

RAPPORT D'ETUDE

Evaluation des émissions gazeuses au stockage des digestats agricoles dans le contexte de l'Île-de-France et impact des différentes stratégies de gestion.

Synthèse des résultats de l'étude et principales conclusions

Auteurs : R. Girault, N. Auvinet, S. Générmont, F. Guiziou, A.S. Lissy, G. Nunes, AC. Santellani, T. Ramananjatovo, M. Sarrazin, A. Vallet, M. Vieira Firmino Silva

Etude réalisée par Inrae et cofinancée par : Ademe Île-de-France, GRDF, GRTgaz et Inrae

Janvier
2025



SOMMAIRE

1. CARACTERISATION DES DIGESTATS AGRICOLES PRODUITS EN ÎLE-DE-FRANCE ET DES RISQUES D'EMISSIONS VERS L'AIR AU STOCKAGE ASSOCIES	5
2. EMISSIONS VERS L'AIR GENEREES PAR LE STOCKAGE DES DIGESTATS D'UNE UNITE DE METHANISATION D'ÎLE-DE-FRANCE	8
3. EFFET COMBINE DES PRATIQUES DE METHANISATION, DE STOCKAGE ET D'EPANDAGE SUR LES EMISSIONS VERS L'AIR LIEES A LA GESTION DES DIGESTAT DANS LE CONTEXTE DES UNITES DE METHANISATION AGRICOLES D'ÎLE-DE-FRANCE.....	10
4. ANALYSES DES BENEFICES ET POINTS DE VIGILANCE DES EVOLUTIONS DE PRATIQUES ETUDIEES	16
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES	17

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les agriculteurs méthaniseurs qui ont participé à l'étude en permettant le partage de leurs données, les prélèvements de digestats et les suivis d'émissions réalisés *in situ*.

Les auteurs remercient les membres du comité de suivi de cette étude :

- Séverine Ducottet (Région Île-de-France)
- Jean-François Delaître et Alexis Lepeu (Energies Vertes Franciliennes)
- Jérôme Gilliet (GRTGaz)
- Carine Mallier et Lionel Boursaud (ARTAIM)
- Garance Petit (Ademe Île-de-France)
- Bastien Praz (GRDF)
- Solange Robert (GRCETA)

Une partie des résultats présentés dans ce rapport (émissions au laboratoire et simulées à l'épandage) ont été acquis au travers d'une prestation réalisée par Inrae Transfert – Méthys.

CITATION DE CE RAPPORT

R. Girault, N. Auvinet, S. Générmont, F. Guiziou, AS Lissy, G. Nunes, AC. Santellani, T. Ramananjatovo, M. Sarrazin, A. Vallet., M. Vieira Firmino Silva 2025. **Evaluation des émissions gazeuses au stockage des digestats agricoles dans le contexte de l'Île-de-France et impact des différentes stratégies de gestion. – Synthèse des principaux résultats.** 16 pages.

FINANCEMENT DE L'ETUDE

Cette étude (CRUST) a été conduite sur 3 années et a été financée par l'Ademe Ile-France (124 018€), GRDF (50 000€) et GRTGaz (25 000€). Ces financements ont été complétés avec une part d'autofinancement Inrae (111 470€).

Les filières de méthanisation agricoles d'Île-de-France présentent deux principales spécificités qui ont conduit à la réalisation de cette étude :

- La plupart des unités de méthanisation sont connectées à des systèmes agricoles en grandes cultures et méthanisent un gisement constitué majoritairement d'ensilages de cultures intermédiaires et de pulpes de betteraves, complémenté ou non par des déchets organiques du territoire (soupe de biodéchets, déchets de pomme de terre...).
- La plupart des installations stockent leurs digestats dans différentes lagunes de stockage non couvertes. Certaines unités sont équipées de stockages en cuves couvertes pour en général une partie de leur capacité totale, qui peuvent être avec ou sans récupération du biogaz résiduel produit. Les stockages en lagunes non-couvertes peuvent cependant présenter des phénomènes de croûtage de surface spontanés pouvant impacter les émissions vers l'air.

La gestion de ces digestats peut générer des émissions vers l'air au stockage et à l'épandage. L'étude s'est intéressée à 3 catégories d'émissions vers l'air :

- Les émissions d'ammoniac qui constituent le principal risque de perte d'azote dans le système d'agri-méthanisation et ont un impact sur la qualité de l'air (précurseur de particules fines notamment, en particulier pour les pics de pollution aux particules printaniers).
- Les émissions de méthane résiduelles au stockage des digestats, qui ont un impact sur le bilan « gaz à effet de serre » des filières (pouvoir réchauffant global du méthane égale à 28 fois celui du CO₂ à 100 ans) et sur les performances économiques des installations (potentiel de production de méthane non valorisé).
- Les émissions de protoxyde d'azote qui peuvent survenir au cours du stockage (stockages avec croûtes en particulier) et au retour au sol des digestats. Ces dernières ont un impact sur le bilan « gaz à effet de serre » des filières de méthanisation. Ces émissions ont été appréhendées uniquement au stockage dans le cadre de cette étude.

Emissions de méthane et d'ammoniac au stockage : deux processus très différents.

Ammoniac

Les émissions d'ammoniac sont un phénomène physico-chimique se produisant à la surface du digestat en contact avec l'air (phénomène surfacique). Elles sont impactées par les caractéristiques du digestat (pH, teneur en azote ammoniacal...), les conditions climatiques (température, vent...) et les conditions de stockage (surface exposée à l'air ambiant, taux de couverture des stockages (avec ou sans récupération de biogaz), présence de croûte...).

Au-delà du stockage des digestats, les émissions d'ammoniac sont également rencontrées lors de leur épandage mais aussi lors de l'utilisation des fertilisants minéraux (urée et solution azotée en particulier) sur les cultures.

Méthane

Les émissions de méthane sont principalement un phénomène biologique se produisant sur l'ensemble du volume de digestat stocké (phénomène volumique). Elles sont impactées par la matière organique biodégradable restant après méthanisation (concentration et caractéristiques), le volume stocké, les conditions de stockage pouvant impacter la réaction biologique (température, vent...) et le taux de couverture des stockages avec récupération de biogaz (les couvertures sans récupération du biogaz n'ont pas d'impact significatif sur les émissions de méthane).

Dans ce contexte, les objectifs de l'étude étaient :

- **D'évaluer les émissions gazeuses générées par les filières de stockage des digestats dans le contexte des typologies d'installations de méthanisation agricole présentes en Île-de-France**
- **D'évaluer l'effet des pratiques de méthanisation sur les risques d'émissions au stockage dans le contexte de l'Île-de-France**
- **D'évaluer l'effet de scénarios combinant pratiques de stockage et d'épandage sur les émissions gazeuses générées par la gestion des digestats et d'identifier les stratégies les moins impactantes (uniquement pour l'ammoniac et le méthane).**

Les principaux résultats de l'étude sont synthétisés dans les paragraphes suivants.

