



Trop d'énergie de procédé pour les installations de biogaz

Wilfried Göbel, Adrian Schneider

Le besoin d'énergie de procédé a été déterminé pendant plusieurs mois dans quatre différents types d'installation de biogaz: pendant six mois, dans un silo en matière synthétique et un silo en béton; pendant toute une année, dans une fosse en béton souterraine et dans un silo en béton avec dôme à gaz intégré (cloche en acier).

A cause de la mauvaise isolation, la part des pertes de chaleur par transmission en moyenne annuelle de l'ensemble de l'énergie de procédé s'élève pour l'installation souterraine et pour le silo en béton avec dôme à gaz entre 37 et 52%.

Les pertes par les conduites de chauffage constituent plus de 10% de l'énergie de procédé, lorsque les conduites ne sont pas isolées.

Pour le silo en matière synthétique et celui en béton, et avec des chauffages mal adaptés, le rendement de chauffage n'était que de 69 à 59%.

Le besoin en courant des installations de biogaz est très faible. Il s'élève, selon l'équipement, de 2 à 17 kWh/jour.

Les pompes de circulation du purin et de la chaleur ne nécessitent qu'environ 1 kWh/jour chacune.

1. Introduction

Dans les installations à biogaz, on a dû souvent constater que l'énergie de procédé nécessaire redemande une part trop grande du gaz produit. Nous avons essayé en première ligne de nous opposer à ce fait par une augmentation de la production de gaz, en augmentant la température d'exploitation, en modifiant la technique de brassage, en raccourcissant les intervalles d'amenée et en augmentant la teneur en matière sèche du lisier.

Par contre, nous avons prêté moins d'attention à l'amélioration de la rentabilité par une diminution de l'énergie de procédé. Des efforts afin de diminuer l'énergie de procédé conduisent aux réflexions suivantes:

- Quel est le pourcentage atteint par les différentes parties composant l'énergie de procédé?
- Quelles sont les améliorations de détail possibles?
- Où sont les différences pour les types individuels d'installation?

Seule l'étude d'une installation de chacun des principaux types installés en Suisse permettrait de répondre à ces questions.

2. Méthode de mesure

Nous avons mesuré chaque jour:

- la température de service
- la température moyenne de l'air
- la quantité de gaz produite
- la quantité de gaz de procédé

La teneur en dioxyde de carbone du biogaz (d'après la méthode Orsat) et la température du lisier frais ont été mesurées tous les trois à sept jours et les températures aller et retour du chauffage tous les 14 jours.

Deux fois au cours de la durée des essais, la puissance absorbée et la durée de fonctionnement des moteurs ont été déterminées.

3. Base de calcul

Perte par transmission thermique:

$$E_T = 24 \cdot F \cdot \text{valeur } k \cdot (t_B - t_L) / 1000 \quad \text{kWh/j} \quad [1]$$

Réchauffement du lisier frais:

$$E_F = 1,16 \cdot Q_F \cdot (t_B - t_F) \quad \text{kWh/j} \quad [2]$$

Perte dans les conduites de chauffage:

$$E_H = L \cdot \text{valeur } k \cdot Z \cdot (t_H - t_A) / 1000 \quad \text{kWh/j} \quad [3]$$

Modification de la température de service:

$$E_B = 1,16 \cdot Q \cdot (t_{BE} - t_{BA}) / N \quad \text{kWh/j} \quad [4]$$

La formule de la modification de la température de service tient compte de la capacité d'accumulation thermique du contenu du digesteur.

Explication des signes:

- t_B = température de service en degré
- t_L = température de l'air en degré
- t_F = température du lisier frais en degré
- t_H = température des conduites de chauffage en degré
- t_A = température ambiante des conduites en degré
- t_{BA} = température de service au départ de l'analyse en degré
- t_{BE} = température de service à la fin de l'analyse en degré
- F = superficie du digesteur en m^2
- Q_F = quantité de lisier entrant en m^3/jour
- Z = durée de chauffage du digesteur et des moteurs en heures
- L = longueur des conduites en m
- Q = contenu du digesteur de lisier en m^3
- N = nombre de jours
- η = rendement thermique
- E_G = contenu d'énergie du gaz pour le chauffage en kWh/jour
- I = puissance du courant en Ampère
- $\cos \varphi$ = facteur de puissance effective, admis à 0,8.

En divisant la somme des quatre parts d'énergie de procédé par le contenu d'énergie du biogaz nécessaire au chauffage du digesteur, on obtient le rendement thermique du chauffage.

– Rendement thermique du chauffage:

$$\eta = (E_T + E_F + E_H + E_B) / E_G \quad [5]$$

– Energie électrique monophasée:

$$E_M = 0,22 \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot Z \quad [6]$$

diphase:

$$E_M = 0,38 \cdot I \cdot 3 \cdot \cos \varphi \cdot Z \quad [7]$$

En déterminant la qualité du gaz à partir de la teneur en CO_2 du biogaz, on a admis que le biogaz contient 2 à 3% de vapeur d'eau et des traces d'autres gaz et on a tenu compte que la température du gaz, la pression de service

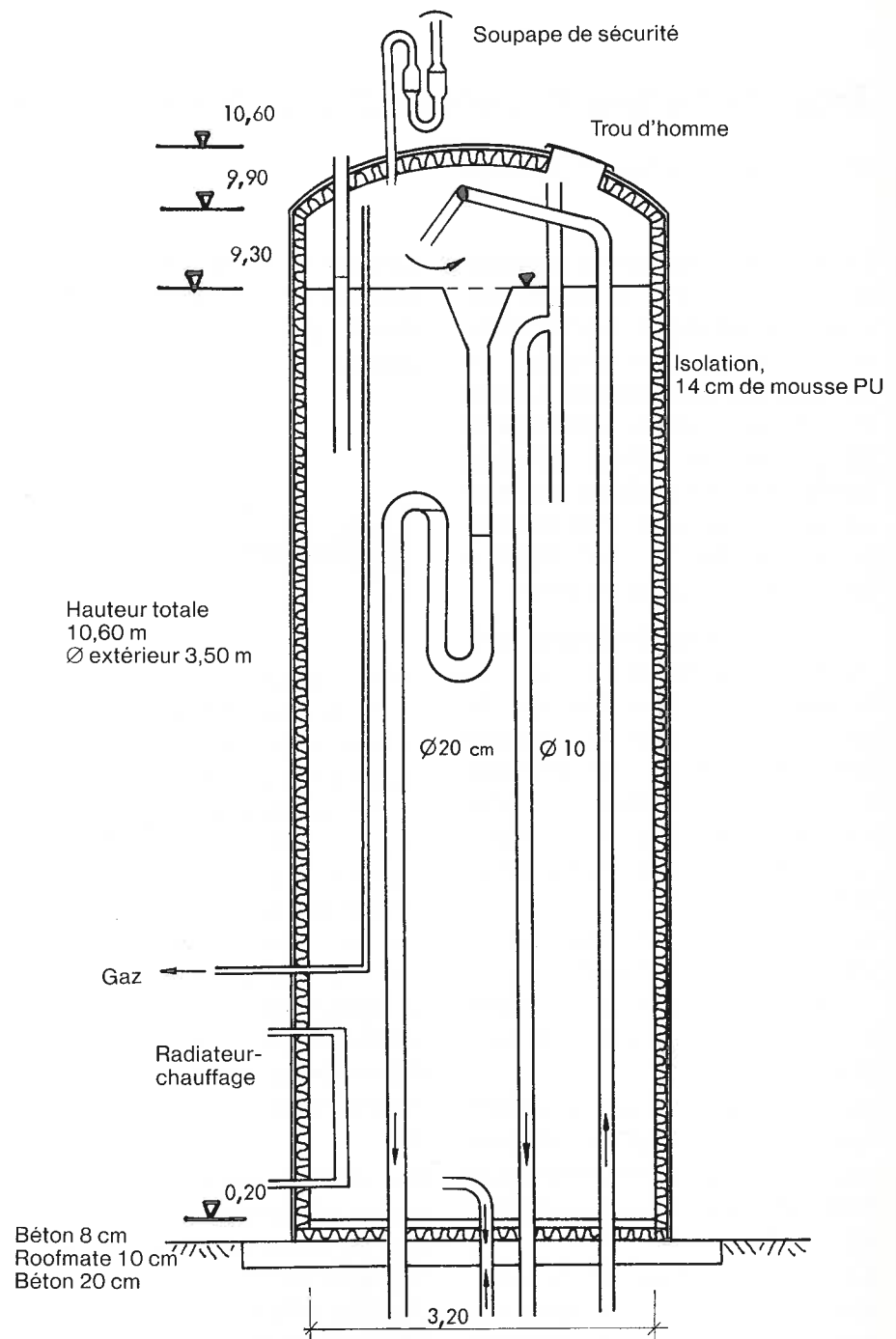


Fig. 2: Coupe à travers le silo en matière synthétique, en tant que digesteur.

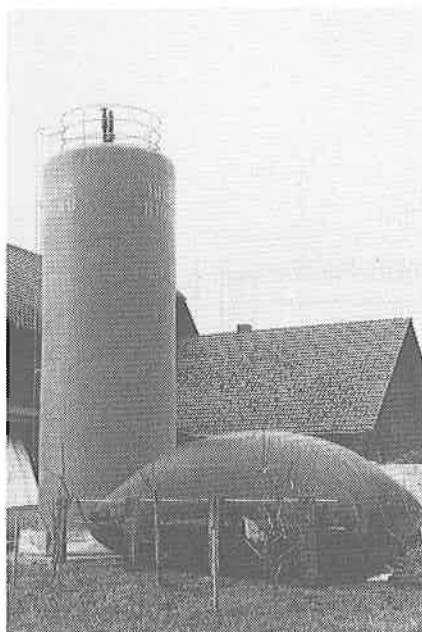


Fig. 1: Le silo en matière synthétique en tant que digesteur avec un ballon à gaz de 50 m³.

et la pression atmosphérique modifient la valeur calorifique du mètre cube de méthane «normal».

4. Description des digesteurs

4.1 Silo en matière synthétique

Le digesteur a la forme d'un silo d'ensilage en matière synthétique. Il est isolé à l'intérieur par une couche de mousse PU de

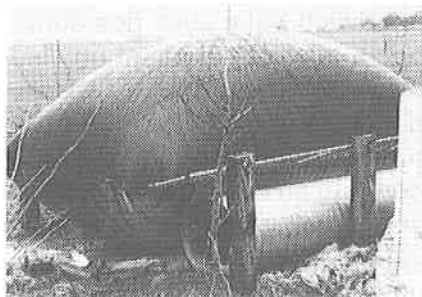


Fig. 3: Ballon à pression alourdi de sacs de sable dans un tube en tôle à côté du ballon de gaz.

14 cm. Un enduit spécial protège l'isolation de l'humidité (fig. 1 et 2). Une pompe hélicoïdale d'une performance de 3,7 kW transporte le lisier frais dans le silo par deux des quatre tuyaux au choix. Le tuyau débouchant dans le bas peut aussi servir de tuyaux d'écoulement, et on peut lutter contre une couche flottante grâce à un tuyau à effet de jet.

Le gaz s'écoule du digesteur dans un ballon de 50 m³ de contenance. De là, le gaz est aspiré par un compresseur (0,7 kW) qui le comprime dans un ballon alourdi (ballon à pression) contenant 1,6 m³ (fig. 3). La pression de service de 13 à 22 mbar suffit à approvisionner en gaz la chaudière de chauffage de la maison d'habitation à 50 m de distance. Un appareil

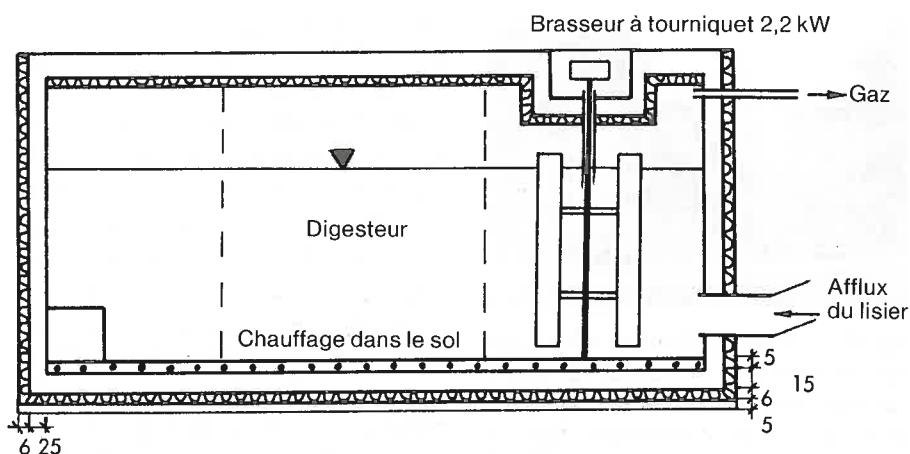
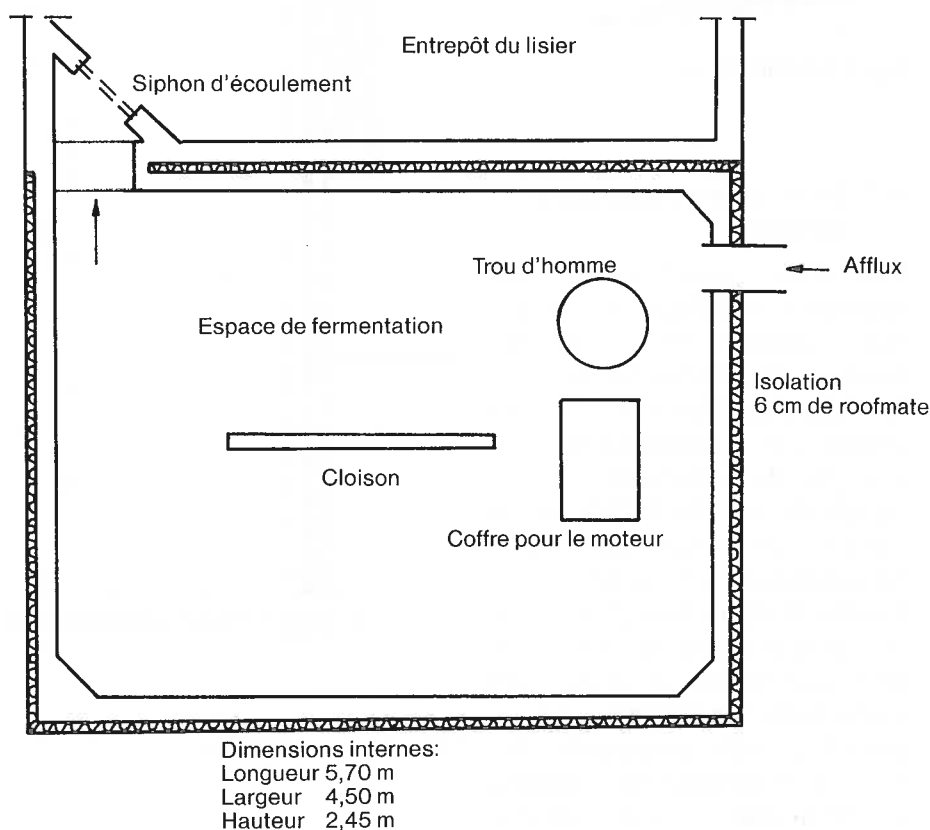


Fig. 4: Coupes à travers l'installation de biogaz souterraine.

de chauffage mural qui réchauffe le digesteur est aussi raccordé au ballon de pression. Un radiateur de 6 m² de surface transmet la chaleur au lisier.

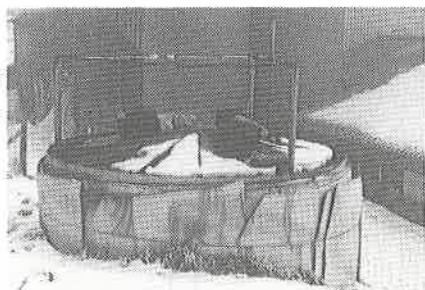


Fig. 5: Gazomètre de 7,5 m³.

4.2 Installation souterraine en béton

L'installation souterraine se différencie d'une fosse à lisier par une isolation de 6 cm, des tuyaux de réchauffement au fond du récipient et des siphons d'apport et d'écoulement du lisier (fig. 4). L'installation a été construite en 1979. Si la construction se faisait maintenant, on prévoierait une isolation plus exacte et deux fois plus épaisse. Le lisier coule vers l'installation souterraine le long d'une pente libre. Un brasseur à tour-niquet (2,5 kW) mélange le contenu du digesteur et empêche la formation d'une couche

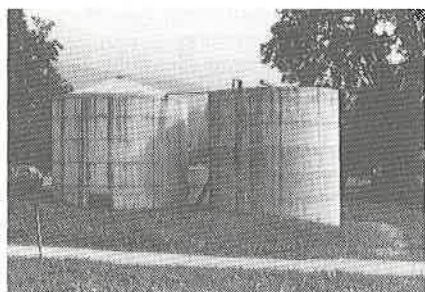


Fig. 6: A droite sur l'image, silo en béton en tant que digesteur; le silo à gauche contient de bas en haut: pré-fosse à lisier avec aérateur, chambre de chauffe et ballon de gaz de 100 m³ de contenance.

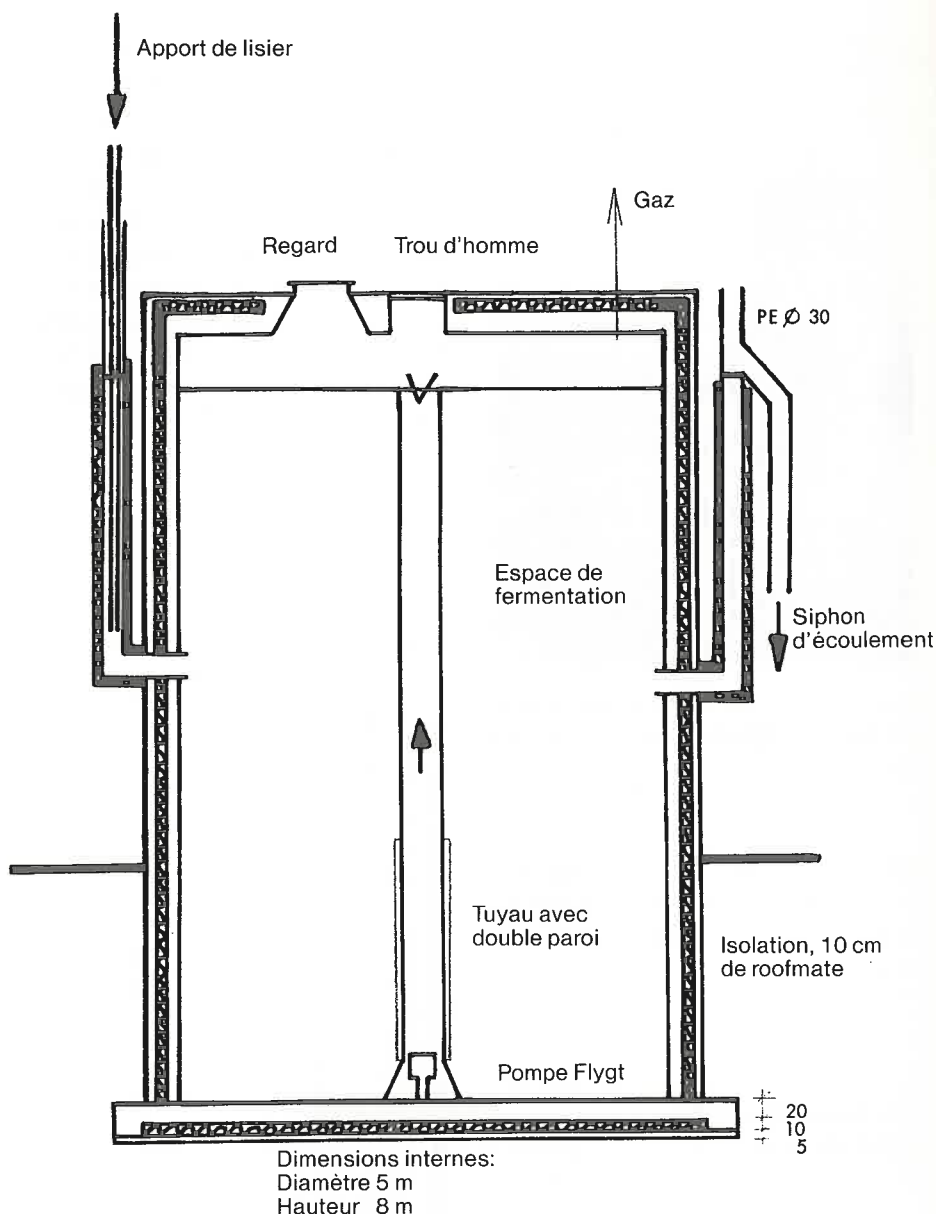


Fig. 7: Coupes transversales à travers le silo en béton en tant que digesteur.

flottante. Le gaz est emmagasiné dans un gazomètre contenant 7,5 m³ sous une pression de service de 10 mbar (fig. 5). Il sert à chauffer deux chaudières. Une chaudière se trouve dans la cave de la maison d'habitation, l'autre dans l'étable. Celle qui est dans l'étable prépare l'eau chaude pour l'étable, à raison d'environ 3 m³ de gaz/jour. Elle livre aussi l'énergie de procédé pour le digesteur et chauffe l'étable pendant les jours très froids. Une fosse à purin normale est accouplée au digesteur.

4.3 Silo en béton

Le silo en béton en tant que digesteur est une construction sandwich bâtie avec des coffrages à glissière et ayant une isolation de 10 cm (fig. 6 et 7). Une hélice (2,2 kW) dans le tuyau transporteur central brasse le contenu du digesteur de telle façon qu'elle transporte le lisier vers le haut et qu'elle en gicle une partie de la surface. Un tiers du tuyau transporteur est à double paroi et sert de radiateur. Le gaz arrive dans un ballon de

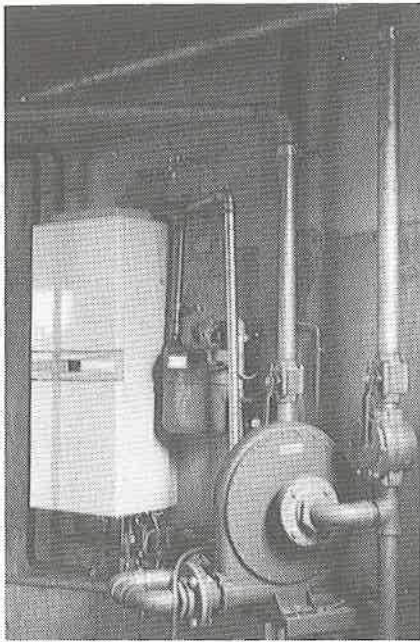


Fig. 8: Appareil de chauffage mural et soufflerie.

100 m³ de contenance. L'appareil de chauffage mural pour le chauffage du digesteur est alimenté directement par le digesteur (pression par le récipient à eau), alors que la chaudière à

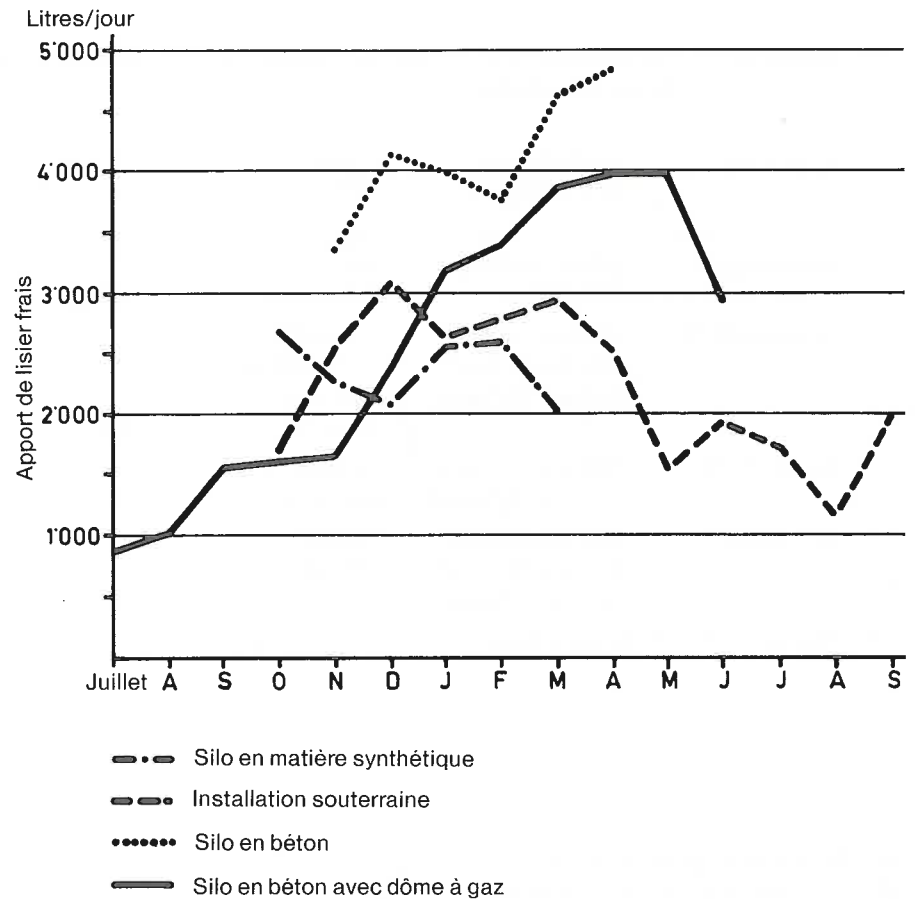


Fig. 10: Moyenne mensuelle de l'apport journalier de lisier frais de toutes les installations.

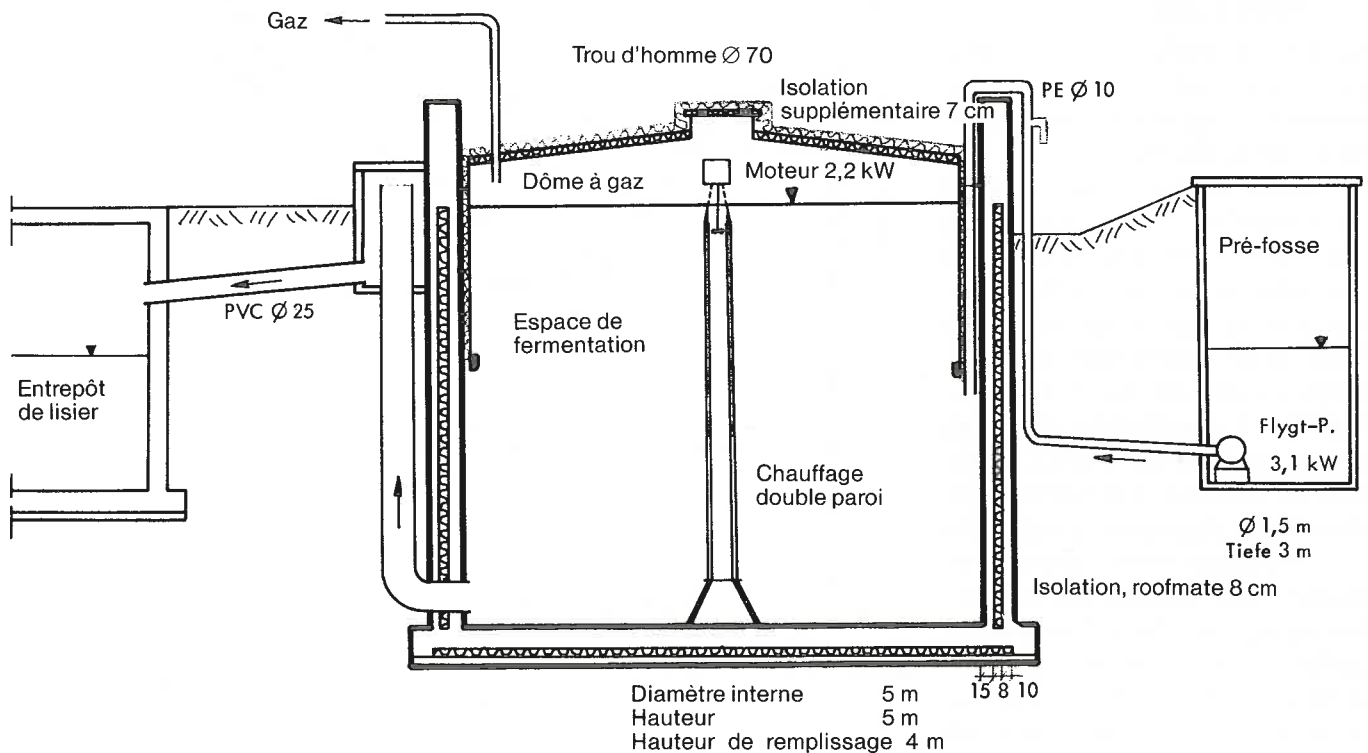


Fig. 9: Silo en béton avec dôme à gaz en tant que digesteur.

Tableau 1: Conditions préalables de l'exploitation, contenu du digesteur et valeur k de chaque installation

Installation	genre d'animal et cheptel	évacuation du fumier+préfosse	fosse du digesteur en m ³ volume total	volume utile	valeur k calculée en W/m ² K
Silo en matière synthétique	bovins à l'engrais+vaches, 32 UGB	mécanisme rampant pré-fosse	81	73	0.22
Souterrain	vaches, 38 UGB, 20 places pour porcs à l'engrais	canal d'évac. du fumier par voie liquide dans l'étable	63	43	0.54
Silo en béton	650 places pour porcs à l'engrais	caillebotis, pré-fosse aérée	157	145	0.34
Silo en béton dôme à gaz	350 places pour porcs à l'engrais 50 truies mères	caillebotis, pré-fosse	106	79	1.02*

*La moitié du dôme à gaz émerge au-dessus du lisier

gaz de la fromagerie éloignée de 150 mètres est approvisionnée en gaz par une soufflerie à pression (0,4 kW et 120 mbar).

4.4 Silo en béton avec dôme à gaz

Le silo en béton avec dôme à gaz intégré de 25 m³ de contenance se trouve en grande partie en terre (fig. 8).

La seule différence par rapport au silo en béton décrit ci-dessus est représentée par le dôme à gaz intégré. Dans cette construction, le gaz afflue vers une installation thermique de couplage. Le courant produit est utilisé dans l'exploitation (85%) et vendu au réseau (15%), alors que la chaleur d'échappement chauffe le digesteur grâce à un accumulateur d'eau chaude et fournit l'eau nécessaire à l'étable. Le flux de chaleur vers le digesteur est mesuré par un calorimètre et le courant pour le brasseur par un compteur de courant. Selon la hauteur à laquelle le dôme à gaz (pression

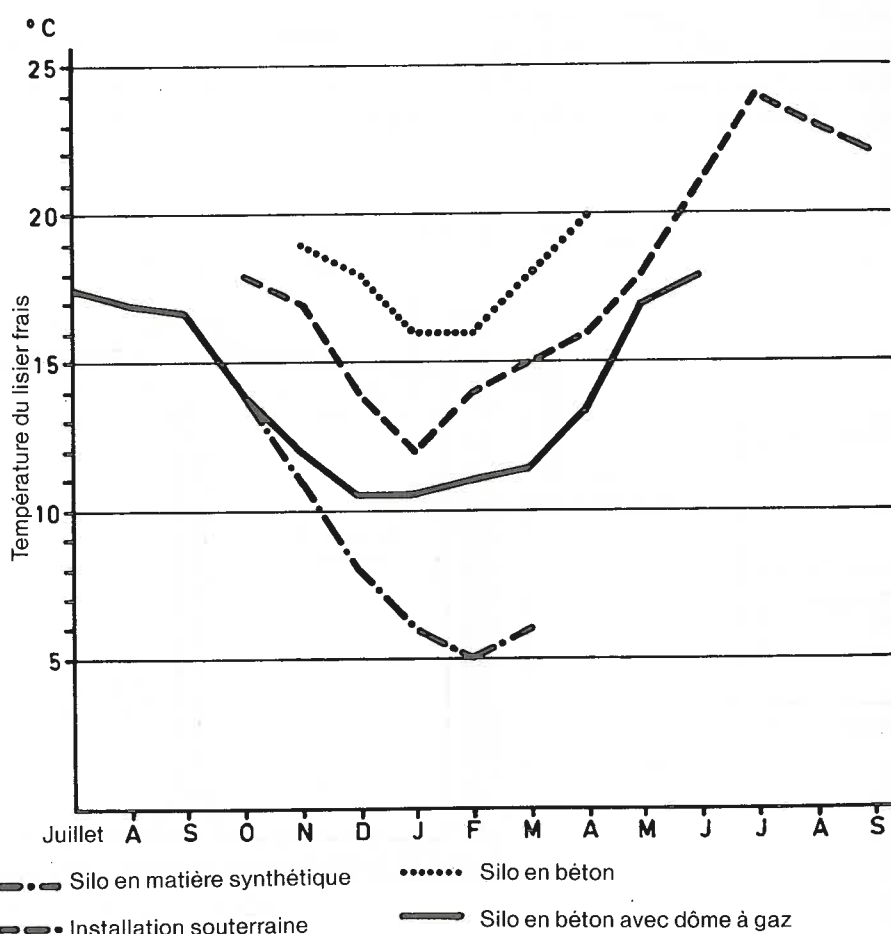


Fig. 11: Moyenne mensuelle des températures journalières du lisier frais de toutes les installations.

de service environ 20 mbar) s'élève au-dessus de l'installation, la contenance en espace pour le gaz se modifie et avec elle la grandeur de la surface du digesteur.

5. Résultats et discussions

5.1 Généralités

Des indications sur le cheptel, le système d'évacuation du fumier, la grandeur du digesteur, la contenance en lisier et les valeurs k de tous les digesteurs sont résumées dans le tableau 1. Les illustrations 10, 11 et 12 indiquent les moyennes mensuelles de l'apport journalier de lisier frais, de la température du lisier frais et de la température de service de toutes les installations. L'illustration 13 est une récapitulation des valeurs moyennes mensuelles de la teneur en CO_2 du biogaz de toutes les installations. Les températures du sol pour la semelle et les parois du digesteur ont été admises d'après des indications de l'Institut Suisse de Météorologie (ISM). Les illustrations 14, 15, 17 et 18 confrontent les contenus énergétiques des productions de gaz mesurées et les quantités de gaz de procédé aux

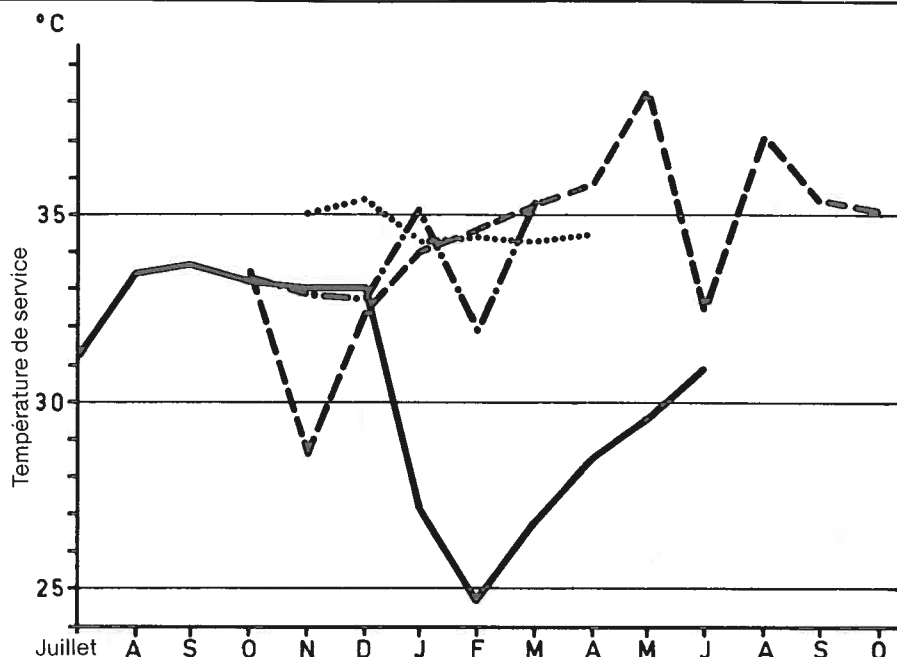


Fig. 12: Moyenne mensuelle des températures journalières de service de toutes les installations.

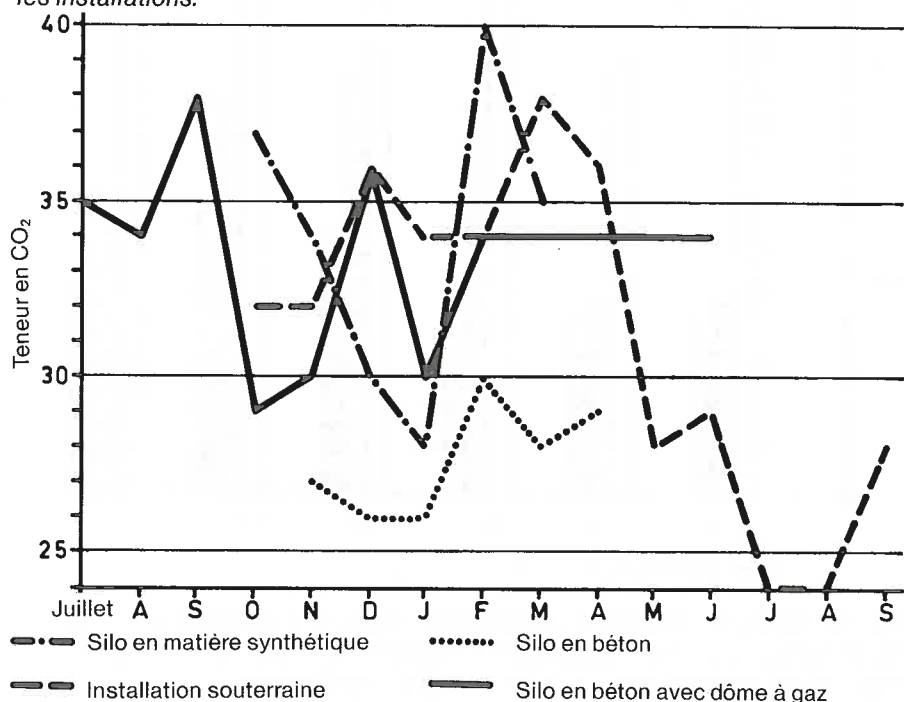


Fig. 13: Valeurs moyennes mensuelles de la teneur en dioxyde de carbone du biogaz de toutes les installations.

Tableau 2: Composition des parties d'énergie de procédé des 4 installations

Installation	gaz m^3/jour gaz produit	gaz procédé	gaz de procédé en %	parties d'énergie de procédé en %				rendement du chauffage en % de degré
				E_T	E_F	E_H	E_B	
Silo en matière synthétique	65	26	40	19	69	5	7	69
Souterrain	41	23	57	37	48	14	1	71
Silo en béton	127	35	27	32	64	4	—	59
Silo en béton avec dôme à gaz	46	—	35	52	47	1	—	—

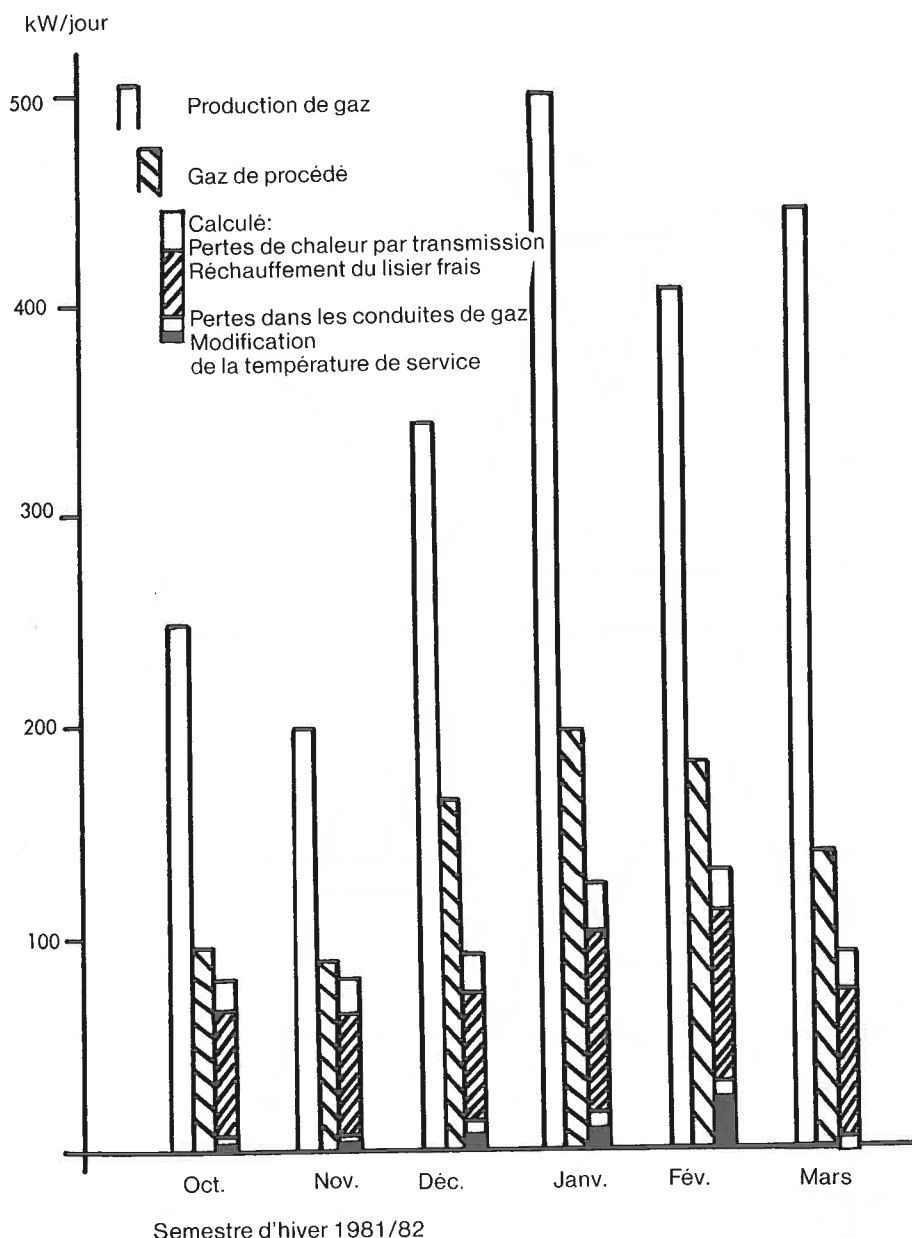


Fig. 14: Teneur en énergie de la production de gaz et quantité de gaz de procédé en comparaison avec les parties de chaleur de procédé calculées à partir de mesures de température pour le silo en matière synthétique.

parties d'énergie de procédé calculées entre autres à partir des mesures de températures. Les parties séparées d'énergie de procédé des 4 installations sont résumées au tableau 2.

5.2 Silo en matière synthétique

D'après l'illustration 14, la livraison d'énergie du silo en matière synthétique est environ deux fois plus grande de janvier à

mars (400 kWh/jour) que d'octobre à novembre, bien que la quantité de lisier et la température de service soient demeurées environ les mêmes. La raison en est d'une part l'addition d'une grande quantité indéterminée d'excréments de poule. D'autre part, en hiver, on ne purine pas les prés. La partie relativement importante de gaz de procédé (40%) de décembre à

mars est due aux raisons suivantes:

- L'évolution de la température du lisier frais, qui provient d'une préfosse, est très faible par rapport à celle des autres installations. Par conséquent, la partie pour le réchauffement du lisier frais constitue 69% de l'ensemble de l'énergie de procédé.
- Les pertes de conduites de chauffage s'élèvent à 5% de l'ensemble de l'énergie de procédé, car les conduites sont isolées, à l'exception des conduites de la baraque de chauffage.
- Le rendement de chauffage de 69% en moyenne est faible, comparé aux 75 à 80%, en cas normal [2, 5, 6].

5.3 Installation souterraine

Pour l'installation souterraine, la haute performance du gaz de plus de 250 kWh/jour en hiver et au printemps est frappante. Pendant cette période, des excréments de porc et parfois aussi de poule ont été ajoutés. La partie d'énergie de procédé en moyenne de 57% est trop élevée. La très mauvaise isolation de 6 cm est trop faible d'une part et, d'autre part, elle présente beaucoup de ponts de refroidissement (fig. 4 et 16). En plus, la perte dans les conduites de chauffage (14 % en moyenne) est beaucoup trop importante. Les six conduites de chauffage ne sont pas isolées dans la terre. Les pertes dans les conduites de chauffage et celles par transmission thermique constituent ensemble environ 51% des pertes totales (fig. 15). Avec une bonne isolation, les deux types de perte par transmission thermique pourraient être réduits à moins de la moitié. Ainsi, la partie d'énergie de procédé, réchauffement du lisier frais compris, s'élèverait en

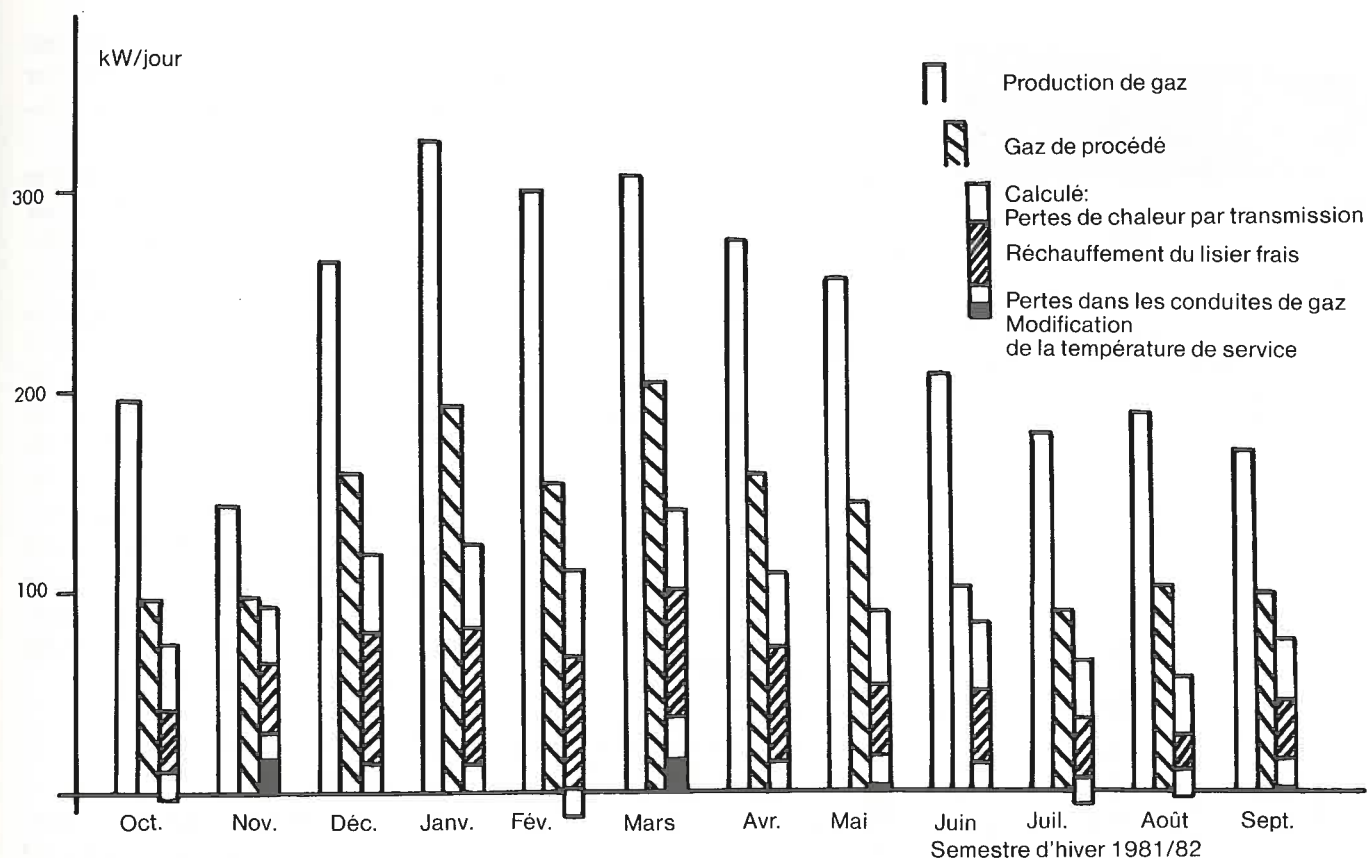


Fig. 15: Teneur en énergie de la production de gaz et quantité de gaz de procédé en comparaison avec les parties de chaleur de procédé calculées à partir de mesures de température pour l'installation souterraine.

moyenne annuelle non pas à 57%, mais environ à 40%. Cette partie d'énergie de procédé toujours élevée de 40% vis-à-vis de 30% en cas normal [1, 2, 3] s'explique en partie par la faible production de gaz de 41 m³/jour pendant la période de pâturages (tableau 2). Comme la température du lisier frais et celle am-

biante (caneaux collectifs dans l'étable et digesteur dans la terre) sont relativement élevées – en moyenne 17,8° et 10° – on aurait bénéficié de bonnes conditions préalables pour une partie d'énergie de procédé plutôt faible.

Le rendement de chauffage s'élève en moyenne d'une an-

née à 71%. C'est la limite inférieure du domaine usuel pour les chaudières.

5.4 Silo en béton

Dans le silo en béton, la haute performance de plus de 600 kWh/jour est frappante (fig. 17). La raison en est une nourriture grasse; il s'agit entre autres

Tableau 3: Besoins en courant des moteurs des installations de biogaz

Installation	consommation de courant en kWh/jour				total
	pompe de circulation du chauffage	pompe à lisier	brasseur	soufflerie	
Silo en matière synthétique	1.5	0.6	–	5.4	7.5
Installation souterraine	1.4	–	0.8	–	2.2
Silo en béton	1.0	0.7	5.3	9.8	16.8
Silo en béton avec dôme de gaz	0.9	0.3	13.5	–	14.4

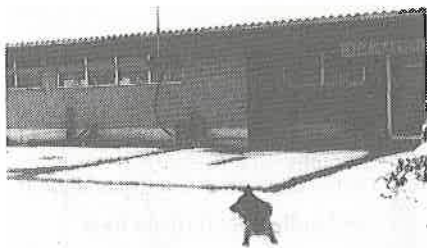


Fig. 16: Fosse à béton en tant que digesteur; la neige au-dessus des parois a fondu, car il existe des ponts de réchauffement.

d'une soupe faite avec la récupération de cadavres. Le lisier provenant de cette alimentation livre plus de gaz. Dans cette installation, la teneur en CO_2 du gaz est la plus basse, par rapport aux autres (moyenne 28% [fig. 13]). Comme la température du lisier frais de 18 degrés en moyenne est également élevée, à cause de la pré-aération et parce que l'installation avec

$0,34 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ est bien isolée (tableau 1), on peut en attendre une faible part d'énergie de procédé.

Le rapport des pertes entre l'échauffement du lisier frais et la transmission de chaleur du digesteur de 2 : 1 en moyenne est normal (tableau 2). Comme les tuyaux de chauffage ne sont pas isolés dans la chaufferie, la perte dans les conduites de chauffage constitue 4% de l'énergie de procédé. Il en résulte donc pour le semestre hivernal une partie d'énergie de procédé totale de 27%, à cause de la forte production de gaz. Avec ses 59%, le rendement de chauffage est très mauvais.

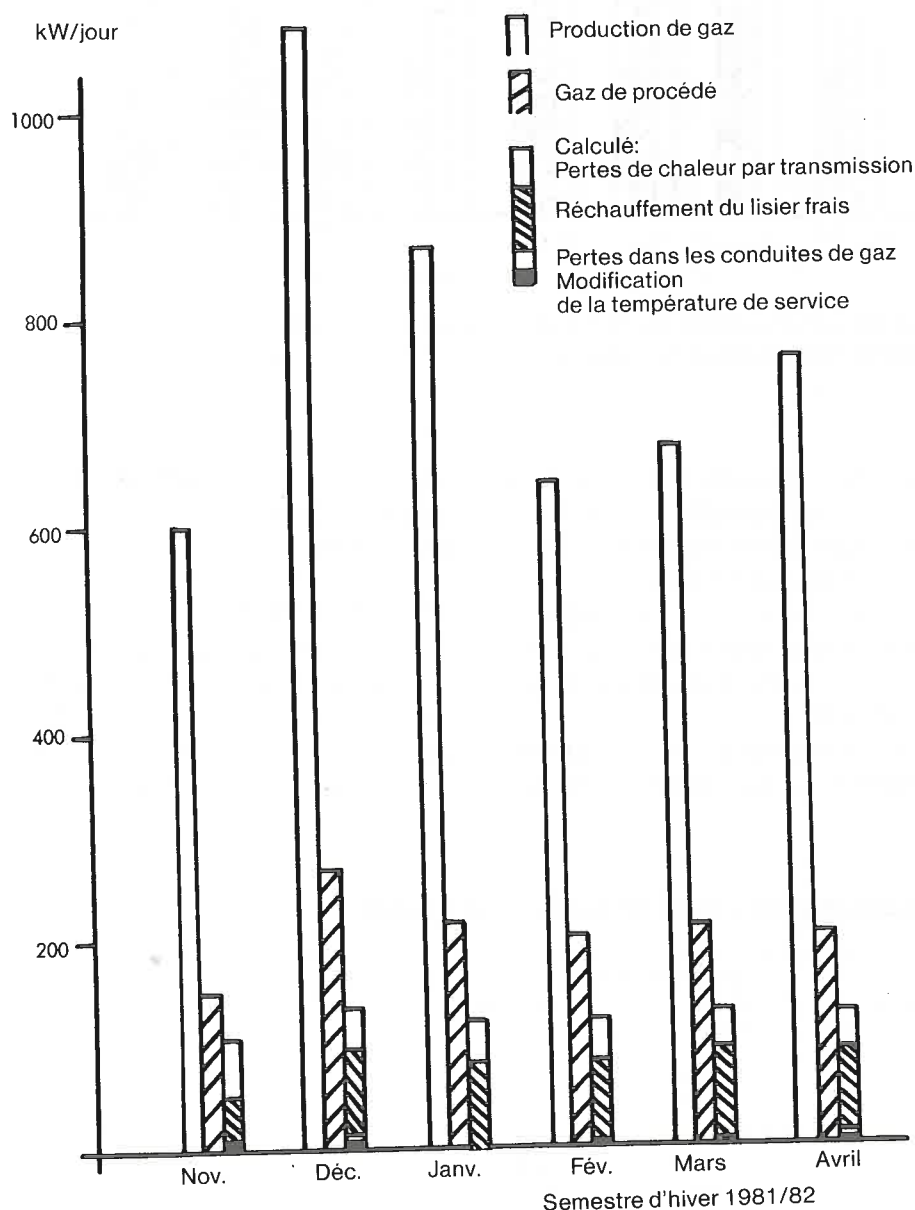


Fig. 17: Teneur en énergie de la production de gaz et quantité de gaz de procédé en comparaison avec les parties de chaleur de procédé calculées à partir de mesures de température pour le silo en béton.

5.5 Silo en béton avec dôme à gaz

Dans cette installation, la production de gaz moyenne de 46 m^3 par jour pour plus de 400 porcs est considérablement au-dessous de ce qu'on pourrait en attendre (tableau 2). L'énergie de procédé directement mesurée s'élève en moyenne à 35% de la teneur en énergie de la production de gaz. Elle est beaucoup trop élevée, d'autant plus qu'aucun rendement de chauffage n'avait dû être pris en considération. Les pertes dans les conduites de chauffage sont faibles, car, dans cette installation, les conduites de chauffage sont bien isolées dans la chaufferie et dans la terre (1% de l'énergie de procédé).

