

		
Réf projet : PR2301553	Rapport PR2301553_240926_Azote	Rapport du 26/09/2024
<p> Lisa CHAMART</p> <p> lisa.chamart@spw.wallonie.be</p>	Département Assistance Technique	<p> Nicolas GRAINDORGE Françoise PIRARD</p> <p> ngraindorge@cebedeau.be fpirard@cebedeau.be</p> <p> +32(0)4 254 98 25</p>

RESRECOVERY

MESURE 32 : RÉCUPÉRER LES RESSOURCES PRÉSENTES DANS LES EAUX USÉES.

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES



CENTRE DE RECHERCHE ET D'EXPERTISE POUR L'EAU

CEBEDEAU ASBL
Allée de la découverte, 11 B53
4000 Liège

IBAN : BE02 2400 6287 9040
TVA : BE0402 381 833

TABLE DES MATIÈRES

I.	<i>Introduction</i>	1
I-1.	Contexte.....	1
I-2.	Effluents concernés	3
I-2.1.	Eaux usées urbaines	3
	Figure I-1 - Différentes formes de l'azote et leurs proportions relatives en entrée de station d'épuration (1H2O3, no date)	4
	Tableau I-1 : Composition typique d'eaux usées brutes de stations d'épuration (composés majeurs) (Pikaar et al., 2022).....	4
I-2.1.1.	Urine	5
I-2.1.2.	Boues de stations d'épuration	5
	Tableau I-2 - Composition typique des boues primaires et secondaires (Pikaar et al., 2022)	5
	Tableau I-3 - Composition des jus de déshydratation des boues de stations d'épuration (Chen et al., 2020) 5	
	Tableau I-4 - Composition du surnageant de la digestion anaérobie des boues (Chen et al., 2020).....	6
I-2.2.	Fumier et lisier	6
	Tableau I-5 - Composition moyenne du lisier brut (H2orus, no date)	6
I-2.3.	Abattoirs et industries de la viande	7
	Tableau I-6 - Composition moyenne d'effluents d'abattoirs (H2orus, no date a).....	7
I-2.4.	Industries laitières	7
	Tableau I-7 - Composition de différents produits laitiers (g/L) (Suez Water Handbook, no date).....	7
	Tableau I-8 - Composition typique moyenne d'effluents de laiterie polyvalentes françaises (Djelal, Rigail and Boyer, 2008).....	8
I-2.5.	Brasseries	8
	Tableau I-9 - Composition typique d'effluent de brasserie (Suez Water Handbook, no date)	8
I-2.6.	Autres secteurs	8
II.	<i>Élimination de l'azote dans les eaux usées</i>	9
	Tableau II-1 - Caractéristiques des procédés d'élimination de l'azote ammoniacal (Zhou et al., 2023)	9
II-1.	Procédés biologiques	9
	Figure II-1 - Différentes étapes intervenant dans les procédés d'élimination de l'azote des eaux usées. (Dai et al., 2019).....	10
II-1.1.	Nitrification/dénitrification	10
II-1.2.	Nitritation/Dénitritation (nitrification partielle)	11
II-1.3.	Procédé Anammox	11
II-1.4.	Procédé CANON	12
II-2.	Procédés physicochimiques	12
II-2.1.	Précipitation chimique	12
II-2.2.	Adsorption et échange d'ions	13
III.	<i>Technologies de récupération de l'azote</i>	13
	Tableau III-1 - Niveau de maturité technologique pour différents produits récupérés à partir des eaux usées pour différents pays (WOW! State of the art report, 2019)	14
	Figure III-1 : Différentes technologies de récupération et de réutilisation de l'azote. Basé sur (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)	15