1. Caractérisation des digestats agricoles produits en Île-de-France et des risques d'émissions vers l'air au stockage associés

Préambule méthodologique : Les résultats synthétisés dans cette partie sont issus d'analyses et d'expérimentations de laboratoire sur des digestats prélevés de façon ponctuelle dans 12 installations de méthanisation dont les caractéristiques en terme de substrats et de process de méthanisation ont été définies dans l'objectif d'être représentatifs de la quarantaine d'installations agricoles que comptait l'Île-de-France au moment de l'étude. Une sélection de 6 de ces digestats a également fait l'objet d'expérimentations sur des pilotes de stockage de 1m³ afin de représenter au mieux les processus en œuvre au sein des lagunes de stockage à une échelle expérimentale (voir Figure 1). 4 de ces installations ont fait l'objet de 2 prélèvements afin d'apprécier la variabilité temporelle des caractéristiques des digestats. Les résultats présentés étant des indicateurs de laboratoire, ils ne peuvent pas être considérés comme une prédiction directe des émissions réelles des installations. Ils peuvent cependant être utilisés pour évaluer de façon qualitative l'effet des caractéristiques des méthaniseurs sur les risques d'émission.



Figure 1: Pilotes de stockage de 1m³ utilisés pour représenter les stockages en lagune à une échelle expérimentale (cuve isolée pour représenter l'effet du sol et équipée d'un dispositif de suivi des émissions vers l'air (chambre dynamique)).

Le tableau suivant synthétise les résultats de caractérisation obtenus sur les 12 digestat bruts qui ont fait l'objet de caractérisation dans le cadre de l'étude (intervalle interquartile comprenant 50% des digestats caractérisés).

Paramètre	Intervalle interquartile comprenant les 50% médians des digestats caractérisés	Effet des caractéristiques de la filière de méthanisation
Teneur en matières sèches	67-82 g/kg _{matière_brute}	Non identifié
Teneur en matières organiques	43-60 g/kg _{matière_brute}	Non identifié
Teneur en azote total	4,5-5,5 gN/ kg _{matière_brute}	Non identifié
Teneur en azote ammoniacal	2,2-3 g _{NH4+} /kg _{matière_brute}	Le taux de minéralisation de l'azote augmente significativement avec le temps de séjour des matières des installations. Ce qui impacte d'une part le risque de volatilisation (l'azote ammoniacal étant la forme disponible pour la volatilisation) et d'autre part la proportion de l'azote du digestat disponible pour la culture de l'année de l'épandage.
Taux de minéralisation de l'azote (azote ammoniacal/azote total)	45-55%	
pH	7,9-8,1	Le pH augmente significativement avec le temps de séjour des matières. Une augmentation du pH a tendance à augmenter le risque de perte d'azote par volatilisation.

Tableau 1: Synthèse des caractéristiques des digestats bruts analysés dans le cadre de l'étude en sortie de méthaniseur (avant stockage).

Les risques d'émission de méthane au stockage ont été caractérisés sur les différents digestats au travers d'analyses de potentiels méthanogènes résiduels (potentiel de production de méthane restant après l'étape de digestion mésophile (1 ou plusieurs digesteurs) ainsi que des expérimentations de stockage sur des pilotes de 1m³.

Comme le montre la Figure 2, des variations importantes des potentiels méthanogènes résiduels ont été observées sur les digestats bruts prélevés après l'étape de digestion mésophile.

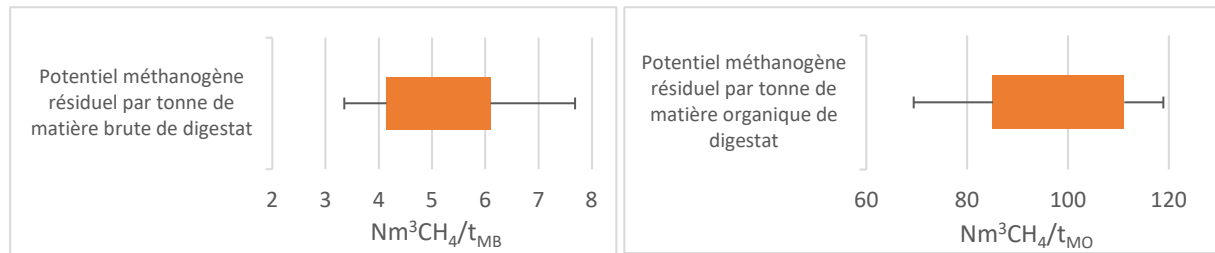


Figure 2 : Potentiels méthanogènes résiduels obtenus sur les digestats prélevés sur les 11 sites de méthanisation

Les essais de stockage sur pilotes ont montré que, en fonction des digestats, 20 à 50% de ce risque d'émission est produit dans le cadre d'un stockage d'une durée supérieure à 5 mois.

Deux caractéristiques des filières de méthanisation ont été identifiées comme impactant significativement le risque d'émission de méthane au stockage :

- Le temps de séjour des matières en conditions mésophiles (Figure 3). En particulier une augmentation importante du potentiel de production de méthane restant dans le digestat est observée pour des temps de séjours en dessous d'une valeur pivot située entre 80 et 100 jours. Les points avec un temps de séjour des matières inférieur à 80 jours correspondent à des installations équipées en aval d'une cuve de stockage des digestats non-chauffée couverte avec récupération du biogaz dont l'effet a été appréhendé spécifiquement par la suite. La Figure 3 représente séparément les digestats sans séparation de phase (digestats bruts) et ceux issus d'installations pratiquant une séparation de phase partielle de leur digestat couplée à une recirculation de la phase liquide obtenue dans le digesteur pour y maintenir des conditions liquides (« recirculation phase liquide »).

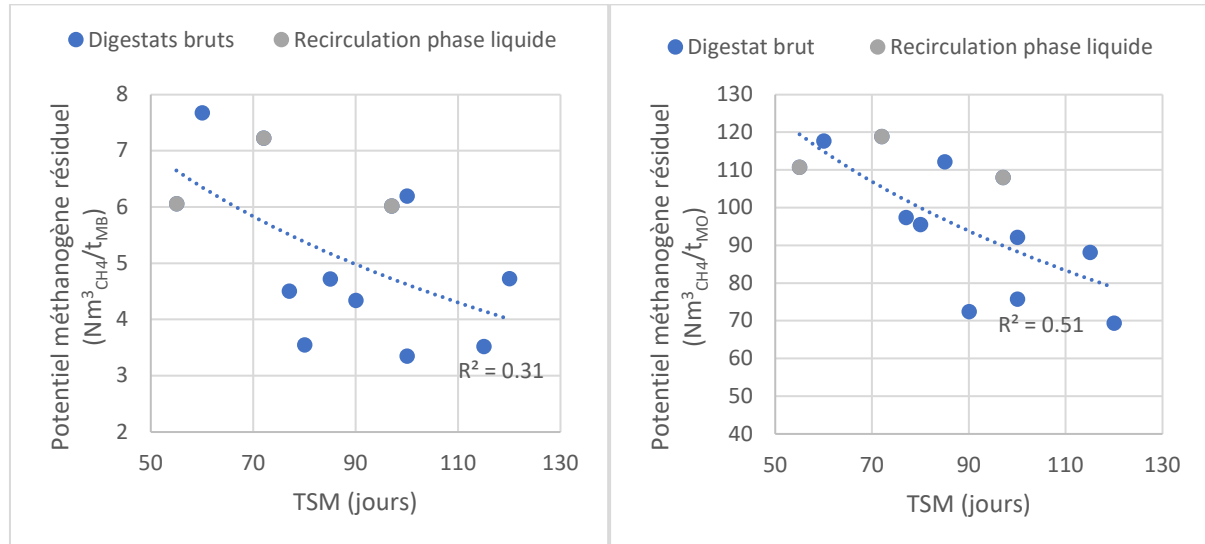


Figure 3 : Potentiels méthanogènes résiduels observés sur les 12 digestats prélevés (à gauche : par rapport à la matière brute ; à droite : par rapport à la matière organique) en fonction du temps de séjour des matières des installations en conditions mésophiles (courbes de tendance logarithmiques).