La paroi du dôme à gaz n'est pas isolée. C'est la raison de la partie élevée de pertes par transmission thermique. Si l'on avait isolé la paroi, le dôme à gaz serait remonté à la surface. La paroi non-isolée fait l'effet d'un radiateur et suivant la hauteur à laquelle le dôme à gaz émerge du lisier, les pertes de chaleur varient. Si l'on calcule avec un dôme à gaz émergeant

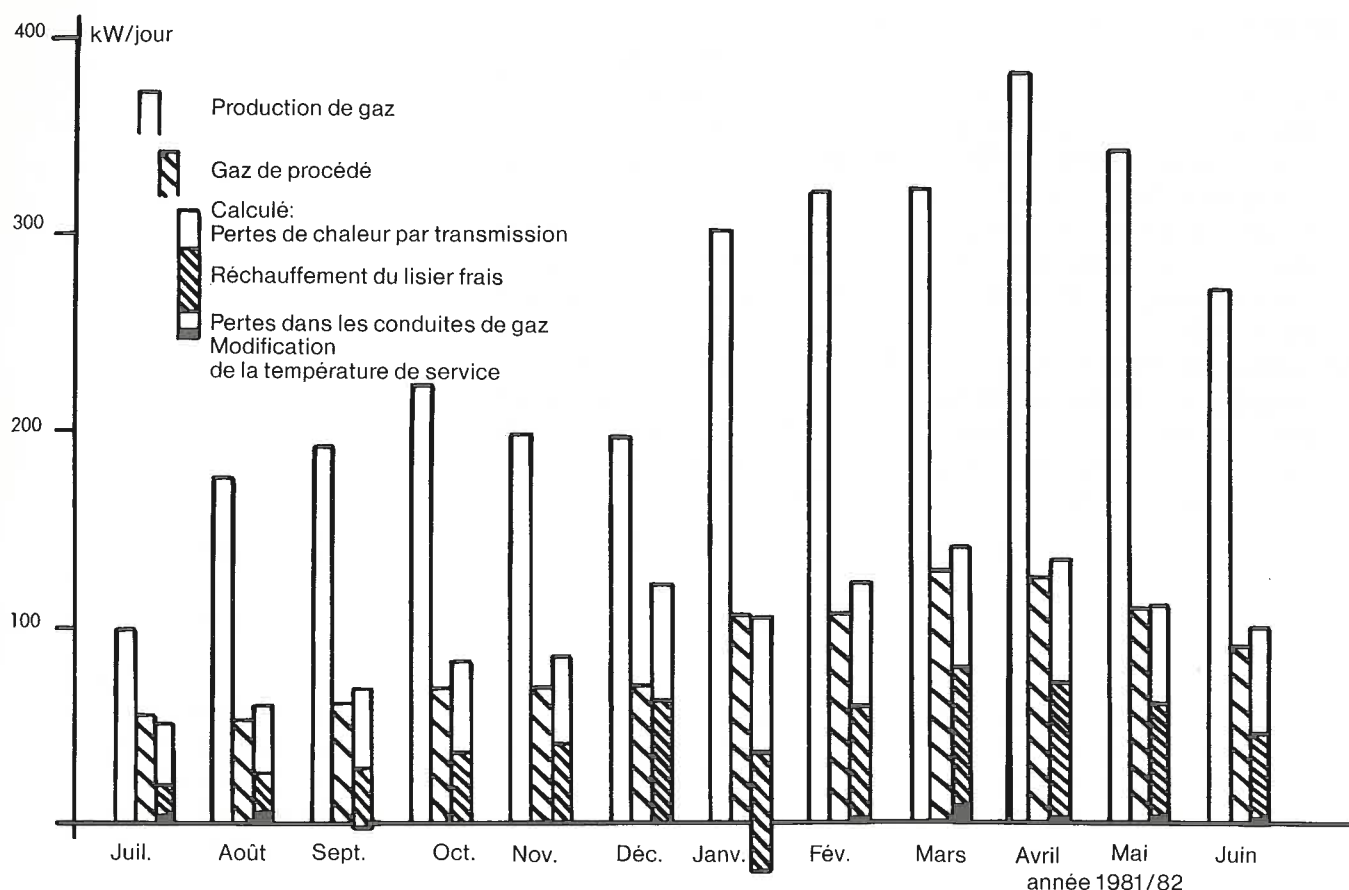


Fig. 18: Teneur en énergie de la production de gaz et besoin en chaleur mesuré en comparaison avec les parties de chaleur de procédé calculées à partir de mesures de température pour le silo en béton avec dôme à gaz.

à moitié, les pertes par transmission thermique sont de 52% et donc plus élevées que celles par chauffage du lisier frais (fig. 18).

5.6 Besoins en courant

Comment en va-t-il du besoin en courant pour l'impulsion des moteurs? Dans le tableau 3, le besoin en courant des moteurs de chaque installation est indiqué. En plus, l'utilisation de courant a été mesurée et la durée d'utilisation indiquée par les utilisateurs. Pour les moteurs des pompes de circulation, l'utilisation de courant a été environ deux fois plus élevée que la performance indiquée.

Bien que les moteurs de la pompe d'alimentation du lisier soient les plus puissants de tous les

moteurs d'une installation de biogaz, ils ne nécessitent pourtant que très peu de courant, à cause de leur courte durée d'utilisation. Ils sont même dépassés par les petites pompes de circulation du chauffage qui utilisent environ 1,2 kWh/jour à cause de leurs longues durées d'utilisation. Les souffleries nécessitent le plus de courant (5 à 10 kWh/jour). Pour les brasseurs, le besoin en courant peut être très différent. A cause de la longue durée d'utilisation, les hélices de tuyau utilisent beaucoup de courant (dans les silos en béton, 5 à 15 kWh/jour), les brasseurs du tourniquet beaucoup moins (installations souterraines, 1 kWh/jour). Selon l'équipement, le besoin total en courant d'une installation de

biogaz varie entre 2 et 17 kWh/jour.

6. Conclusions

Dans les installations de biogaz, on devrait prévoir une isolation impeccable, de plus de 12 cm. Ceci permettrait d'économiser de l'énergie de procédé. Il faudrait également diluer le lisier frais le moins possible et l'entreposer de façon à ce qu'il ne se refroidisse pas trop. Il faudrait complètement isoler les conduites de chauffage et n'utiliser que des appareils de chauffage qui maintiennent leur haut rendement, même avec le biogaz.

Littérature spécialisée

- [1] Göbel, W., Kaufmann, R., Zur Planung von Biogasanlagen, Landtechnik, KTBL, Darmstadt, Sept. 1980.
- [2] Göbel, W., Biogasanlagen in der Praxis, TAB, Bertelsmann-Verlag, Gütersloh, Nr. 8, 1981.
- [3] Göbel, W., Bestimmung der Anteile der Prozessenergie bei einer Biogasanlage, Blätter für Landtechnik 246, FAT Tänikon, 1984
- [4] Recknagel, Sprenger, Taschenbuch für Heizung- und Klimatechnik, P. Oldenbourg Verlag, 1975.
- [5] Wellinger, A., Egger, K., Sutter, K., Biogasproduktion und -verbrauch: biologische und verfahrenstechnische Grundlagen, Schriftenreihe der FAT 23, Tänikon, 1985.
- [6] Wellinger, A., Edelmann, W., Favre, R., Seiler, B., Woschitz, D., Biogas-Handbuch, Verlag Wirz, Aarau, 1984.

Des demandes éventuelles concernant les sujets traités ainsi que d'autres questions de technique agricole doivent être adressées aux conseillers cantonaux en machinisme agricole indiqués ci-dessous. Les publications et les rapports de texts peuvent être obtenus directement à la FAT (8356 Tänikon).

BE	Furer Willy, 2710 Tavannes	Tél. 032 - 91 42 71
FR	Lippuner André, 1725 Grangeneuve	Tél. 037 - 82 11 61
TI	Müller A., 6501 Bellinzona	Tél. 092 - 24 35 53
VD	Gobalet René, 1110 Marcellin-sur-Morges	Tél. 021 - 71 14 55
VS	Balet Michel, Châteauneuf, 1950 Sion	Tél. 027 - 36 20 02
GE	A.G.C.E.T.A., 15, rue des Sablières, 1214 Vernier	Tél. 022 - 41 35 40
NE	Fahrni Jean, Le Château, 2001 Neuchâtel	Tél. 038 - 22 36 37
JU	Donis Pol, 2852 Courtemelon/Courtételle	Tél. 066 - 22 15 92

Les numéros des «Rapports FAT» peuvent être également obtenus par abonnement en langue allemande. Ils sont publiés sous le titre général de «FAT-Berichte». Prix de l'abonnement: Fr. 35.- par an. Les versements doivent être effectués au compte de chèques postaux 30 - 520 de la Station fédérale de recherches d'économie d'entreprise et de génie rural, 8356 Tänikon. Un nombre limité de numéros photocopiés en langue italienne sont également disponibles.