Tableau III-2 - Critères de sélection pour le choix d'une technologie de récupération de l'azote (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)	17
Tableau III-3 - Sélection des technologies pour la récupération de l'azote et sa réutilisation (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)	18
III-1. Récupération de l'azote de l'urine.....	23
III-2. Concentration et valorisation biologique de l'azote	23
III-2.1. Utilisation directe des boues de stations d'épuration	23
III-2.2. Compostage (digestion aérobie).....	24
Figure III-2 - Procédés de conversion de la matière azotée lors du compostage (Shan et al., 2021)	25
III-2.3. Digestion anaérobie.....	25
III-2.4. Prétraitement par hydrolyse des boues	25
III-2.5. Lagunage	26
III-3. Précipitation et cristallisation	26
III-3.1. Production de struvite.....	26
III-4. Traitement physico-chimique	27
III-4.1. Stripping/scrubbing de l'ammoniac.....	27
III-4.1.1. Principe.....	27
Figure III-3 - Pourcentage d'abondance des espèces NH ₃ et NH ₄ ⁺ en fonction du pH (Langenfeld et al., 2021)	28
Figure III-4 - Schéma du stripping/scrubbing de l'ammoniac (Systemic Project, 2021)	29
III-4.1.2. Différentes techniques de stripping	30
III-4.1.3. Efficacité de récupération	31
III-4.2. Procédés membranaires	31
III-4.2.1. Procédés membranaires basés sur la différence de pression	31
III-4.2.2. Procédés membranaires basés sur l'osmose directe.....	32
III-4.2.3. Procédés membranaires améliorés biologiquement.....	33
III-4.2.4. Procédés membranaires électrochimiques.....	34
Tableau III-4 - Efficacité de récupération de l'azote en fonction de différentes technologies membranaires (Al-Juboori et al., 2023)	34
III-4.2.5. Procédés membranaires perméables aux gaz.....	35
Tableau III-5 - Liste de différentes études sur la récupération de l'azote par contact membranaire (Al-Juboori et al., 2023)	37
III-4.2.6. Procédés membranaires hybrides	38
III-4.3. Adsorption et échange d'ions	38
III-5. Traitement biologique	38
III-5.1. Systèmes bio-électrochimiques	38
III-5.2. Production de protéines microbiennes.....	39
IV. Étude de cas.....	41
IV-1. Meta-analyse sur les techniques de récupération de l'azote.....	41
Tableau IV-1 – Techniques de récupération de l'azote et performances associées (Beckinghausen et al., 2020).	42
Tableau IV-2 : Techniques de récupération de l'azote et consommation énergétique associée (Beckinghausen et al., 2020)	44
Figure IV-1 - Représentation graphique de la consommation énergétique versus l'efficacité de récupération de l'azote pour différentes technologies (Beckinghausen et al., 2020)	46
IV-2. Bilan de matière sur la station d'épuration d'Amsterdam-West.....	46
Figure IV-2 - Station d'épuration d'Amsterdam-West. (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018).....	46

Tableau IV-3 - Concentration en azote des différents flux et la charge en azote relative à la charge entrante dans la station d'épuration (eau usée entrante et boues provenant d'autres stations d'épuration) (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)	47
Figure IV-3 - Bilan de matière sur l'eau à la station d'épuration d'Amsterdam-West (débits en millions de m ³ /an) (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)	48
Figure IV-4 - Bilan de matière sur l'azote dans la station d'épuration d'Amsterdam-West (débit en tonnes par an)	49
Tableau IV-4 - Étude comparative des taux de récupération de l'azote à la station d'épuration d'Amsterdam-West en fonction des technologies et flux considérés. Basé sur (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)	49
IV-3. Anaergia (Canada)	50
IV-4. Byosis (Nijhuis Water Technology B.V. - NL)	50
IV-5. AgroAmerica (Guatemala).....	51
IV-6. AguaDB (UK).....	52
IV-7. AMFER (Colsen - NL)	53
IV-8. Anuvia Plant Nutrient (USA)	53
IV-9. Aqua2[®]N (EasyMining – Allemagne & Suède).....	54
IV-10. CCM Technologies (UK)	54
IV-11. DUCTOR (Finlande)	55
IV-12. GENIUS (Nijhuis Saur Industries – UK & Irlande).....	55
IV-13. HTCycle (Allemagne)	56
IV-14. Manure slurry acidification (Biocover - Danemark)	57
IV-15. N2-Applied (Norvège)	57
IV-16. PAKU (Endev - Finlande).....	58
IV-17. RAVITA[®] (HSY - Finlande).....	58
IV-18. Struvite: WASSTRIP (Ostara), Phosphogreen (Suez), Phosphorce (Veolia), Parforce, Pearl (Ostara), NuReSys, Struvia (Veolia), Airprex, Phorwater.....	59
IV-19. Struvite (MSE-mobile - Allemagne).....	60
IV-20. Varcor[®] (Sedron - USA)	60
V. Inventaire des gisements en région wallonne.....	61
V-1. Inventaire des STEP urbaines	61
Figure V-1 - Capacité épuratoire des stations d'épuration Wallonnes	62
V-2. Charges en azote à l'échelle du territoire	62
Figure V-2 – Charge annuelle en azote dans les stations d'épuration Wallonnes	62
Figure V-3 : Bilan global sur l'azote, approche macroscopique sur 385 STEP– données 2022	64
V-3. Gisement associé aux ERI.....	64
Figure V-4 : Charge en azote dans les effluents des différents secteurs industriels (○) et charge récupérable par précipitation sous forme de struvite (●).	66
VI. Synthèse.....	67
VII. Bibliographie.....	68
VIII. Annexes	1
Tableau VII-1 - Différentes membranes de procédés baro-membranaires utilisées pour la récupération de l'azote (Al-Juboori et al., 2023)	1
Tableau VII-2 : Techniques de récupération de l'azote – Caractéristiques de l'influent et résultats (Beckinghausen et al., 2020)	2

Tableau VII-3 : Bilan énergétique des technologies de récupération de l'azote (Beckinghausen et al., 2020) 5

Tableau VII-4 - Technologies de récupération de l'azote classées par Pays, et organisations6

I. INTRODUCTION

I-1. Contexte

Il est estimé aujourd’hui que l’agriculture requiert environ 115 millions de tonnes d’azote « réactif » par an. Cette valeur pourrait augmenter à 150 millions de tonnes en 2050. A l’échelle du territoire wallon, la consommation annuelle d’engrais azoté chiffrerait près de 140.000 tN en 2020, pour moitié sous forme minérale et moitié sous forme organique (d’élevage) (Etat de l’environnement wallon, 2022). L’azote réactif correspond à l’ensemble des espèces azotées (nitrite, nitrate, ammoniac, azote organique, ...) présentes dans l’environnement excepté le diazote N_2 , et sera appelé plus communément « azote » dans la suite de ce rapport. Cet azote est produit majoritairement sous forme d’ammoniac généré à l’aide du procédé Haber-Bosch. Ce procédé est très énergivore, et consomme 1 à 2% de la totalité de l’énergie utilisée par les industries. Celui-ci est également responsable de 1,2% des émissions de gaz à effet de serre. On a estimé en 2010 que l’azote réactif anthropogénique correspondait au double de l’azote réactif généré naturellement sur Terre (2% provenant des éclairs et 98% de la fixation biologique).

Une partie de l’azote épandu (de l’ordre de 10%) est perdue après épandage par ruissellement et érosion vers les eaux de surface ou lixiviation vers les eaux souterraines et cause des problèmes d’eutrophisation, tout comme les phosphates. Une autre partie, assimilée par les plantes, est directement ou indirectement consommée et est ensuite excrétée principalement sous forme d’urée et d’ammonium NH_4^+ par le métabolisme humain et enfin déchargée dans les eaux usées urbaines. Celles-ci contiennent typiquement entre 30 et 60 mgN/L (moyenne RW ~ 40 mg/L, toutes données confondues, 2022). A l’échelle mondiale, cela représente au total 20 millions de tonnes qui, si elles étaient complètement récupérées, permettrait de couvrir 17% des besoins en azote pour l’agriculture. On estime que cette valeur pourrait augmenter à 35 millions de tonnes d’ici 2035.

Aujourd’hui, à peine 0 à 15% de l’azote provenant des sanitaires est utilisé comme amendement pour le sol. Cette valeur est amenée à augmenter, le traitement des eaux usées étant une étape très énergivore (insufflation d’air nécessaire à l’oxydation de l’ammoniac dans le procédé des boues activées) : environ 50% de l’énergie utilisée dans les stations d’épurations est utilisée pour éliminer les matières organiques et l’azote réactif des eaux usées. De plus, le procédé Haber-Bosch est très énergivore. La réutilisation de l’azote réactif contenu dans les eaux usées est à la fois une alternative au procédé Haber-Bosch et évite de le perdre dans l’atmosphère sous forme de diazote. Enfin, l’élimination biologique de l’azote réactif génère une quantité non négligeable de protoxyde d’azote N_2O , puissant gaz à effet de serre (250 à 300 fois plus puissant que le CO_2 sur 100 ans). Il est estimé que les stations d’épuration sont responsables d’environ 5% des émissions totales anthropogéniques de N_2O (moyenne 2010-2019) et inversement, les émissions d’oxyde nitreux contribuent pour 50 à 80% aux émissions de GES des stations d’épuration. Ce dernier est par ailleurs considéré comme responsable d’environ 10% du réchauffement climatique net depuis la révolution industrielle (United Nations Environment Programme and Food and Agriculture Organization, 2024) (Pikaar *et al.*, 2022) (Beckinghausen *et al.*, 2020)

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L’AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 1 sur 70

Ci-dessous sont repris quelques chiffres clés permettant d’avoir une meilleure idée de la consommation énergétique liée à l’azote (Pikaar *et al.*, 2022) (Beckinghausen *et al.*, 2020):

- 1 kilogramme d’ammoniac NH₃ (0,82 kg N) produit par le procédé Haber-Bosch requiert 0,95 m³ de gaz naturel, ou 2 à 3 litres de carburant, et émet 1,6 kg de CO₂
- 87% de la totalité de l’énergie utilisée dans l’industrie des fertilisants l’est pour le procédé Haber-Bosch
- 1 kilogramme d’azote réactif éliminé par le procédé des boues activées requiert 2 litres de carburant
- l’énergie requise pour l’aération pour le procédé de nitrification/dénitrification représente 40% de l’énergie requise pour l’élimination des matières organiques

Le coût environnemental et énergétique lié à la production et l’utilisation de cet azote réactif incite à trouver des méthodes alternatives permettant de réduire ces coûts. L’azote réactif se trouvant dans les eaux usées est aujourd’hui en majeure partie éliminé en azote non réactif N₂ via le procédé de nitrification/dénitrification, ou d’oxydation anaérobie de l’ammonium (Anammox), mais pourrait être récupéré pour à la fois limiter le besoin de production d’azote réactif, mais également le coût énergétique lié à son élimination.

Jusqu’à présent, peu de procédés à grande échelle ont été implémentés pour récupérer l’azote des eaux usées et le réutiliser. Plusieurs techniques de récupération de l’azote ont déjà été mises en place telles que la précipitation de struvite et le « stripping » de l’ammoniac, bien que la précipitation de struvite soit principalement destinée à la récupération du phosphore. Toutefois, ces techniques ne sont adaptées qu’à des flux concentrés, tels que la phase aqueuse des digestats ou l’urine. La réutilisation directe de l’azote peut se faire aussi à travers l’épandage de matières solides organiques. (Pikaar *et al.*, 2022) (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

En plus de la récupération et réutilisation de l’azote, d’autres initiatives sont également mises en place pour rendre le traitement de l’eau plus durable. Celles-ci ciblent la récupération de l’eau, des nutriments (azote, phosphore et métaux), de l’énergie et également de techniques émergentes pour la récupération et valorisation de matières organiques telles que la cellulose, des biopolymères, des bioplastiques et des protéines.

Les procédés présentés dans ce rapport doivent donc, pour permettre de récupérer et réutiliser l’azote de manière plus durable (énergie et production de N₂O), être applicables à une échelle industrielle pour des concentrations adaptées aux eaux usées. L’azote récupéré doit pouvoir être sous une forme réutilisable. Ces technologies sont également comparées à des technologies permettant de récupérer d’autres ressources afin de déterminer si des synergies sont possibles ou si elles ne sont pas compatibles entre elles.

(Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L’AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 2 sur 70

I-2. Effluents concernés

Différents substrats contenant de l'azote récupérable, et techniques de réutilisation directes, sont présentés dans les sections suivantes. Une étude a analysé 100 publications récentes sur la récupération de l'azote et a montré que les substrats les plus concernés pour une récupération sont les liquides riches en azote tels que les fumier, lisier, digestat et lixiviat. (European Sustainable Phosphorus Platform 2, 2023)

I-2.1. Eaux usées urbaines

Les eaux usées sont caractérisées par des volumes importants mais des faibles concentrations en azote. Une étape de concentration est donc nécessaire pour pouvoir le récupérer. Cette étape peut être réalisée lors du traitement biologique, par capture de l'azote réactif par la biomasse. Les boues formées sont un réservoir important d'azote. Celles-ci peuvent ensuite être digérées pour faciliter la déshydratation des boues tout en produisant du biogaz. La phase aqueuse obtenue à partir de la déshydratation des boues digérées ou brutes est riche en azote et est généralement renvoyée en tête de station d'épuration. Elle peut ainsi contribuer jusqu'à 30% de la charge en azote dans la station d'épuration. Il s'agit donc d'une cible idéale pour la récupération de l'azote. L'urine contribue à 75 à 80% de la charge totale en azote (et 50% de celle en phosphore) dans les stations d'épuration, mais à peine 1% du débit total des eaux usées. Il s'agit donc d'une source à très haut potentiel, si celle-ci est séparée en amont des eaux usées. (Beckinghausen *et al.*, 2020)

La contribution relative des différentes formes de l'azote au contenu des eaux usées est reprise dans le schéma de la Figure I-1, on y trouve :

- Les oxydes d'azotes : nitrites NO_2^- , nitrates NO_3^- ,
- Les formes non oxydées : l'azote Kjeldhal, comprenant l'azote organique et l'azote ammoniacal $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$
- L'azote organique : ammonifiable, et réfractaire

Les gaz N_2 (diazote) et N_2O (protoxyde d'azote) sont générés par le process épuratoire.

On peut également noter que, sauf présence de rejets industriels particuliers, la quasi-totalité de l'azote retrouvée dans les eaux usées est sous forme réduite (ammoniacale ou organique) (1H2O3, no date)

La composition des eaux usées typiques est reprise dans le Tableau I-1. La concentration en azote y est de 60 mg/L en moyenne, dont 45 mg/L d'azote ammoniacal.

Selon (Al-Juboori *et al.*, 2023), la concentration est de 25 à 1200 mg/L.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 3 sur 70

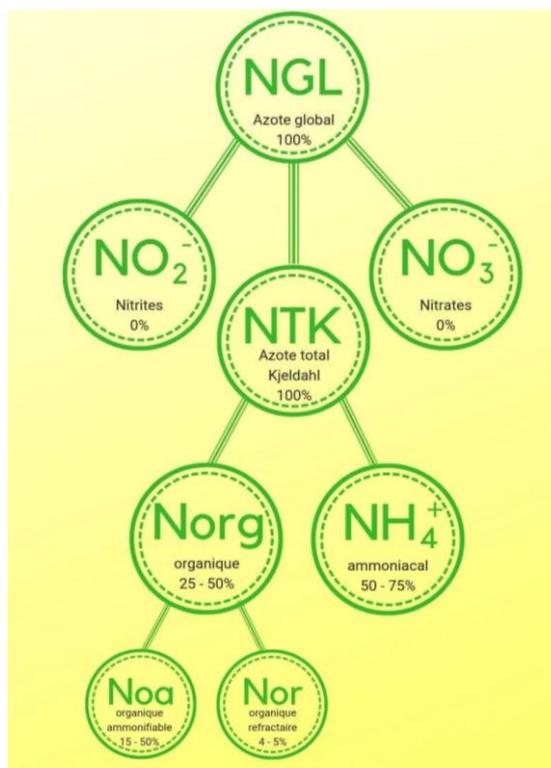


Figure I-1 - Différentes formes de l'azote et leurs proportions relatives en entrée de station d'épuration (1H2O3, no date)

Tableau I-1 : Composition typique d'eaux usées brutes de stations d'épuration (composés majeurs) (Pikaar et al., 2022)

Paramètres	Valeur basse	Valeur moyenne	Valeur haute
DCO totale (mg/L)	500	750	1200
DCO soluble (mg/L)	200	300	480
DBO5 (mg/L)	230	350	560
Acides gras volatils (AGV - VFA) (mg-acétate/L)	10	30	80
Azote total (mg/L)	30	60	100
Azote total Kjeldahl (mg/L)	30	60	100
Ammoniaque-N (mg/L)	20	45	75
Phosphate total (mg/L)	6	15	25
Matières en suspension totales (MES – TSS) (mg/L)	250	400	600
Matières en suspension volatiles (MSV - VSS) (mg/L)	200	320	480

I-2.1.1. Urine

L'urine mélangée aux eaux usées contribue à elle seule à 80% de la charge en azote. Selon (Al-Juboori *et al.*, 2023), la concentration en azote total y est de 200 à 8500 mg/L, principalement sous forme d'urée.

I-2.1.2. Boues de stations d'épuration

Tableau I-2 - Composition typique des boues primaires et secondaires (Pikaar *et al.*, 2022)

Paramètres	Boues primaires	Boues secondaires
Concentration en solides totale (TS) (%)	5-9	0,8-1,2
Solides volatiles (VS) (en % de la TS)	60-80	59-68
Azote (%TS)	1,5-4	2,4-5,0
Phosphore (%TS)	0,8-2,8	0,5-0,7
Potassium (K ₂ O %TS)	0-1	0,5-0,7
Cellulose (%TS)	8-15	7-9,7
Fer (g Fe/kg)	2-4	-
Silice (SiO ₂ %)	15-20	-
pH	5,0-8,0	6,5-8,0
Graisses (%TS)	7-35	5-12
Protéines (%TS)	20-30	32-41
Alcalinité (mg/L CaCO ₃)	500-1500	580-1100
Acides organiques (mg/L acétate)	200-2000	1100-1700
Contenu énergétique(MJ/kg TS)	23-29	19-23

Tableau I-3 - Composition des jus de déshydratation des boues de stations d'épuration (Chen *et al.*, 2020)

	Valeur
DCO (mg/L)	700 - 1400
TSS (g/L)	< 0,8
Azote Kjeld. (mg/L)	600 – 1513
Azote organique (mg/L)	90 - 187
Phosphore (mg/L)	0 – 130
pH	7 - 13

Tableau I-4 - Composition du surnageant de la digestion anaérobie des boues (Chen et al., 2020)

	Valeur
DCO tot (mg/L)	700 - 9000
DCO soluble (mg/L)	200 - 2000
DBO tot (mg/L)	300 - 4000
DBO soluble (mg/L)	100 - 1000
TSS (g/L)	500 - 10000
Azote Kjeld. (mg/L)	120 - 800
Azote ammoniacal (mg/L)	100 - 500
Phosphore (mg/L)	15 - 300
VSS	250 - 6000

I-2.2. Fumier et lisier

Le fumier et le lisier consistent en un déchet formé principalement d'aliments non digérés, chargés en matière organique, en azote (urée provenant de l'urine, azote organique provenant des déjections), et du phosphore (surtout de l'acide phytique, résidu de l'alimentation basée sur des céréales). Ces déchets contiennent également des hormones, antibiotiques et pathogènes qui limitent leur utilisation directe en épandage. De plus le ratio N/P n'est pas idéal pour être utilisé comme fertilisant. La forte solubilité de ces nutriments induit un fort relargage de ceux-ci dans le sol, au détriment de l'assimilation par les plantes. Les conséquences en sont une pollution des eaux par eutrophisation, un rejet de composés azotés dans l'atmosphère, et une aération insuffisante des sols.

La composition du fumier dépend de plusieurs facteurs, comme le type d'animaux, leur âge, l'alimentation, la quantité d'eau apportée et les conditions climatiques. (Witek-Krowiak *et al.*, 2022) Les animaux élevés hors sol génèrent du lisier dont les quantités sont variables en fonction de l'espèce (canards 0,3 L/j, porcs 25 L/j, bovins 40 à 85 L/j). Cela correspond à environ 1 à 5 m³/jour de lisier pour un élevage de taille moyenne. (H2orus, no date c)

La composition du lisier brut est reprise dans le Tableau I-4. À noter que le coût de transport du purin est prohibitif. (Witek-Krowiak *et al.*, 2022) Selon (Al-Juboori *et al.*, 2023), la concentration en azote est de 1 à 5,5 g/L.

Tableau I-5 - Composition moyenne du lisier brut (H2orus, no date)

Effluents bruts	
DCO (mg/L)	96.000
DBO5 (mg/L)	53.000
MES (g/L)	33
Azote Kjeld (g/L)	5,6
P (mg/L)	590
pH	5,45

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 6 sur 70

I-2.3. Abattoirs et industries de la viande

Les abattoirs et autres industries de la viande sont des sources très importantes d'azote comme de phosphore. Le Tableau I-6 reprend la concentration des effluents d'abattoirs. Selon (Al-Juboori *et al.*, 2023), la concentration en azote est de 30 à 200 mg/L.

Tableau I-6 - Composition moyenne d'effluents d'abattoirs (H2orus, no date a)

	Effluents bruts	Effluents dégrillés (100 µm)
DCO (mg/L)	78.700	73.000
DBO5 (mg/L)	28.400	26.200
MES (g/L)	29,8	25,2
Azote Kjeld (mg/L)	2680	430
P (mg/L)	790	750
Graisses (g/L)	11,1	11,1

I-2.4. Industries laitières

Les effluents issus de l'industrie laitière sont généralement riches en phosphore. Les Tableau I-7 Tableau I-8 rapportent la composition de différents produits laitiers et effluents de laiteries polyvalentes françaises. Enfin, (Chen *et al.*, 2020) indiquent des concentrations en azote comprises entre **14 et 329 mg_N/L**.

Tableau I-7 - Composition de différents produits laitiers (g/L) (Suez Water Handbook, no date)

	Lait entier		Lait écrémé	Lactosérum	Babeurre
	Vache	Chèvre			
DBO5	90 à 120		50 à 73	34 à 55	60 à 70
Ca	1,25	1,3	1,2		1,2
K	1,5	2			
P	0,95	0,9	0,9	0,8	0,95
Cl	1,1	1,3	1		1
MS	130	114		60 à 45	
Matières Grasses	39	33	0,8	0,5 à 2	3
Matières azotées solubles + protéines	33	29	35	7,9	30
Lactose	47	43	50	47 à 50	44
Acide lactique				2 à 6	1
Cendres (%)	8 à 9	8		5 à 7	

Tableau I-8 - Composition typique moyenne d'effluents de laiterie polyvalentes françaises (Djelal, Rigail and Boyer, 2008)

	Effluents bruts
DCO (mg/L)	950 à 5000
DBO5 (mg/L)	360 à 3200
MES (g/L)	90 à 1040
Azote K. (mg/L)	40 à 90
Phosphore (mg/L)	4 à 20
Sulfites (mg/L)	210 (H2orus, no date b)
Graisses (mg/L)	110 à 800

I-2.5. Brasseries

Les rejets des brasseries proviennent des pertes au remplissage des bouteilles, du nettoyage (bouteilles, cuves, sols), de la filtration du moût et des levures et de l'évacuation des fonds de cuve. Le tableau suivant reprend les caractéristiques principales de ces eaux.

Tableau I-9 - Composition typique d'effluent de brasserie (Suez Water Handbook, no date)

Paramètre	Plage (mg/L)
DBO	1000-1500
DCO	1800-3000
Solides en suspension	10-60
Azote total	30-100
Phosphore total	30-100
pH	3,0-13

I-2.6. Autres secteurs

(Chen *et al.*, 2020) rapportent d'autres valeurs pour les industries suivantes :

- Industrie papetière : 11 à 600 mg_N/L
- Industrie textile : 70 à 80 mg_N/L
- Industrie du vin : 10 à 415 mg_N/L

II. ELIMINATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USEES

Les techniques d'élimination de l'azote ammoniacal contenu dans les eaux usées ont chacune des avantages et des inconvénients techniques et environnementaux. Elles incluent les procédés biologiques, principalement nitrification/dénitrification, mais également la précipitation chimique et l'adsorption.

Le Tableau II-1 reprend les différentes caractéristiques de chacune de ces procédés.

Tableau II-1 - Caractéristiques des procédés d'élimination de l'azote ammoniacal (Zhou et al., 2023)

<i>Procédés</i>	<i>Conditions</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>	<i>Concentrations atteignables</i>	<i>Efficacité d'élimination</i>
<i>Précipitation chimique</i>	pH et température spécifiques	Produit de la struvite	Nécessite l'ajout de réactifs (Mg et P)	29 à 100 mg/L N-NH ₄	20-98%
<i>Adsorption</i>	Large gamme de pH et de température	Simple, fonctionne avec de faibles concentrations en NH ₄ ⁺	Large gamme d'efficacité d'élimination en fonction des adsorbants	1 mg/L N-NH ₄	43-97%
<i>Traitement biologique</i>	Sensibilité à la température	Haute efficacité de dénitrification	Coût élevé, source de carbone requise, ne fonctionne que pour des faibles concentrations en entrée, temps de démarrage long	< 5 mg/L N-NH ₄	70-99,9%

II-1. *Procédés biologiques*

Le procédé principalement utilisé pour l'élimination des composés azotés des eaux usées est la nitrification/dénitrification, décrite ci-dessous. Plusieurs autres procédés d'élimination de l'azote plus avancés et plus respectueux de l'environnement, tels que le procédé Anammox, sont également présentés dans les sections suivantes.

Le schéma de la Figure II-1 montre les réactions principales intervenant dans ces différents procédés.

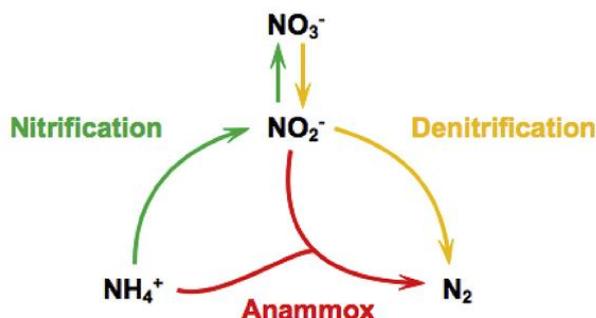


Figure II-1 - Différentes étapes intervenant dans les procédés d'élimination de l'azote des eaux usées.
(Dai et al., 2019)

II-1.1. Nitrification/dénitrification

Dans ce procédé, l'azote organique ammonifiable (protéines, acides aminés, urée) subit tout d'abord une hydrolyse enzymatique par des enzymes ou des bactéries ammonifiantes et est converti en ammonium : c'est l'ammonification.

Ensuite vient la nitrification au cours de laquelle l'ammonium est oxydé en nitrite par des bactéries autotrophes spécifiques en présence d'oxygène. Ensuite, vient l'étape de la nitrification où les nitrites sont oxydés en nitrates par d'autres bactéries spécifiques. Ces bactéries utilisent l'oxydation de l'ammonium pour satisfaire leurs besoins en énergie.

Enfin vient l'étape de la dénitrification en conditions anoxiques par des bactéries hétérotrophes, en présence de substrat carboné, où les nitrates sont d'abord réduits en nitrites, puis en monoxyde d'azote NO , en protoxyde d'azote N_2O et enfin en diazote N_2 . Ces composés jouent le rôle d'accepteur d'électrons (=oxydant) dans l'oxydation de la matière organique en absence d'oxygène. La réaction peut être incomplète et s'arrêter à la formation de N_2O . À noter que le substrat organique servant de donneur d'électron dans les réactions d'oxydoréductions pourrait être remplacé par de l'hydrogène ou encore par une cathode (i.e. pile à combustible).

Les principaux désavantages de ce procédé sont la consommation d'énergie pour l'oxydation des nitrites, de substrat organique pour la réduction des nitrates (problématique si la concentration en DCO de l'eau traitée est trop faible), ainsi que la production de N_2O lors de la dénitrification.

(Beckinghausen *et al.*, 2020) ont estimé que l'énergie requise pour l'aération pour la nitrification est de 0,5 kWh/kg O_2 consommé. Cela correspond typiquement à 40% de l'énergie requise pour l'aération nécessaire à l'élimination de la matière organique.

L'énergie primaire requise pour capter le diazote par le procédé Haber-Bosch est de l'ordre de 37 à 45 MJ/kg N (Beckinghausen *et al.*, 2020). Le procédé de nitrification/dénitrification requiert environ 42,2 à 45 MJ/kg N. Ainsi le coût énergétique total pour la fixation de l'azote et son élimination peut atteindre 90 MJ/kg N.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 10 sur 70

Le ratio DCO/N a une très grande influence sur l'élimination de l'azote car il y a une compétition entre les différentes souches de micro-organismes pour la consommation de la matière organique.

La plupart des grandes stations d'épuration européennes (> 100.000 EH) qui utilisent le procédé par boue activée disposent d'un système de nitrification/dénitrification selon deux grands types de mise en œuvre :

- système à anoxie de tête : les nitrates provenant de l'oxydation de l'azote ammoniacal en dans le bassin d'aération sont partiellement recyclés vers un bassin anoxique en tête de station où se déroule la dénitrification ;
- système à alternance de phase : réacteurs séquentiels, alternant les phases aérées (nitrification) et non aérées/anoxiques (dénitrification).

II-1.2. Nitritation/Dénitritation (nitrification partielle)

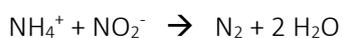
Il s'agit d'une technologie plus avancée où la nitrification est partielle et s'arrête à la formation des nitrites, ce qui réduit la consommation énergétique liée à l'oxygénation. Ensuite, les nitrites sont directement réduits en diazote, ce qui réduit les besoins en substrat organique de 40%.

Ces réactions se font en conditions d'aération contrôlée, qui sont ainsi réduites de 25%, ce qui induit 60% d'économies sur l'énergie.

La quantité de boues produites est également réduite tout comme la quantité de CO₂. La concentration finale en azote résiduaire est également plus importante. (Mozumder and Hossain, 2020) (Rosenwinkel *et al.*, 2009)

II-1.3. Procédé Anammox

Le procédé Anammox (pour Anaerobic Ammonium Oxidation) consiste à oxyder les ions ammonium en condition anaérobies à l'aide de nitrites comme accepteur d'électrons et de CO₂ comme source de carbone :



Ce procédé se déroule ainsi en deux étapes : la nitritation contrôlée pour la production de nitrites et ensuite la conversion de l'ammonium et des nitrites en diazote par les bactéries Anammox. La consommation en oxygène est ainsi réduite de 50%. L'ajout de substrat organique n'est généralement pas requis pour ce procédé.

