

The logo for INRAE, featuring the letters 'INRAE' in a teal, sans-serif font. The letter 'A' is stylized with a circular element on its right side.The logo for ARVALIS, featuring the letters 'ARVALIS' in a teal, sans-serif font. The letter 'A' is stylized with a yellow and green leaf-like shape on its left side. A thin teal underline is positioned below the text.

COMMENT OPTIMISER LES ENSILAGES DE CIVE ?

Thèse de Clément Van Vlierberghe

sur l'optimisation de la récolte du prétraitement et du stockage des CIVE
en vue de préserver leur pouvoir méthanogène
(soutenue en 2022, financée par GRDF et menée au laboratoire
INRAE LBE à Narbonne avec le concours d'ARVALIS,
institut technique agricole grandes cultures et fourrages).

LES EFFLUENTS D'ENSILAGE

Les CIVE d'hiver récoltées pour la méthanisation sont fréquemment humides. Les risques de production d'effluents d'ensilage sont bien réels. Les stratégies de culture et de récolte doivent être adaptées pour réduire ces volumes d'effluents. En présence de jus, ces derniers doivent être valorisés pour faire face aux enjeux techniques et limiter les impacts environnementaux..

Principe et caractéristiques

Lors du stockage par ensilage de plantes récoltées humides, d'importants volumes d'effluents liquides peuvent être produits. Leur abondance dépend principalement du taux de matières sèches (MS) de la plante lors de la récolte et sa valeur est fortement réduite à partir d'un taux de MS de 30%. Les CIVE ont fréquemment des taux de matière sèche inférieurs à 30%.

Le volume d'effluent produit peut être estimé à partir de cette humidité grâce aux méthodes de Bastiman (1986) et Sutter (1957) - (Figure 1). Il varie également selon la plante, la hauteur du silo, la densité de tassement et la finesse de hachage.

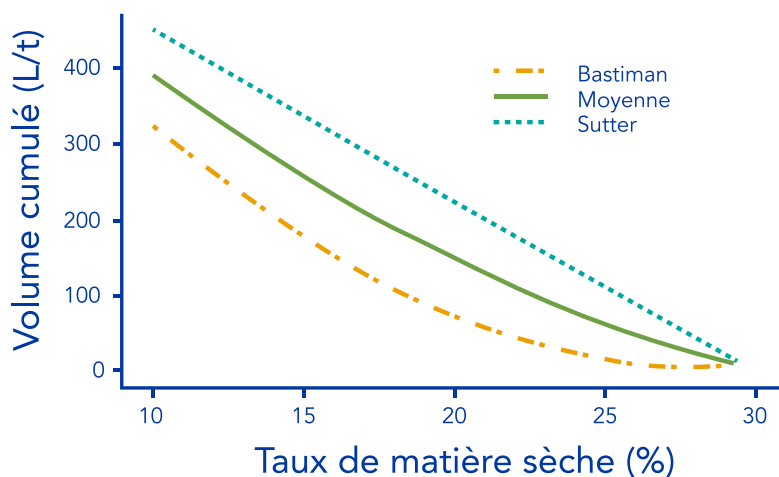
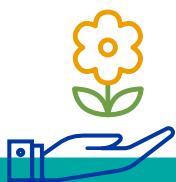


Figure 1: Estimation du volume de jus d'ensilage produit en fonction du taux de matières sèches de la récolte

Les jus de silos sont riches en composés organiques et minéraux et ont également des propriétés corrosives. En comparaison avec des lisiers, la concentration en matière organique des jus d'ensilage peut atteindre des valeurs 10 fois supérieures, et celle des différents éléments nutritifs (azote, phosphore et potassium) atteignent des valeurs similaires (Omafra, 2015).



- Le potentiel méthane des effluents peut varier entre 7 et 28 Nm³/m³.
- Si les jus ne sont pas collectés et valorisés de façon optimale, ils peuvent donc causer des pertes de potentiel méthanogène pouvant dépasser 10% du potentiel méthanogène de la récolte entière (Figure 2).
- Les jus peuvent aussi causer d'importantes pollutions des eaux de surfaces : **1 litre d'effluent (jus de silos) peut affecter gravement la vie aquatique dans 10 000 litres d'eau.**

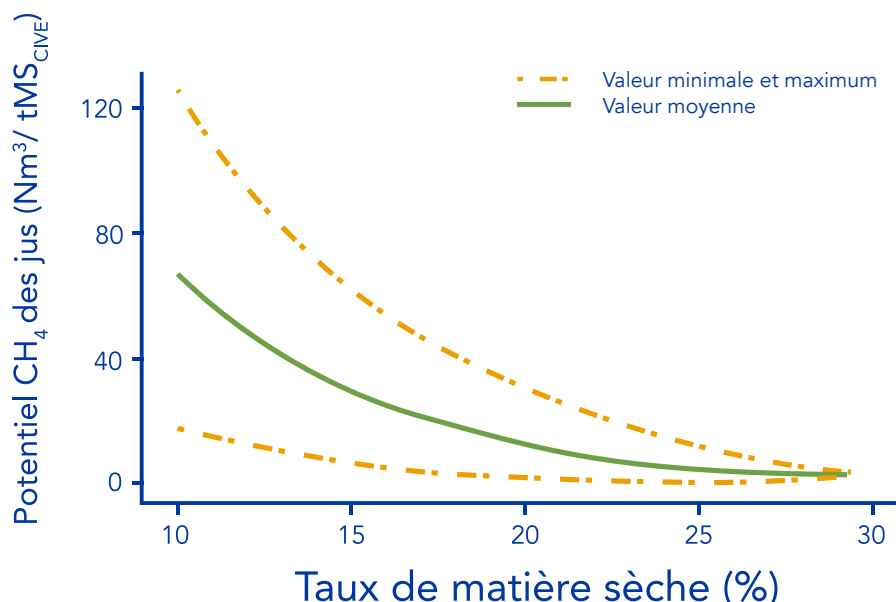


Figure 2 : Potentiel méthanogène des jus de silo rapporté à la quantité de CIVE ensilées (base matière sèche).

Pour un ensemble de silos de grande taille, les jus d'ensilage peuvent représenter un flux d'un potentiel équivalent à plusieurs dizaines de Nm³ CH₄ /h pendant les premières semaines après fermeture des silos. Essentiellement composés de matière organique très rapidement dégradable, ils pourraient également causer un déséquilibre et une acidification du digesteur.



Si de grands volumes d'effluents sont attendus, l'installation d'une fosse à effluent permettant de maîtriser leur incorporation dans le méthaniseur est nécessaire.

Éviter la production de jus

La production des jus d'ensilage peut être réduite grâce à des pratiques de récolte et de confection des silos. Selon le contexte, l'une ou l'autre peut être adoptée.

• • • CHOIX DU STADE DE MATURITÉ À LA RÉCOLTE

Chez de nombreuses espèces végétales exploitées en CIVE, le taux de matière sèche est intimement lié au stade de maturité de la plante. Le choix de variétés de CIVE à l'indice de précocité adapté au contexte de culture peut permettre de viser un stade de maturité et un taux de MS appropriés. Attendre le taux de MS optimal pour récolter peut cependant impliquer d'adapter son calendrier au rythme de développement de la CIVE, ce qui peut être incompatible avec la bonne conduite de la culture suivante.

• • • PRÉFANAGE

Le préfanage, consistant à faire sécher naturellement la biomasse au champ. **Pour être intéressant, sa durée ne doit pas excéder 48 heures car des pertes énergétiques ont lieu lors d'une exposition prolongée de la biomasse fauchée à l'air libre.**

Dans de bonnes conditions d'application et en présence d'une météo clémente, le préfanage permet de gagner rapidement plusieurs points de MS et ainsi de limiter voire d'éviter la formation d'effluents.





Être vigilant à la météo !

La mise en œuvre de l'ensilage par préfanage n'est intéressante que dans le cas où une fenêtre météorologique adaptée est attendue.

Si les conditions météorologiques ne sont pas optimales, un ensilage direct est préférable car le taux de MS idéal de 25 à 30% ne pourra pas être atteint dans les temps.

À l'inverse, il est également important de ne pas appliquer un préfanage trop intensif. Au-delà de 35% de MS, le tassement de l'ensilage sera rendu difficile ce qui pourra engendrer d'autres dégradations au cours du stockage (voir la fiche « dégradations aérobies »).

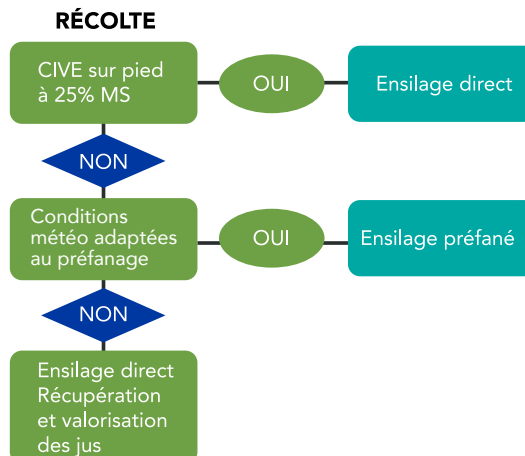
Le co-ensilage avec un substrat sec de type paille ou miscanthus a été étudié (Van Vlierberghe, 2022), il pourrait être une alternative au préfanage qui limite les chantiers de récolte et allonge les délais entre CIVE et culture suivante. Sa mise en œuvre pratique en silo reste à travailler.



L'ESSENTIEL pour maîtriser les jus de silos

Lors de l'ensilage des CIVE, d'importants volumes d'effluents d'ensilage peuvent être produits. Si des pratiques appropriées ne sont pas adoptées, ils peuvent être une source de pollution et de perte de potentiel méthanogène. La stratégie mise en place pour éviter la production de jus de silo dépend de facteurs liés à la conduite de culture (espèce cultivée, maturité à la récolte), des conditions de récolte (météo, date d'implantation de la culture suivante) et de la disponibilité ou non d'un substrat sec pouvant être co-ensilé avec la CIVE.

Selon ces paramètres, la pratique à adopter peut-être décidée (Figure 3).



DES CRITÈRES DE QUALITÉ D'ENSILAGE DIFFÉRENTS ENTRE ÉLEVAGE ET MÉTHANISATION

Principe et caractéristiques

La fermentation est l'étape clé sur laquelle repose tout le procédé de stockage par ensilage. Elle est réalisée par des bactéries en conditions anaérobies (sans oxygène) qui convertissent les sucres solubles de la plante en acides organiques. L'accumulation de ces acides permet de stopper le développement d'autres microorganismes qui pourraient dégrader la récolte pendant le stockage.

L'ensilage est une méthode de conservation issue de l'élevage. Sa qualité est généralement évaluée selon ses caractéristiques de fermentation : pH compris entre 3,8 et 4,5 selon la teneur en matière sèche, teneur élevée en acide lactique, concentration en autres acides basse (acide acétique, acide butyrique, acide propionique). On considère généralement comme « désirables » les fermentations produisant principalement de l'acide lactique (homolactique) et n'entraînant pas ou peu de pertes de masse.

Cependant, d'autres fermentations produisant d'autres acide (fermentation hétérolactique, acétique, butyrique...) induisent des productions de gaz (CO_2 et H_2) à l'origine de pertes de masse. Ces pertes de masse ne sont généralement pas ou peu accompagnées de pertes énergétiques.

Ainsi, la production de CO_2 lors de la fermentation entraîne des pertes de masse qui ne sont pas synonymes de pertes énergétiques puisque le potentiel énergétique de la molécule de CO_2 est nul. Le potentiel méthanogène est alors concentré dans la matière restante sous forme d'acides organiques.



Plus de 20% de la masse sèche du silo peut être perdue lors de l'étape de fermentation sans que cela n'impacte significativement le potentiel méthanogène global.

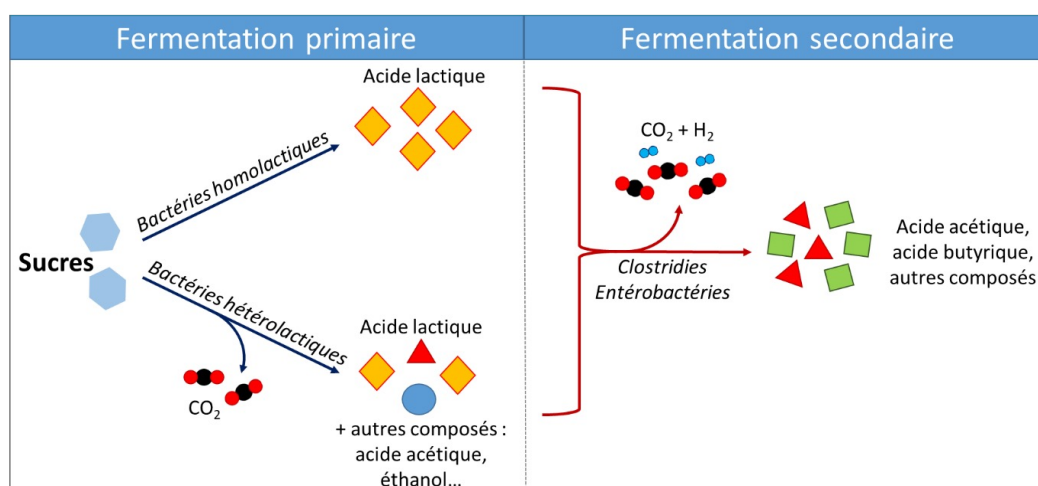


Figure 1 : Schéma simplifié de la fermentation d'ensilage

Associée majoritairement à la fermentation butyrique, la production d'hydrogène (H_2) a un effet tout à fait inverse sur les bilans massiques et énergétiques. La production de cette molécule très petite et très légère n'engendre quasiment aucune perte de masse. En revanche, l'hydrogène est très dense énergétiquement et sa production en grande quantité lors de la fermentation secondaire pourrait engendrer des pertes énergétiques conséquentes à l'échelle du silo.

Heureusement, la production de H₂ lors de la fermentation est faible et ne représente que quelques pourcents du potentiel énergétique global.

Des résultats expérimentaux confirment ces prévisions théoriques. La Figure 2 présente la variation de BMP (biochemical methane potential ou pouvoir méthanogène) au cours de la fermentation d'ensilage en fonction des pertes de masse ayant lieu lors de cette étape pour 52 expériences de stockage. Elle montre que les pertes de masses liées à la fermentation ne causent pas de pertes de BMP. Les variations de BMP observées sont limitées (généralement +/-10%) ce qui correspond approximativement à la précision du test de mesure de BMP.

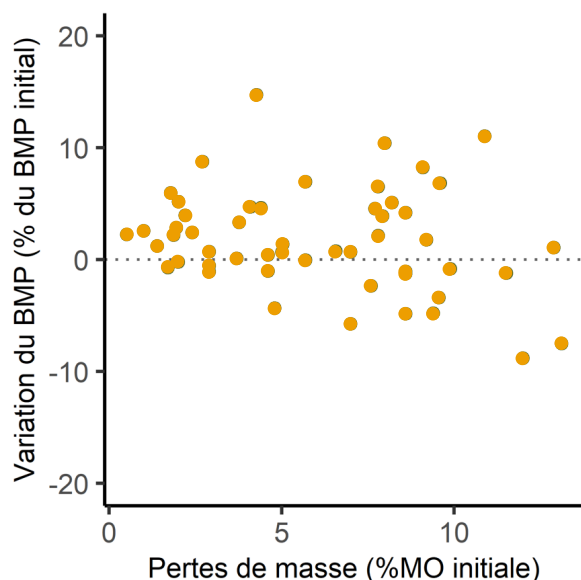


Figure 2 : Variation du BMP au cours de la fermentation d'ensilage en fonction des pertes de masse.

MO = Matière Organique.



L'ESSENTIEL sur les fermentations d'ensilage

En l'état actuel des connaissances, bien que la plupart des bonnes pratiques d'ensilage soient valables pour un usage en fourrage comme en méthanisation, il apparaît que le processus de méthanisation soit moins « sensible » à certains facteurs tels que :

- l'humidité à l'entrée du silo
- un pH final élevé (supérieur à 4,5)
- ou encore la présence de bactéries et d'acides butyriques.

On peut donc conclure que les transformations de l'ensilage ayant lieu en l'absence d'oxygène (au sein d'un silo bien fermé) impactent peu la préservation du potentiel méthanogène.

En effet l'étape de fermentation n'entraîne généralement pas de pertes énergétiques, à condition que les conditions anaérobies soient maintenues et la question de l'appétence ou de l'ingestibilité par les animaux ne se posent pas pour la méthanisation.

En revanche la nature des acides produits peut avoir une influence sur la stabilité aérobie de l'ensilage lors de l'ouverture du silo. La présence d'acide butyrique peut également causer des nuisances olfactives.

Des additifs d'ensilage peuvent être utilisés pour diriger la fermentation et favoriser la présence de certains acides en fin de stockage.

Cet enjeu est abordé dans la fiche « les dégradations aérobies ».

LES DÉGRADATIONS AÉROBIES DE L'ENSILAGE

PRINCIPE ET CARACTÉRISTIQUES

Le contact de l'ensilage avec l'air est à limiter autant que possible. Un bon ensilage est obtenu dans de bonnes conditions anaérobies, d'étanchéité à l'air. Lorsque de l'oxygène entre dans le système, des conditions aérobies sont remises en place et l'équilibre est rompu. Le développement microbien est alors rapide et cause des pertes de masse sous forme de CO₂ et des pertes énergétiques sous forme de chaleur.

Ces conditions d'exposition à l'air ont majoritairement lieu à la récolte, de la fauche jusqu'à la fermeture du silo, et lors de son ouverture. Dans le cas où la fermeture du silo n'est pas idéale, l'air peut également pénétrer au cours du stockage et causer d'importantes dégradations. A chaque étape, des pratiques peuvent être mises en place pour les limiter.

VOIES DE DÉGRADATION PRINCIPALES ET BONNES PRATIQUES

1

Récolte et remplissage du silo

- La durée d'exposition à l'air doit être limitée au maximum durant la récolte.
- Le recours à un préfanage prolongé (plus de 48 h) doit être évité.
- Les silos doivent être remplis rapidement.



POINT DE VIGILANCE

La rapidité de remplissage du silo ne doit cependant pas être obtenue au détriment du compactage (tassage). En effet celui-ci va conditionner la résistance du silo à la pénétration de l'air durant toute la durée du stockage ainsi que lors de l'ouverture. La valeur cible de la densité de tassement dépend du taux de matière sèche de la plante à ensiler (Figure 1) car la combinaison des deux définit la porosité du silo.

Si la densité cible est facilement atteinte pour les plantes humides, le tassement des récoltes plus sèches est difficile. Aux alentours de 35% de matière sèche, la densité idéale est difficile à atteindre, et devient même inatteignable au-delà de 40%. Pour permettre un tassement adéquat, la finesse et la régularité de hachage sont des paramètres importants.

Les morceaux de plus de 20 mm sont à éviter.

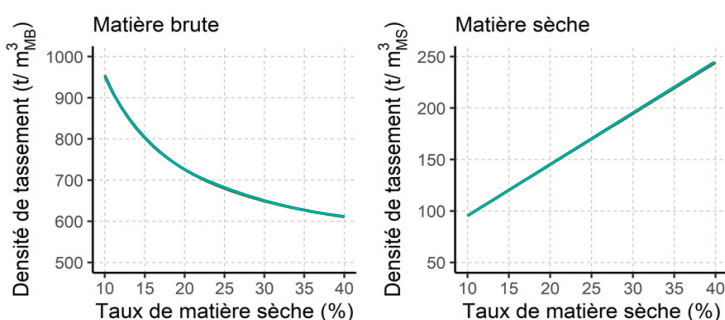


Figure 1 : Densité de tassement cible de l'ensilage en fonction du taux de MS de la récolte, adapté de Kaiser et al (2004)

2

Fermeture du silo

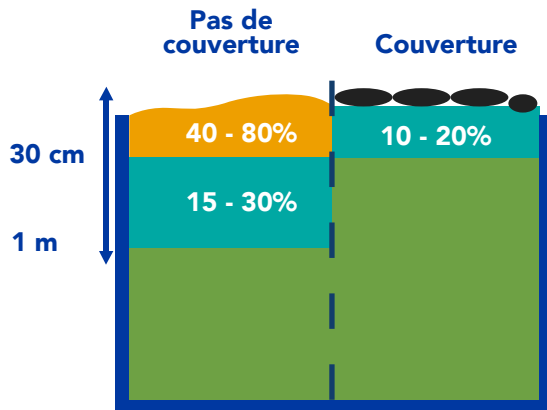


Figure 2 : Pertes de MS ou pertes de BMP causées par les dégradations aérobies en présence ou absence de couverture. Adapté de Kaiser et al. (2004)

- L'herméticité de fermeture du silo a un impact crucial sur les dégradations liées au contact avec l'air durant le stockage.
- Une bonne couverture associée à un tassement correct permet de limiter les pertes à quelques pourcentages. En revanche, si la couverture n'est pas efficace ou absente, les pertes de potentiel méthanogène peuvent être élevées.
- Les couches du silo les plus exposées situées sur les faces extérieures peuvent subir des pertes de potentiel **méthanogène jusque 80 % après seulement 3 mois de stockage** (Figure 2).

Les pertes totales peuvent atteindre 30% de l'ensemble du silo. Si le tassement du silo n'est pas suffisant, cet effet est amplifié puisque l'oxygène pénètre à une profondeur plus importante au sein du silo. Ainsi, une importante fraction du silo peut être dégradée.

- La couverture est traditionnellement réalisée avec des bâches en matière plastique plaquées par des boudins. Leur emploi permet de sceller efficacement les silos mais il est remis en question par le coût et l'impact environnemental des bâches. Des alternatives aux bâches plastiques existent : par exemple, elles utilisent des semis de céréales ou des sous-produits agro-alimentaires. Ces techniques permettent de diminuer la consommation de matière plastique mais leur impact sur la préservation du potentiel méthanogène à l'échelle du silo est encore peu quantifié et les éléments disponibles à ce jour laissent entrevoir des pertes quantitatives et énergétiques importantes rendant les alternatives économiquement contre-performantes.

3

Ouverture du silo et gestion du front d'attaque

Lorsque le silo est ouvert pour prélever l'ensilage, l'air peut facilement pénétrer par le front d'attaque, causant échauffement et pertes énergétiques. Les dégradations sont rapides. Après 2 jours d'exposition, les couches superficielles peuvent avoir perdu 20% de leur potentiel méthanogène (BMP) initial, en particulier en conditions chaudes.

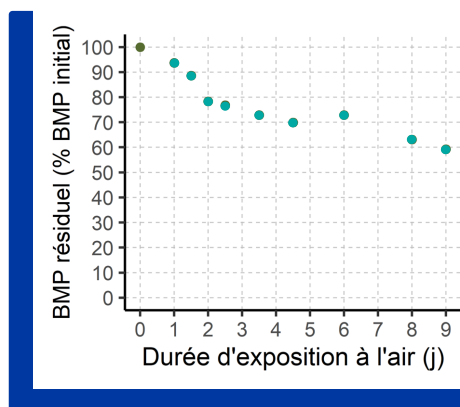


Figure 3 : Cinétique de dégradation de l'ensilage mis en contact avec l'air (Zhang et al., 2018)



La vitesse d'avance minimale de consommation du silo doit être de l'ordre de 15 cm/j en hiver sont recommandées alors que des valeurs de 25 à 30 cm/j sont préférables en été (Figure 4). Ces indications sont à ajuster en fonction de la densité de tassement : si l'ensilage n'a pu être tassé de façon optimale, la pénétration de l'air est supérieure et la vitesse d'avance doit être augmentée.

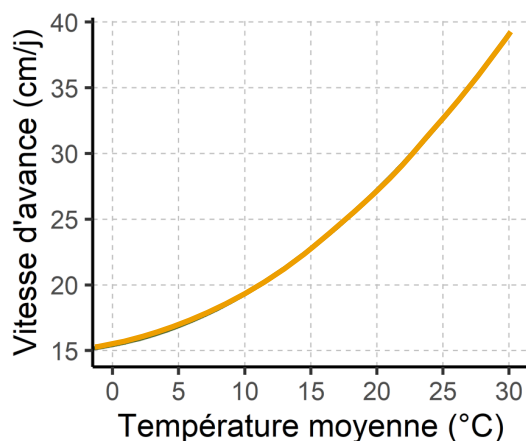


Figure 4 : Vitesse d'avance du front d'attaque recommandée en fonction de la température ambiante (Borreani et al., 2018)

Afin de pouvoir respecter la cible de vitesse d'avance du front d'attaque, le dimensionnement des silos doit être prévu en conséquence.



Les silos « étroits et longs » permettant des vitesses d'avancement plus élevées sont donc préférables aux silos « larges et courts ».

La stabilité aérobie de l'ensilage (autrement dit sa capacité à résister à l'échauffement et aux dégradations lors du contact avec l'air) dépend également des propriétés physiques et chimiques (Tableau 1). Les acides propioniques, acétiques et butyriques sont les plus efficaces pour ralentir la croissance des microorganismes aérobies. La présence d'acide lactique permet d'obtenir un pH bas mais ce composé est facilement consommé par les levures et moisissures. La présence d'un autre acide en plus de l'acide lactique est donc préférable. Les plantes humides sont également plus résistantes aux dégradations aérobies et plus susceptibles de permettre la production naturelle d'acides lactique, propionique et butyrique.



Tableau 1 : Effet de plusieurs paramètres chimiques sur la stabilité anaérobie.

STABILITÉ AÉROBIE	ÉLEVÉ	BAS
Taux de MS	Défavorable	Favorable
pH	Défavorable	Favorable
Acide lactique	—	—
Acide acétique	Favorable	Défavorable
Acide propionique	Favorable	Défavorable
Acide butyrique	Favorable	Défavorable
Rapport acide lactique / autres acides	Défavorable	Favorable
Sucres solubles	Défavorable	Favorable

Des additifs d'ensilage peuvent permettre d'orienter la fermentation d'ensilage vers la production d'acides comme l'acide acétique et ainsi d'augmenter la stabilité aérobie. L'ajout de starter contenant des bactéries hétérolactiques comme *L. buchneri* permet d'obtenir un rapport lactique/acétique réduit et une stabilité aérobie augmentée. Au contraire, l'ajout de starter homolactiques qui produisent surtout de l'acide lactique a tendance à réduire la stabilité aérobie.



PRINCIPAUX LEVIERS POUR MAÎTRISER LES DÉGRADATIONS AÉROBIES

Les dégradations aérobies sont la première source de perte de potentiel méthanogène lors du stockage des CIVE. Si des pratiques d'ensilage particulières ne sont pas adoptées, elles peuvent entraîner des pertes cumulées de près de la moitié du potentiel initial. Le contact avec l'air est donc à limiter au maximum. Les 3 principaux leviers permettant de réduire les pertes sont :

- La couverture efficace
- Le dimensionnement adéquat des silos
- La bonne gestion du front d'attaque

L'emploi d'additifs comme des inoculants de bactéries hétérolactiques peut permettre de réduire davantage les dégradations mais ne peut en aucun cas compenser des pratiques de gestion du silo inappropriées.