé