

ARMINES - Centre RAPSODEE

Patricia Arlabosse

SOLAGRO

Sylvaine Berger



Rapport d'étude

Projet ANR- 10-BIOE-007

DIVA

Programme BIOENERGIES 2010

**Tâche 4.1.1 - Evaluation technique et environnementale
du séchage des digestats**

Livrable L4.1.1.2 Intégration énergétique d'une installation industrielle de
séchage des digestats

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	4
2. Méthodologie	4
2.1 Rappels sur l'analyse Pinch.....	4
2.2 Choix du système	5
2.3 Hypothèses de modélisation.....	6
2.4 Démarche mise en œuvre	7
3. Résultats et Conclusions	8
4. Références bibliographiques	12

1. Introduction

Dans une optique de développement durable d'une filière de valorisation de la fraction solide des digestats en engrais, la difficulté actuelle réside dans le choix d'une technologie de séchage adéquate. Ce choix doit inclure les contraintes spécifiques à une situation donnée, et en particulier celles liées aux utilités disponibles sur le site. Le séchage thermique est une opération très énergivore. Pour minimiser la consommation énergétique, il est indispensable de procéder à une intégration énergétique du procédé, en valorisant la chaleur fatale disponible. Dans le cadre du projet ANR DIVA, l'analyse Pinch a été utilisée pour évaluer les besoins énergétiques d'un procédé « modèle » incluant une méthanisation mésophile avec valorisation du biogaz par cogénération et un séchage thermique haute température dans un sécheur à disques. Ce procédé est défini plus précisément aux paragraphes 2.2 et 2.3. Les paramètres « procédés » nécessaires à l'établissement des bilans de matière et d'énergie ont été communiqués par les partenaires (lorsqu'ils étaient accessibles), extraits de la littérature scientifique ou de retours d'expériences sur des matériaux similaires (boues résiduaire, en particulier). Les besoins en utilité de chauffage de l'installation et la chaleur résiduelle non valorisable sont quantifiés grâce à la méthode du pincement.

2. Méthodologie

2.1 Rappels sur l'analyse Pinch

Tout procédé thermique comporte des « courants chauds » et des « courants froids ». Par définition, un courant froid est un flux de matière qui nécessite d'être chauffé. Par opposition, un courant chaud est un flux de matière disponible à haute température qui doit être refroidi pour le bon fonctionnement du procédé (ex : la matière première sortant d'une unité d'hygiénisation avant son introduction dans un méthaniseur mésophile) ou qui peut être refroidi sans perturber le bon fonctionnement de l'installation (ex : les fumées d'échappement d'un moteur de cogénération). Le fonctionnement d'un procédé thermique nécessite donc des utilités de chauffage (vapeur d'eau, huile thermique, eau chaude, gaz de combustion...) et des utilités de refroidissement (eau de refroidissement, réfrigérant...). L'intégration énergétique vise à minimiser le coût de ces utilités en minimisant la consommation énergétique du procédé, et ceci par échange de chaleur entre les courants chauds et les courants froids du procédé (dans le respect des principes de la thermodynamique, évidemment).

Parmi les méthodologies existantes, la méthode du pincement, également appelée Analyse Pinch (Linnhoff, 1982 ; Kemp 2007), est une approche structurée pour la gestion des utilités d'un procédé et la conception du réseau d'échangeurs. Elle permet d'arriver très rapidement à un réseau optimal d'échanges de chaleur, c'est-à-dire à un nombre minimal d'échangeurs avec des apports de chaleur et des refroidissements optima. Le système d'étude défini, l'analyse Pinch comporte trois étapes successives :

- l'inventaire des courants froids et des courants chauds du procédé avec leurs caractéristiques (débits, niveaux de température, capacité calorifique) pour quantifier les flux thermiques à fournir ou soutirer pour chaque niveau de température,
- la minimisation des besoins énergétiques du procédé pour un pincement donné, par méthode graphique (construction des courbes composites) ou par méthode algorithmique (cascade énergétique).
- La conception du réseau d'échangeurs permettant d'atteindre la consommation énergétique minimale.