- La présence après les étapes de digestion mésophiles d'une cuve de stockage tampon couverte avec récupération du biogaz. Selon les installations considérées, cette cuve peut avoir une capacité de 1,5 à 2,5 mois et n'est pas chauffée. Une fois cette cuve pleine, le digestat est soit épandu directement, soit transféré vers des stockages déportés (en lagune en général dans le contexte de l'île-de-France). La présence d'une telle cuve permet de réduire de 40 à 50% le potentiel de production de méthane résiduel du digestat (gamme obtenue sur seulement 2 sites).

Les risques de pertes d'azote ammoniacal par volatilisation ont été quantifiés au travers d'expérimentations de stockage sur des pilotes de 1m³ de 6 mois à 1 an sans couverture. Les résultats de ces mesures représentent donc un potentiel maximal d'émission et peuvent être utilisés pour comparer les digestats entre eux mais ne peuvent pas être directement extrapolés aux émissions réelles d'un site, du fait de la variabilité annuelle des durées de stockage notamment. Trois catégories de comportements ont été observées :

- 2 digestats sur 6 ont produit des croûtes robustes et pérennes au bout de quelques semaines de stockage. Pour ces digestats, les pertes par volatilisation représentent $19 \pm 3\%$ de l'azote total du digestat en sortie de digestion.
- 2 digestats sur 6 ont produit des croûtes intermittentes (alternance de périodes avec présence et absence de croûte)
- 2 digestats sur 6 n'ont pas généré de croûte significative au cours de stockage
 - ⇒ Pour ces deux dernières catégories, les pertes par volatilisation représentent $28 \pm 4\%$ de l'azote total du digestat en sortie de digestion.

Sur la base de ces résultats, les digestats générant une croûte robuste au stockage ont conduit à des niveaux de perte par volatilisation environ 35% inférieurs à ceux ne présentant pas de croûtage ou un croûtage intermittent. Cependant, l'impact de la présence de croûte sur les émissions est limité par :

- Son caractère progressif (il faut plusieurs semaines pour qu'une croûte suffisamment robuste pour bloquer les émissions d'ammoniac se constitue, pendant lesquelles des émissions importantes peuvent être observées)
- Son caractère aléatoire (croûtes observées que sur une partie des digestats).
- Son absence (sauf exception) sur les lagunes de stockage tampon du fait des brassages réguliers avant transfert ou épandage.

Aucun lien significatif entre les émissions de méthane constatées et la présence croûte n'a été mis en évidence, ce processus biologique se produisant au sein du volume de digestat stocké et n'étant pas impacté par les croûtes ou les couvertures non munies d'un dispositif de récupération du biogaz produit.

Il n'a pas pu être identifié de lien significatif entre les risques de pertes par volatilisation et les caractéristiques des unités de méthanisation au regard du panel de digestats prélevés.

Un résumé des principaux facteurs dont l'impact a été investigué sur les risques d'émission de méthane et d'ammoniac est proposé dans le tableau suivant.

Paramètre	Effet sur le potentiel méthanogène résiduel	Effet sur le potentiel d'émission d'ammoniac
Temps de séjour des matières (TSM)	Premier déterminant identifié des émissions de méthane résiduelles. Forte augmentation pour des TSM inférieurs à 80-100 jours	Pas identifiable directement L'augmentation du TSM rend le taux d'azote minéralisé et le pH plus élevés, ce qui peut contribuer à augmenter le risque de volatilisation
Séparation de phase avant stockage	Non évalué seul	Pas d'effet significatif (1 seul point)
Filière avec monodigesteur, séparation de phase et recirculation du digestat	Pas d'effet significatif à TSM constant	<i>Pas d'effet significatif (filières dans la gamme basse des valeurs)</i>
Broyage des intrants	Pas identifiable	Pas identifiable
Présence de biodéchets dans les intrants	Pas identifiable (dans le cadre des ratios présents dans le panel)	Pas identifiable (dans le cadre des ratios présents dans le panel)
Cuve de stockage tampon non chauffée avec récupération du biogaz	Observation de -40 à -49% de potentiel méthanogène résiduel (-57% si couplé à une séparation de phase)	Non évalué

Tableau 2: Synthèse des effets des paramètres de méthanisation sur les émissions de méthane et d'ammoniac au stockage.

2. Emissions vers l'air générées par le stockage des digestats d'une unité de méthanisation d'Île-de-France

Préambule méthodologique : Le présent paragraphe propose une synthèse des résultats du bilan d'émissions effectué sur un site d'Île-de-France dans le cadre d'un suivi d'un an. Ce dernier méthanise principalement des ensilages de cultures et de pulpes de betterave ainsi que de la soupe de biodéchets. Le temps de séjours y est de 115 jours (gamme haute des temps de séjour des matières rencontrés en Île-De-France). Il est équipé de deux types d'infrastructure de stockage :

- Une lagune de stockage tampon sur le site de méthanisation. Le digestat vient directement du post-digesteur. Il est ensuite soit directement épandu, soit transféré vers des stockages déportés.
- Deux lagunes de stockage déportées éloignées du site. Le digestat qui y est transféré ponctuellement est stocké avant épandage.



Figure 4: Photographie du dispositif de mesure des émissions gazeuses positionné sur une lagune de stockage des digestats.

Les données obtenues *in situ* sur ce site ne sont pas directement transposables à l'ensemble des unités agricoles d'Île-de-France. Des extrapolations sont proposées à l'aide d'un outil de prédiction développé dans le cadre de l'étude (et validé sur le suivi *in situ* réalisé) afin de relativiser ces données au regard de la diversité des installations de méthanisation agricoles d'Île-de-France. Cependant, ces prédictions doivent être interprétées comme des tendances et ne peuvent se substituer à l'acquisition de données réelles.

2.1. Emissions d'ammoniac par volatilisation

Une émission moyenne annuelle d'ammoniac au stockage des digestats de $14\pm 6\%$ de l'azote total du digestat a été estimée sur le site ayant fait l'objet d'un suivi *in-situ*. Ce niveau d'émission représente $25\pm 10\%$ de l'azote ammoniacal initialement présent dans le digestat en sortie de post-digesteur ce qui est dans la gamme des données disponibles dans la littérature sur des digestats issus en majorité d'effluents d'élevage (entre 24 et 42% de l'azote ammoniacal volatilisé).

Ces émissions sont concentrées sur la lagune tampon (64% des pertes) et sur la période allant du milieu du printemps au début de l'automne (78% des émissions entre avril et octobre).

Si on considère la variabilité des digestats ayant fait l'objet de prélèvements en Île-de-France et des durées de stockages identiques à celle du site suivi, l'outil de simulation développé dans le cadre de l'étude permet d'estimer que les émissions moyennes annuelles varient entre 13 et 24% de l'azote total du digestat en sortie de méthaniseur, dans le cadre de stockages en lagunes non couvertes (tampon sur site + déportées).

Au-delà des impacts en terme de qualité de l'air, ces pertes induisent une diminution de l'azote du digestat rapidement disponible pour la fertilisation (azote ammoniacal principalement). Cependant ce phénomène est partiellement compensé par une minéralisation de l'azote organique du digestat lors du stockage qui alimente le pool d'azote ammoniacal de ce dernier et qui peut compenser de près de 50% des pertes d'azote disponible liées à la volatilisation (ordre de grandeur observé sur le panel de digestats prélevés en partie 1).

2.2. Emissions de méthane résiduelles

Une émission moyenne annuelle de méthane au stockage des digestats de $1,9\pm 0,6\%$ de la production de biométhane de l'installation a été estimée sur le site suivi. Ce niveau d'émission est cohérent avec les résultats issus d'études antérieures pour des installations présentant des temps de séjour des matières de 100 jours et plus (voir Figure 5).

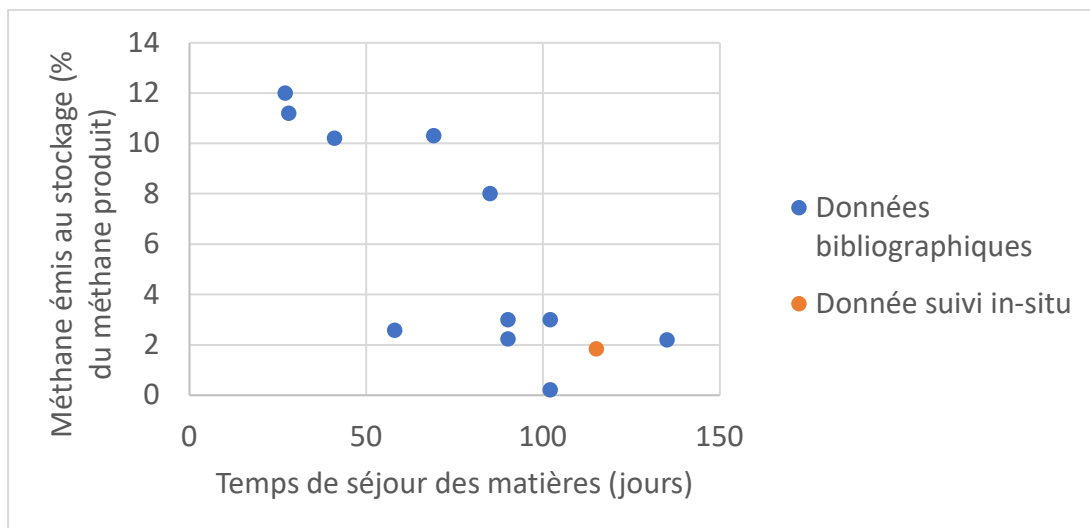


Figure 5: Comparaison de l'émission moyenne observée in-situ dans le cadre de l'étude et des données bibliographiques disponibles.

54% de cette émission est concentrée sur la lagune tampon, qui représente en moyenne les 1,5 premiers mois de stockage.

Ces mesures et les outils de simulation numérique développés dans le cadre de l'étude ont permis d'estimer les niveaux d'émission de méthane au stockage dans le cas particulier des typologies de conception rencontrées en Île-de-France (sur la

base des unités ayant fait l'objet de prélèvements dans le cadre de cette étude, et en considérant une logistique de gestion des digestats identique à celle du site ayant fait l'objet du suivi) :

- Pour les unités non équipées de stockage avec récupération du biogaz : Temps de séjour des matières moyen 96 jours (entre 70 et 115 jours) – Emission de méthane au stockage entre 1,4 et 3,3% de la production de méthane (moyenne d'environ 2%).
- Pour les unités équipées d'une couverture avec récupération du biogaz sur la première cuve de stockage (stockage tampon) : Temps de séjour des matières moyen de 72 jours en conditions mésophiles (entre 60 et 85 jours) – Emission de méthane au stockage entre 0,4 et 2,2% de la production de méthane (moyenne vers 1%).

2.3. Emissions de protoxyde d'azote

Des émissions significatives de protoxyde d'azote ont été observées uniquement dans les situations de stockage avec croûtes. L'impact de ces émissions sur le bilan gaz à effet de serre des installations est cependant plus de 6 fois inférieur à celui des émissions de méthane au stockage.

+

3. Effet combiné des pratiques de méthanisation, de stockage et d'épandage sur les émissions vers l'air liées à la gestion des digestats dans le contexte des unités de méthanisation agricoles d'Île-de-France

Préambule méthodologique :

- *Emissions d'ammoniac* : Les données présentées dans cette partie sont issues de travaux de modélisation. Pour le stockage, un outil de prédiction développé dans le cadre de l'étude et validé sur le suivi *in-situ* a été utilisé. Pour l'épandage, le modèle Volt'Air a été utilisé et paramétré au regard du contexte de l'Île-de-France. Cependant, ce dernier n'est pas encore complètement validé sur les digestats et les résultats intégrant les émissions à l'épandage doivent donc être interprétés uniquement en terme de tendances.

- *Emission de méthane* : Des extrapolations basées sur les données du suivi *in-situ* et les résultats des analyses de laboratoire ont été réalisées. Aucun travail de modélisation propres au méthane n'étant prévu dans l'étude, les résultats présentés doivent être interprétés en terme de tendances et non de prédictions quantitatives.

Deux types de scénarios de gestion des digestats ont été comparés dans cette étude :

- Un scénario avec une capacité de stockage d'environ 6 mois et des épandages répartis de février à septembre (scénario dit « faible capacité de stockage »)
- Un scénario avec une capacité de stockage d'environ 12 mois et des épandages concentrés sur février, mars, avril, période à moindre risque de perte d'azote par volatilisation à l'épandage (scénario dit « forte capacité de stockage »).

3.1. Emissions de méthane au stockage

Deux principaux facteurs affectant les émissions de méthane résiduelles au stockage des digestats ont été identifiés et leur impact sur les niveaux d'émissions de méthane résiduel a pu être estimé, dans le contexte des systèmes de méthanisation agricole d'Île-de-France :

- Le Temps de Séjour des Matières en digestion mésophile (TSM)
- La présence ou non d'une première cuve de stockage non chauffée couverte avec récupération du biogaz (capacité entre 1,5 et 2,5 mois selon les sites, le digestat est ensuite soit directement épandu, soit transféré vers des stockages déportés)

Une estimation de l'impact croisé de ces deux paramètres avec les scénarios de gestion est présentée sur la Figure 6 (hypothèse d'une capacité de stockage tampon de 2,5 mois).

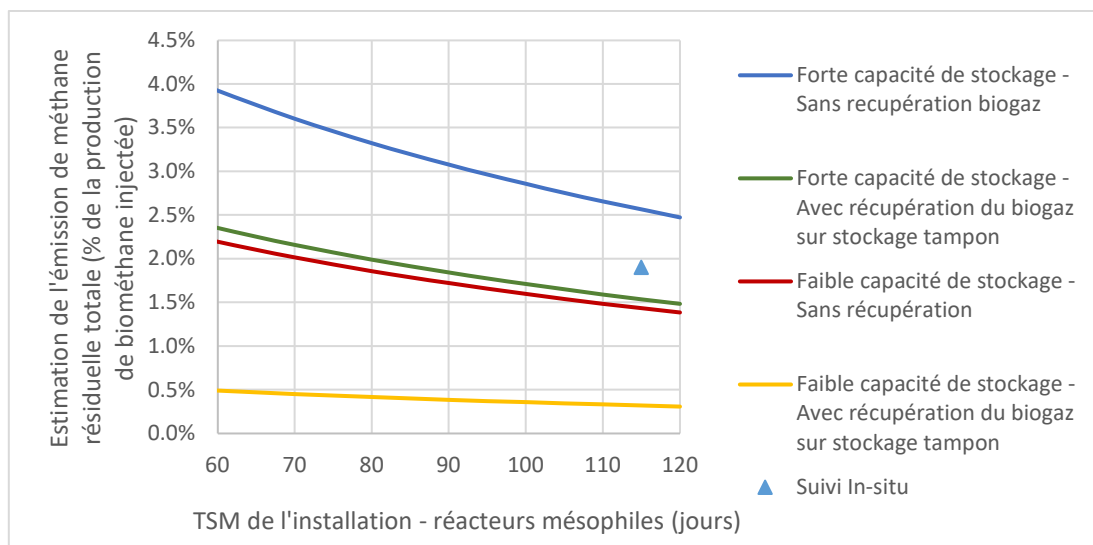


Figure 6 : Estimation de l'impact du temps de séjour des matières en méthanisation sur les émissions de méthane au stockage des 2 scénarios.

Les résultats ont mis en évidence :

- Un effet fort du temps de séjour des matières sur les niveaux d'émission observés en particulier dans le cas des scénarios sans aucune couverture avec récupération de biogaz ou avec une forte capacité de stockage.
- La couverture partielle des stockages avec récupération du biogaz (uniquement la capacité tampon, considérée de 2,5 mois ici) présente un très fort potentiel de réduction des émissions, même si cette dernière était couplée à une augmentation de capacité de l'installation conduisant à une réduction du temps de séjour des matières d'environ 110 jours à environ 80 jours, par exemple.
- Les scénarios de gestion des digestats basés sur une forte capacité de stockage et une concentration des épandages sur quelques mois de l'année présentent des niveaux d'émission de méthane résiduelle significativement supérieurs à des scénarios avec épandages réguliers.
- Les couvertures des stockages sans récupération du biogaz n'ont pas d'effet significatif sur les niveaux d'émission de méthane.

Deux clefs pour comprendre l'effet des couvertures des stockages sur les émissions vers l'air.

✓ Pourquoi les couvertures sans récupération de biogaz limitent les pertes d'azote par volatilisation ?

L'azote ammoniacal est présent dans le digestat sous deux formes, la forme NH_4^+ (ammonium), non volatile, et la forme NH_3 (ammoniac), volatile. Les pH des digestats favorisent la forme NH_3 et les rend sensibles aux pertes par volatilisation. La vitesse de ce processus physico-chimique est notamment limitée par la concentration en ammoniac gazeux dans l'air à la surface du digestat. En limitant les échanges avec l'atmosphère, les couvertures augmentent la concentration en ammoniac dans le ciel gazeux à la surface du digestat stocké et réduisent donc les vitesses de volatilisation. Les mêmes processus expliquent l'effet des croûtes spontanées, bien que leur efficacité soit moindre.

✓ Pourquoi les couvertures sans récupération de biogaz (ou les croûtes spontanées) n'ont pas d'effet significatif sur les émissions de méthane au stockage ?

Le méthane est produit au stockage par la même réaction biologique anaérobie que celle ayant lieu dans les digesteurs. Il est très peu soluble dans le milieu liquide du digestat et tout méthane produit sera donc émis dans le ciel gazeux des stockages. Les couvertures sans récupération du biogaz peuvent donc décaler dans le temps ou canaliser les émissions de méthane vers les événements. Mais n'impactent pas significativement les flux d'émission de méthane.

3.2. Emissions d'ammoniac au stockage

Comme le montre la Figure 7, au regard des incertitudes d'estimation représentées par les barres d'erreur, les scénarios de gestion en termes de capacité de stockage n'ont pas d'impact significatif sur les niveaux de pertes d'azote au stockage du fait de la concentration des émissions sur les premiers mois de ce dernier.

Cependant, la couverture de l'ensemble des stockages (sans ou avec récupération de biogaz) permet de réduire de 80% les émissions d'ammoniac par volatilisation. Et la couverture partielle de la capacité de stockage tampon permet de préserver en majeure partie cet effet, en particulier dans le cadre des scénarios avec une faible capacité de stockage et des épandages réguliers, du fait que les stockages non couverts sont essentiellement utilisés en période hivernale, peu propice aux émissions d'ammoniac.

L'effet des croûtes spontanées a été pris en compte dans l'estimation des pertes par volatilisation sans couverture (barres bleues de la Figure 7). La variabilité des estimations de pertes d'azote par volatilisation observée en considérant les différents digestats prélevés dans le cadre de l'étude (rectangles bleus pointés par les flèches) est notamment liée à la variabilité de ce phénomène, observée en partie 1.

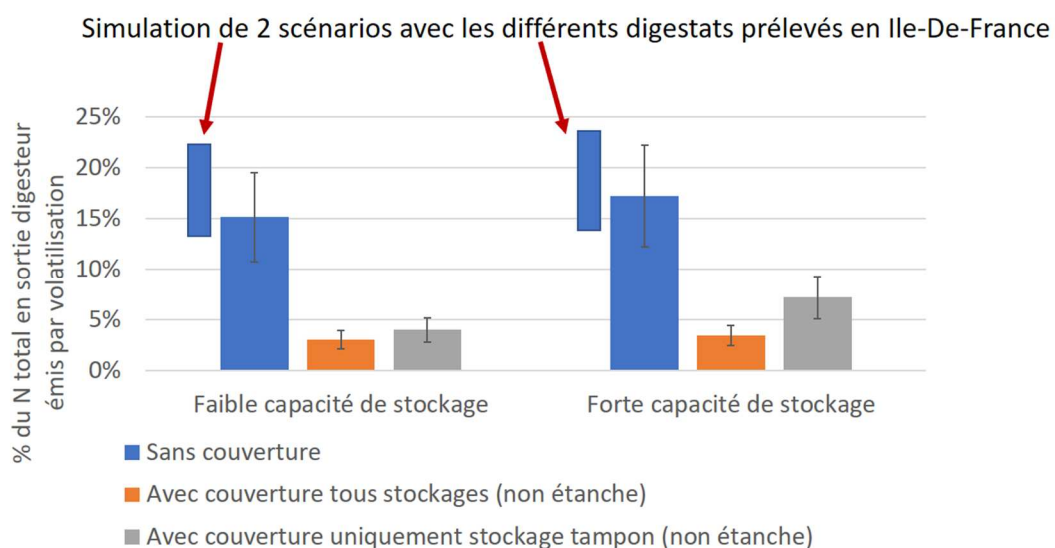


Figure 7: Effet des scénarios et de leurs variantes de couverture sur les pertes d'azote par volatilisation au stockage (les rectangles bleus à gauche de chaque diagramme représentent la variabilité estimée des prédictions obtenues pour la modalité « sans couverture » en considérant les différentes caractéristiques des digestats prélevés en Île-de-France au cours de l'étude).

3.3. Emissions d'ammoniac à l'épandage

Les travaux de simulation ont permis d'estimer les risques de perte d'azote ammoniacal par volatilisation lors de l'épandage des digestats. Une hiérarchie des périodes d'épandage a pu être établie en fonction de ce dernier et est présentée ci-dessous.