Dans le cadre du projet ANR DIVA, l'analyse Pinch a été utilisée uniquement pour évaluer les besoins énergétiques du procédé (étape 2). Compte tenu du planning du projet et des aléas opérationnels sur les sites partenaires, l'étude a porté sur un système « modèle ». Les paramètres « procédés » nécessaires à l'établissement des bilans de matière et d'énergie ont été communiqués par les partenaires, lorsqu'ils étaient accessibles, extraits de la littérature scientifique ou de retours d'expériences sur des matériaux similaires (boues résiduaires, en particulier).

2.2 Choix du système

Celui-ci s'apparente à une unité de méthanisation territoriale qui comprendrait (cf. Figure 1) :

- une opération d'hygiénisation ;
- un méthaniseur mésophile ;
- un moteur de cogénération pour valoriser le biogaz produit ;
- une séparation de phase par centrifugation pour concentrer le digestat ;
- et un procédé de séchage thermique, fonctionnant sur le principe du séchage par ébullition, pour déshydrater le digestat solide.

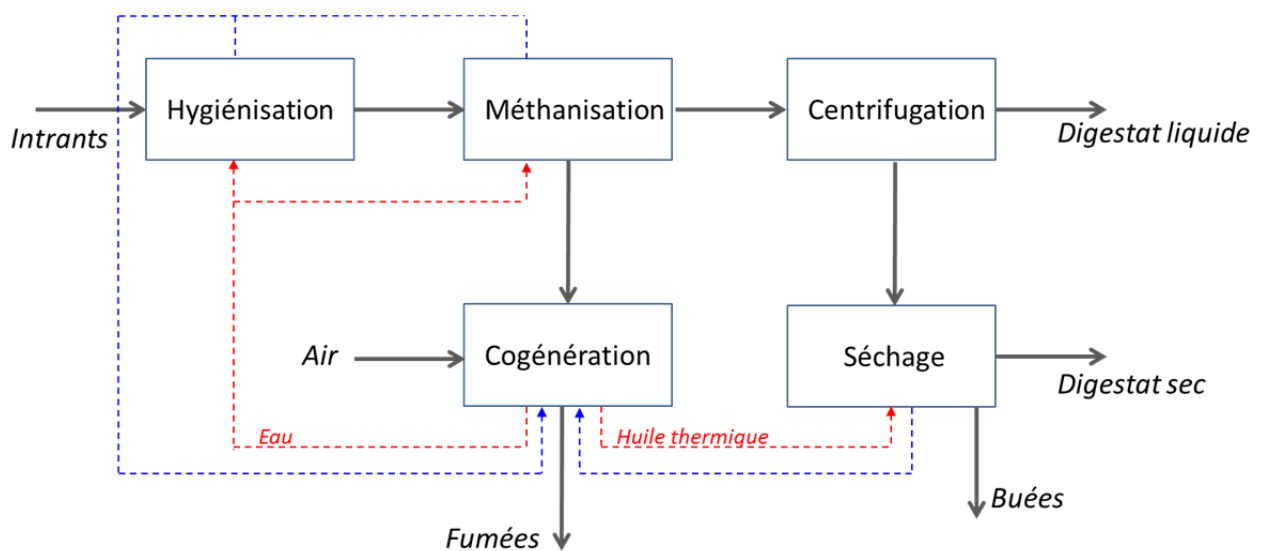


Figure 1 – Schéma de l'unité territoriale modélisée

2.3 Hypothèses de modélisation

Par cohérence avec les études environnementales et économiques présentées à la tâche 6 du projet DIVA, le système modélisé est supposé générer 42 525 t/an de digestat brut à 6% de matière sèche à la sortie de la méthanisation. On supposera ainsi que le débit d'intrants est de 46 360 t/an et que la siccité¹ du flux d'intrants est de 6%. Les siccités du digestat aux différents stades de transformation sont reportées dans le Tableau 1. Pour l'établissement des bilans thermiques, la capacité calorifique à pression constante du digestat anhydre est supposée égale à 1,25 kJ.kg⁻¹.K⁻¹.

	Siccité (%)
Digestat brut sortie méthanisation	6
Digestat liquide sortie centrifugation	1,5
Digestat solide sortie centrifugation	24,4
Digestat sortie séchage	95

Tableau 1 – Siccités du digestat aux différents stades de transformation

Pour l'hygiénisation, le produit est porté à une température de 70°C. La méthanisation est supposée mésophile ($T_{\text{digesteur}}=40^{\circ}\text{C}$). Les pertes pariétales du digesteur sont de 1,25 kJ.m⁻³.j⁻¹. La chaleur de réaction associée au processus de méthanisation, qui est très faible notamment au regard des pertes pariétales, n'est pas prise en compte dans les bilans énergétiques.

¹ La siccité représente la concentration massique en solides

La quantité de biogaz produite est supposée égale à $52,3 \text{ m}^3$ de CH_4 par tonne d'intrants. Ce biogaz contient 64,1% de méthane et 35,9% de dioxyde de carbone (en volume) et son pouvoir calorifique inférieur (PCI) est de 9,95 kWh par m^3 de CH_4 . La présence d' H_2S a été négligée.

Le sécheur thermique est un sécheur à disques fonctionnant à pression atmosphérique. La consommation thermique massique du sécheur est de 3300 kJ par kg d'eau évaporée. De l'huile thermique est utilisée comme fluide caloporteur. L'huile entre à une température de 220°C et est supposée ressortir du sécheur à 125°C . La capacité calorifique à pression constante de l'huile est de $2,2 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

La combustion dans le moteur de cogénération est supposée complète. 42% de l'énergie primaire est utilisée pour la production d'électricité. 43% de l'énergie primaire est valorisée sous forme de chaleur. Ainsi, 22% de l'énergie primaire est récupérée sur le bloc moteur sous forme d'eau chaude à 90°C . 15% de l'énergie primaire est récupérée directement sur les fumées sortant à 496°C et enfin 6% de l'énergie primaire est récupérée sous forme d'eau chaude à 150°C .

2.4 Démarche mise en œuvre

La démarche conventionnelle de l'analyse Pinch, présentée au paragraphe 2.1, a été mise en œuvre. Dans un premier temps, les courants chauds et froids ont été sélectionnés.

Les courants froids retenus pour l'analyse Pinch sont :

- le courant d'eau utilisé pour chauffer le réacteur d'hygiénisation ($T_{\text{entrée}} = 70^\circ\text{C}$) ;
- le courant d'eau utilisé pour chauffer le digesteur ($T_{\text{entrée}} = 40^\circ\text{C}$) ;
- l'huile thermique utilisée pour chauffer le sécheur ($T_{\text{entrée}} = 220^\circ\text{C}$).

Les courants chauds susceptibles d'être disponibles pour réduire la consommation d'utilité de chauffage sont :

- les fumées de combustion, disponibles à 496°C ;
- l'eau chaude disponible à 150°C ;
- l'eau chaude disponible à 90°C .

Les buées sortant du sécheur à une température proche de 100°C pourraient être condensées et la chaleur récupérée valorisée pour chauffer les courants froids. Dans le cadre du projet, les deux options ont été étudiées. Néanmoins, les résultats présentés au paragraphe 3 ne prennent pas en compte cette option. En effet, compte tenu de la température de cette source potentielle de chaleur, cette option n'a que peu d'intérêt dans le procédé tel qu'il est modélisé : la chaleur disponible à basse température est déjà en excès.

Connaissant le débit d'intrants et les compositions à la sortie des différentes opérations unitaires, les débits massiques des différents flux de matière dans le procédé sont au préalable calculés. Connaissant les températures initiales et finales des différents courants ainsi que les capacités calorifiques à pression constante des différents flux de matière, les flux de chaleur nécessaires au chauffage des courants froids ou au refroidissement des courants chauds sont ensuite déterminés. L'inventaire terminé, la méthode algorithmique, dite méthode de la table, est ensuite appliquée pour calculer les utilités chaudes et froides nécessaires au bon fonctionnement du procédé, après intégration énergétique.

3. Résultats et Conclusions

Une valeur type de 10°C a été retenue pour le pincement des échangeurs. Le résultat de l'inventaire sur les courants est présenté dans le Tableau 2. L'application de la méthode algorithmique pour calculer les besoins en utilités de chauffage et de refroidissement du procédé, après intégration énergétique, conduit au Tableau 3.

Sans intégration énergétique, le besoin en utilité chaude du procédé s'élèverait à 1110,5 kW. La puissance thermique maximale susceptible d'être récupérée sur les courants chauds par la mise en place d'un réseau d'échangeurs est de 800,5 kW. Le besoin étant supérieur, une utilité de chauffage d'une puissance de 310 kW est donc indispensable pour faire fonctionner le procédé modélisé. Même si la charge totale disponible sur les trois courants chauds (somme des puissances nettes des 3 courants chauds, cf. Tableau 2) est de 1184 kW, les niveaux de températures des sources de chaleur ne permettent pas de récupérer l'intégralité de cette chaleur. Ainsi, 383,6 kW ne peuvent pas être valorisés sur le procédé et, à défaut d'une autre solution d'intégration énergétique à proximité de l'unité de méthanisation territoriale, doivent être rejetés dans l'environnement. Si les buées sortant du sécheur étaient prises en compte

dans l'analyse Pinch, la puissance thermique à dissiper dans l'environnement serait alors de 888,2 kW.

Cette étude confirme, s'il en était besoin, que le choix de la technique de séchage est crucial et que l'ensemble des utilités de chauffage disponibles sur le site doivent être analysées avant de sélectionner une technologie donnée. Le procédé choisi dans le système théorique modélisé fonctionne à pression atmosphérique sur le principe du séchage par ébullition. Il nécessite donc un fluide caloporteur à haute température (de l'huile thermique à 220°C dans le cas modélisé). Les sources de chaleur disponibles sur le procédé ne permettent pas de délivrer la puissance nécessaire et une utilité de chauffage est alors indispensable. L'utilisation d'un fluide caloporteur à plus basse température ou d'une autre technologie de séchage, fonctionnant à plus basse température, permettrait de minimiser l'utilité de chauffage nécessaire au fonctionnement du procédé. En ce sens, l'analyse Pinch est un outil puissant pour pré-sélectionner les technologies de séchage à partir des utilités chaudes qui seront disponibles sur le site de méthanisation.

Courant	Type	Nom	T_{initiale} (°C)	T_{finale} (°C)	T_{initiale décalée} (°C)	T_{finale décalée} (°C)	P_{nette} (kW)	CP (kW/K)
Fumées de combustion	Chaud	C1	495	35	490	30	413,1	0,90
Eau chaude à 150°C	Chaud	C2	150	35	145	30	165,2	1,44
Eau chaude à 90°C	Chaud	C3	90	35	85	30	605,8	11,01
Eau vers hygiénisation	Froid	F1	20	70	25	75	294,3	5,89
Eau vers méthanisation	Froid	F2	20	40	25	45	161,1	8,06
Huile thermique	Froid	F3	125	220	130	225	655,1	6,90

Tableau 2 – Inventaire des courants

Température (°C)	Fluide présent sur l'intervalle de température	ΔT (°C)	$\Sigma CP_c - \Sigma CP_f$ (kW/K)	P_{nette} sur l'intervalle (kW)	Bilan net	Cascade infaisable	Cascade faisable
491						0,0	310,0
	C1	266	0,90	238	Surplus		
225						238,3	548,4
	C1 F3	80	-6,00	-480	Déficit		
145						-241,6	68,4
	C1 C2 F3	15	-4,56	-68	Déficit		
130						-310,0	0,0
	C1 C2	45	2,33	105	Surplus		
85						-205,1	105,0
	C1 C2 C3	10	13,35	133	Surplus		
75						-71,6	238,5
	C1 C2 C3 F1	30	7,46	224	Surplus		
45						152,2	462,3
	C1 C2 C3 F1 F2	15	-0,595	-9	Déficit		
30						143,3	453,4
	F1 F2	5	-13,94	-69,72	Déficit		
25						73,6	383,6

Tableau 3 – Méthode de la table appliquée au système modélisé

4. Références bibliographiques

Linnhoff B., Townsend D.W., Boland D., Hewitt G.F., Thomas B.E.A., Guy A.R. and Marsland R.H. (1982), User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, IchemE, Rugby.

Kemp C. I. (2007), Pinch Analysis and Process Integration - A user guide on Process Integration for the efficient use of energy, Butterworth-Heinemann, Oxford