Risque de perte par volatilisation	Cultures et périodes concernées	Explications
<div style="background-color: #808000; color: white; padding: 5px; text-align: center;">Périodes à plus faible risque de pertes par volatilisation</div> <div style="background-color: #FF0000; color: white; padding: 5px; text-align: center;">Périodes à plus fort risque de pertes par volatilisation</div>	Mars – Avant betteraves	Conditions climatiques peu favorables à la volatilisation et possibilité de travail du sol.
	Février – Sur céréales ou CIVEs en place	Conditions climatiques peu favorables à la volatilisation mais impossibilité de travail du sol (tests en cours dans certaines régions avec des enfouisseurs utilisés sur prairies pour y palier).
	Avril – avant maïs (sans CIVE en précédent) Septembre (avant céréales)	Conditions climatiques moyennement favorables à favorables aux pertes par volatilisation.
	Mai-Juin – avant maïs (avec CIVE en précédent) Aout – avant colza	Conditions climatiques risquant d'être très favorables aux pertes par volatilisation générant des risques de pertes importants sauf à utiliser un dispositif d'épandage avec enfouissement direct.

Tableau 3: Classification des périodes d'épandage en fonction du risque de perte d'azote par volatilisation.

Classiquement, un enjeu très fort du délai de travail du sol après épandage a été mis en évidence sur les 2 scénarios d'épandage, comme présenté sur la Figure 8. En effet, si le modèle Volt'Air estime des pertes moyennes annuelles à l'épandage de l'ordre de 40% de l'azote ammoniacal pour un délai de travail du sol après épandage moyen de 2h, ces dernières atteignent 60 à 70% de l'azote ammoniacal pour un délai de travail du sol de 48h après l'épandage selon le scénario considéré (chiffres à interpréter de façon qualitative au regard des incertitudes du modèle utilisé dans le contexte des digestats).

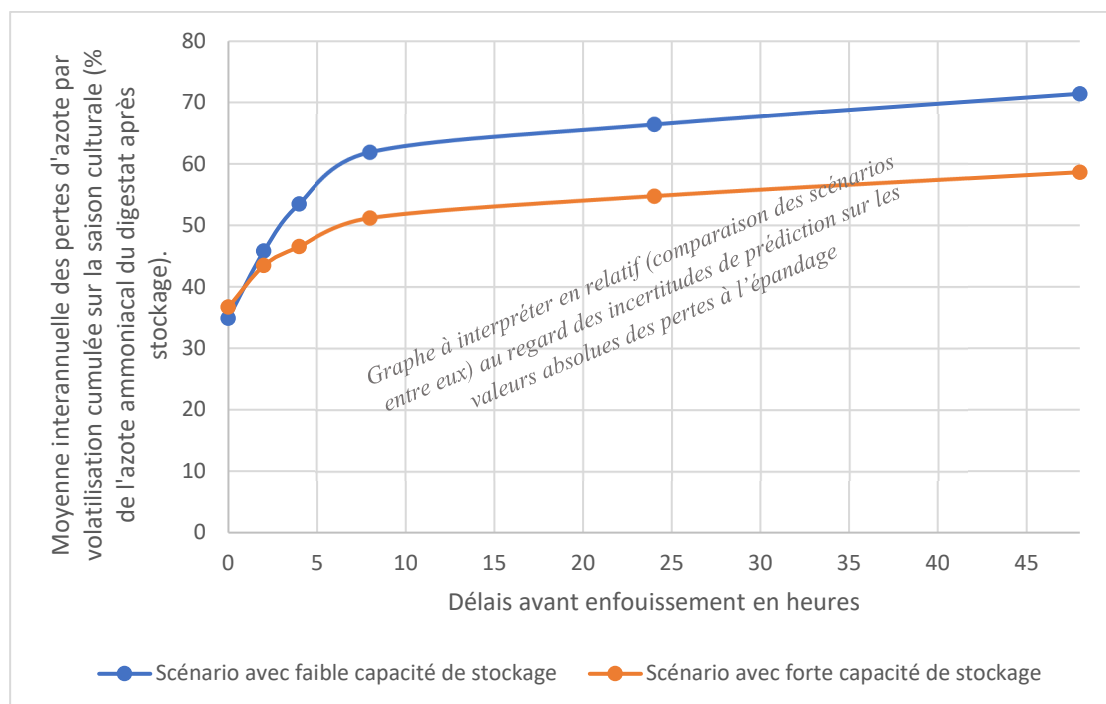


Figure 8; Cumul d'émission d'ammoniac moyen annuel à l'épandage pour chaque scénario de gestion des digestat en fonction du délai avant enfouissement considéré. (graphe à interpréter de façon qualitative au regard des incertitudes de modélisation, pour les épandages sur céréales, aucun enfouissement n'a été considéré).

Le scénario avec une forte capacité de stockage et une priorisation des épandages entre février et avril permet de réduire modérément les niveaux de perte à l'échelle annuelle, en particulier si les délais de travail du sol sont inférieurs à 6h. La différence modérée entre les deux scénarios est liée notamment au fait que plus de 50% du digestat est au final épandu sur les mêmes périodes.

3.4. Emissions d'ammoniac sur l'ensemble stockage + épandage

Les cumuls de pertes d'azote par volatilisation obtenus sur les différents scénarios (avec ou sans couverture des stockages) sont présentés sur la Figure 9, en fonction des délais entre l'épandage et le travail du sol considérés. Au regard des incertitudes liées à la simulation des émissions à l'épandage, ces résultats doivent être interprétés en relatif (comparaison des scénarios entre eux) mais les valeurs absolues des pertes ne peuvent pas être considérées comme des prédictions directes des pertes moyennes observées dans le contexte de l'Île-de-France (voir préambule méthodologique page 10).

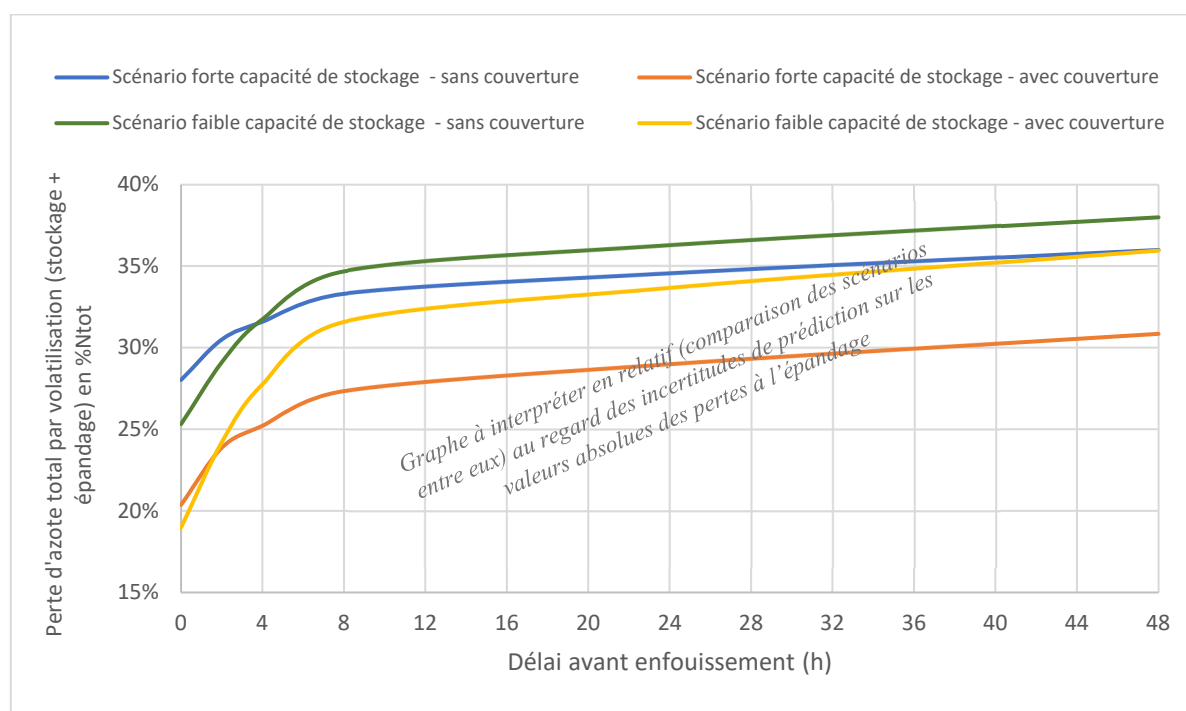


Figure 9: Estimations par modélisation des cumuls de pertes d'azote par volatilisation au stockage et à l'épandage obtenus pour le cas particulier d'un digestat dont les caractéristiques sont celles du site ayant fait l'objet d'un suivi d'émission (partie 2), en fonction des délais d'enfouissement post-épandage considéré.

Les résultats ont montré que l'effet des scénarios et des modalités de couverture est fortement impacté par les délais de travail du sol post-épandage considérés. La Figure 10 présente une estimation du taux de réduction des émissions en fonction du scénario et du délai de travail du sol post-épandage considérés. Ces résultats montrent qu'une couverture complète des stockages peut permettre une réduction des pertes d'azote par volatilisation sur l'ensemble de la gestion des digestats (stockage +épandage) d'environ 25% à condition :

- de la combiner avec l'utilisation d'un outil d'épandage à enfouissement direct ou d'avoir un délai de travail du sol inférieur à 2h quand le digestat n'est pas appliqué sur une culture en place comme les céréales en sortie d'hiver.

Ou bien

- de concentrer les épandages de digestats sur des périodes où les conditions climatiques génèrent de moindre risque de volatilisation (épandages sur céréales, avant betterave, ou avant les semis de maïs du mois d'avril) en garantissant un enfouissement au minimum dans les 4h après l'épandage, sauf sur les céréales en place.

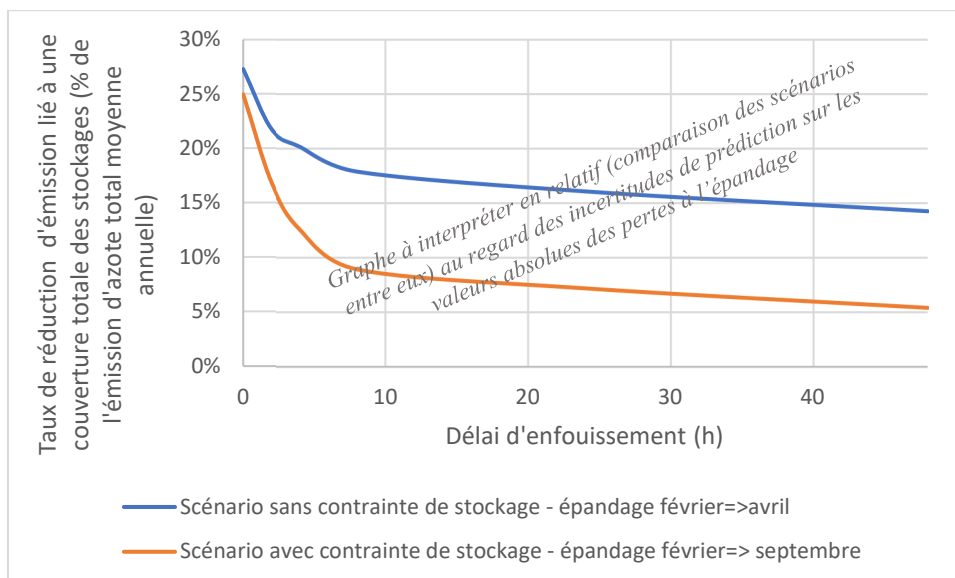


Figure 10: Estimation du taux de réduction des émissions (stockage + épandage des digestats) lié à une couverture des stockages en fonction du délai entre l'épandage et le travail du sol.

Si le délai de travail du sol après épandage est situé entre 12 et 48h, les simulations ont permis d'estimer qu'il est nécessaire de concentrer les épandages entre février et avril pour conserver plus de 45% de la plus-value de la couverture en terme d'économie d'émission. A défaut, jusqu'à 75% des émissions évitées au stockage peuvent être transférées à l'épandage. La Figure 11 présente une synthèse des impacts croisés des délais de travail du sol post-épandage et de la répartition annuelle des épandages sur le niveau de préservation des « économies » de perte d'azote par volatilisation générées par la couverture complète des stockages.

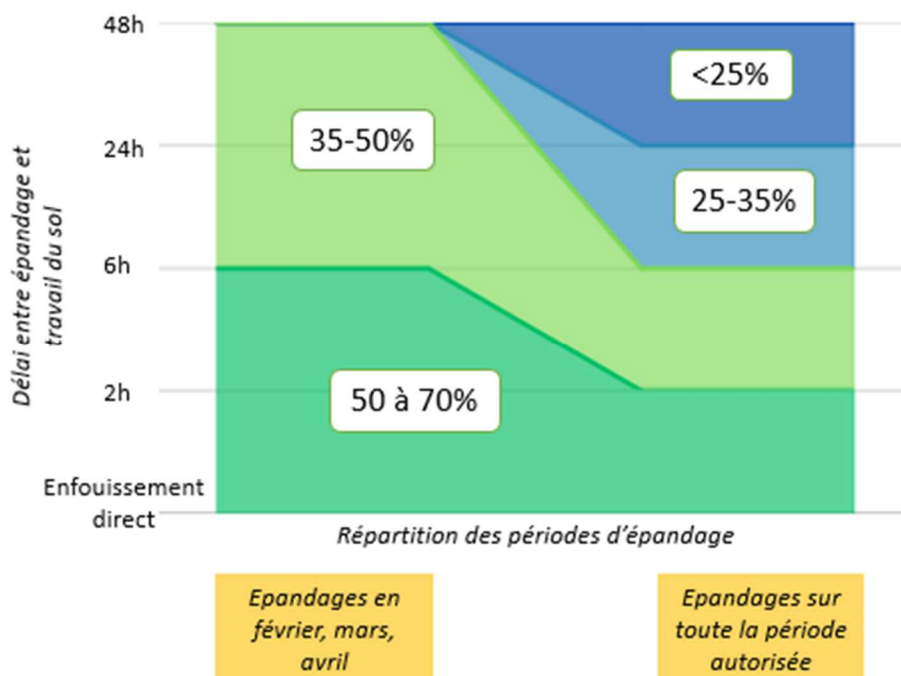


Figure 11 : Synthèse des impacts croisés des délais de travail du sol post-épandage et de la répartition annuelle des épandages sur le niveau de préservation des économies de perte d'azote par volatilisation générées par la couverture

4. Analyses des bénéfiques et points de vigilance des évolutions de pratiques étudiées

Pratique	Bénéfices	Principaux points de vigilance
Temps de séjour des matières supérieurs à une valeur pivot de 80-100j	Emission de méthane résiduelle maintenue en dessous de 1,5 à 2,5% de la production de biométhane	Impact sur les coûts de production.
Couverture totale des stockages sans récupération de biogaz	<ul style="list-style-type: none"> - Jusqu'à 25% d'émission d'ammoniac vers l'air en moins (ensemble de la filière de gestion des digestats : stockage + épandage). - Impact significatif sur la quantité d'azote du digestat épandu disponible pour la culture (économie d'engrais azotés) et économies sur les coûts d'épandage du fait de l'absence de dilution par l'eau de pluie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité de coupler l'application de bonnes pratiques à l'épandage pour préserver la plus-value de la couverture (Epandage entre février et avril ou bien travail du sol dans un délai inférieur à 2h ou enfouissement direct sur les autres périodes).
Couverture d'une capacité de stockage tampon (2,5 mois) sans récupération de biogaz	<ul style="list-style-type: none"> - Effet assez proche d'une couverture complète sur les émissions d'ammoniac si les stockages déportés sont utilisés uniquement entre novembre et mars. - Economies sur les coûts d'épandage du fait de la diminution des apports d'eau de pluie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite une évolution de certaines infrastructures en place, en particulier les lagunes de grande dimension pour lesquelles les solutions de couverture sont difficilement compatibles avec les contraintes d'agitation. Ce qui peut engendrer des difficultés en terme d'homogénéité d'épandage et des risques d'accumulation de solides au fond des lagunes (retour des acteurs de terrain impliqués dans le suivi de l'étude).
Couverture d'une capacité de stockage tampon (2,5 mois) avec récupération et valorisation du biogaz	<ul style="list-style-type: none"> - Seule pratique permettant de réduire conjointement les émissions de méthane et d'ammoniac : Effet assez proche d'une couverture complète sur les émissions d'ammoniac si les stockages déportés sont utilisés uniquement entre novembre et mars ; Potentiel de réduction de 40 à 50% des émissions résiduelles de méthane au stockage des digestats. - Possibilité de rentabiliser les coûts liés à l'infrastructure avec les quelques pourcents de production de biogaz supplémentaire récupérés. - S'il s'agit d'une cuve agitée, souplesse d'agitation facilitant les chantiers d'épandage et l'homogénéité du digestat épandu. - Economies sur les coûts d'épandage du fait de la diminution des apports d'eau de pluie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite une capacité de stockage d'environ 11 mois. - En l'absence de couverture, impact sur le bilan annuel des pertes d'azote réduit du fait d'émission supérieures au stockage et de la présence de seulement environ 50% des épandages sur ces périodes pour la plupart des installations. - Augmentation des temps de stockage conduisant à une augmentation des émissions de méthane résiduelles. - Difficultés opérationnelles pour mettre en œuvre des épandages significatifs sur les céréales en sortie d'hiver (conditions climatiques, temps de travail...).
Concentration des épandages dans les périodes à faible risque de pertes d'azote par volatilisation du fait des conditions climatiques (février->avril)	Réduction d'environ 15 à 20% des pertes d'azote par volatilisation sur l'ensemble de la gestion des digestats si les stockages sont couverts ou partiellement couverts (stockage tampon).	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite une capacité de stockage d'environ 11 mois. - En l'absence de couverture, impact sur le bilan annuel des pertes d'azote réduit du fait d'émission supérieures au stockage et de la présence de seulement environ 50% des épandages sur ces périodes pour la plupart des installations. - Augmentation des temps de stockage conduisant à une augmentation des émissions de méthane résiduelles. - Difficultés opérationnelles pour mettre en œuvre des épandages significatifs sur les céréales en sortie d'hiver (conditions climatiques, temps de travail...).
Réduction du délai entre l'épandage et le travail du sol en dessous des 2h	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction d'environ 25% des pertes d'azote par volatilisation à l'échelle de l'ensemble de la gestion des digestats par rapport à un travail du sol 48h après l'épandage. - Préservation de plus de 50 à 75% de l'intérêt des couvertures en terme d'économies d'émissions d'ammoniac. 	Nécessité de coordination des chantiers d'épandage et de travail du sol potentiellement difficile à organiser.
Epandage avec un outil permettant l'enfouissement direct sur les périodes d'épandage de mai à septembre.	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction d'environ 25% des pertes d'azote par volatilisation à l'échelle de l'ensemble de la gestion des digestats par rapport à un travail du sol 48h après l'épandage. - Préservation de plus de 50 à 75% de l'intérêt de la couverture en terme d'économies d'émissions. - Possibilité d'épandre en période estivale sur des cultures valorisant bien une fertilisation à base de digestats (colza par ex.) en maîtrisant les pertes 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation du temps de travail et des consommations de carburant. - Risque de tassement supplémentaire lié à un passage des engins sur une moindre largeur de travail.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1: Synthèse des caractéristiques des digestats bruts analysés dans le cadre de l'étude en sortie de méthaniseur (avant stockage).	5
Tableau 2: Synthèse des effets des paramètres de méthanisation sur les émissions de méthane et d'ammoniac au stockage.....	8
Tableau 3: Classification des périodes d'épandage en fonction du risque de perte d'azote par volatilisation.	13

FIGURES

Figure 1: Pilotes de stockage de 1m ³ utilisés pour représenter les stockages en lagune à une échelle expérimentale (cuve isolée pour représenter l'effet du sol et équipée d'un dispositif de suivi des émissions vers l'air (chambre dynamique).	5
Figure 2 : Potentiels méthanogènes résiduels obtenus sur les digestats prélevés sur les 11 sites de méthanisation.....	6
Figure 3 : Potentiels méthanogènes résiduels observés sur les 12 digestats prélevés (à gauche : par rapport à la matière brute ; à droite : par rapport à la matière organique) en fonction du temps de séjour des matières des installations en conditions mésophiles (courbes de tendance logarithmiques).	6
Figure 4: Photographie du dispositif de mesure des émissions gazeuses positionné sur une lagune de stockage des digestats.	8
Figure 5: Comparaison de l'émission moyenne observée in-situ dans le cadre de l'étude et des données bibliographiques disponibles.	9
Figure 6 : Estimation de l'impact du temps de séjour des matières en méthanisation sur les émissions de méthane au stockage des 2 scénarios.....	11
Figure 7: Effet des scénarios et de leurs variantes de couverture sur les pertes d'azote par volatilisation au stockage (les rectangles bleus à gauche de chaque diagramme représentent la variabilité estimée des prédictions obtenues pour la modalité « sans couverture » en considérant les différentes caractéristiques des digestats prélevés en Île-de-France au cours de l'étude).	12
Figure 8; Cumul d'émission d'ammoniac moyen annuel à l'épandage pour chaque scénario de gestion des digestats en fonction du délai avant enfouissement considéré. (graphe à interpréter de façon qualitative au regard des incertitudes de modélisation, pour les épandages sur céréales, aucun enfouissement n'a été considéré).....	13
Figure 9: Estimations par modélisation des cumuls de pertes d'azote par volatilisation au stockage et à l'épandage obtenus pour le cas particulier d'un digestat dont les caractéristiques sont celles du site ayant fait l'objet d'un suivi d'émission (partie 2), en fonction des délais d'enfouissement post-épandage considéré.	14
Figure 10: Estimation du taux de réduction des émissions (stockage + épandage des digestats) lié à une couverture des stockages en fonction du délai entre l'épandage et le travail du sol.....	15
Figure 11 : Synthèse des impacts croisés des délais de travail du sol post-épandage et de la répartition annuelle des épandages sur le niveau de préservation des économies de perte d'azote par volatilisation générées par la couverture.....	15