La consommation énergétique est réduite en comparaison au procédé de nitrification/dénitrification. Les émissions de N₂O sont aussi largement réduites car il n'y a pas d'étape de dénitrification. Ainsi, le « potentiel de réchauffement climatique » lié au procédé Anammox, n'est que de 40% relativement au procédé conventionnel de nitrification/dénitrification.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 11 sur 70

Dans le cas du procédé Anammox, l'énergie requise pour éliminer l'azote est de l'ordre de 3,1 à 16 MJ/kg N. Ainsi le coût énergétique total pour la fixation/élimination de l'azote est de l'ordre de 61 MJ/kg N.

Un point négatif est la croissance des micro-organismes Anammox qui est relativement lente. (Mozumder and Hossain, 2020) (Rosenwinkel *et al.*, 2009) (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

II-1.4. Procédé CANON

Il s'agit d'une amélioration du procédé Anammox où la réaction Anammox et la nitrification se déroulent dans un même réacteur grâce à la présence de biofilms ou de granules de biomasse dont l'intérieur est en condition anaérobie et l'extérieur en condition anoxique. L'aération est contrôlée de manière à former des nitrites qui diffusent vers l'intérieur des granules où ils réagissent avec les ions ammonium pour former du diazote.

La consommation en oxygène est réduite de 62,5%, il n'y a pas besoin d'ajouter de substrat carboné, et les coûts sont réduits. En revanche le système est sensible aux conditions opératoires. (Mozumder and Hossain, 2020)

II-2. Procédés physicochimiques

Les procédés physicochimiques d'élimination de l'azote des eaux usées cités ci-dessous sont plutôt indiqués à titre informatif sachant que la majorité des procédés utilisés sont des procédés de dénitrification biologique.

II-2.1. Précipitation chimique

La précipitation chimique par formation de struvite ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) a été initialement réalisée dans le but d'éviter les dépôts incrustants de ce minéral dans les installations d'eaux usées, en particulier en aval des digesteurs. Aujourd'hui il s'agit plutôt d'une technique utilisée pour récupérer l'azote plutôt que de l'éliminer. Toutefois cette technique est prioritairement mise en œuvre pour récupérer le phosphore. Un ajout de réactif est nécessaire pour atteindre le rapport stœchiométrique 1 :1 :1 des ions (Mg^{2+} , PO_4^{3-} et NH_4^+). Généralement du chlorure de magnésium est ajouté mais également du phosphate (sous forme d' Na_2HPO_4) si l'on souhaite une élimination poussée de l'azote, ce qui est contreproductif en cas d'élimination conjointe azote/phosphore.

Comparativement aux autres méthodes, la précipitation chimique est simple et directe, en plus de générer un produit pouvant être réutilisé. Toutefois, les coûts opératoires sont élevés à cause des réactifs à ajouter et de la consommation énergétique. De plus, la concentration finale atteignable dépend de la concentration des autres ions en solution et peut ne pas être suffisamment basse. Une technique supplémentaire peut donc être utilisée en complément, telle que l'adsorption. (Zhou *et al.*, 2023)

La section III-3.1 traite de ce sujet plus en détail.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 12 sur 70

II-2.2. Adsorption et échange d'ions

L'adsorption est une technique largement utilisée pour sa flexibilité en termes de conception et d'opération, pour sa grande efficacité (fonction de l'adsorbant), de la réutilisabilité des adsorbants, du faible impact environnemental et du coût relativement faible des adsorbants. La clinoptiolite est une zéolithe particulièrement adaptée aux ions ammonium. Des résines échangeuses d'ions peuvent être aussi utilisées mais sont moins sélectives.

Les facteurs influençant l'adsorption des ions NH_4^+ incluent le pH, le temps de contact et les ions concurrents dans la solution. Le pH joue un rôle central : l'adsorption de NH_4^+ atteint un optimum dans des conditions neutres en évitant la concurrence des ions H^+ dans les milieux acides et la diminution de la concentration en NH_4^+ dans des milieux basiques par déplacement de l'équilibre vers NH_3 . L'optimum de pH se trouve entre 6 et 8 pour différents adsorbants, tels que les zéolithes et les zéolithes modifiées.

Les inconvénients de l'adsorption comprennent la complexité de la régénération de l'adsorbant, le besoin d'une plage de pH spécifique et la capacité d'adsorption insuffisante des adsorbants courants. De plus, les adsorbants ont une durée de vie courte et nécessitent un remplacement constant, générant des déchets qui nécessitent un traitement supplémentaire à un coût supplémentaire. (Zhou *et al.*, 2023)

Cette section est plus détaillée aux points III-4.3.

III. TECHNOLOGIES DE RÉCUPÉRATION DE L'AZOTE

Le Tableau III-1 évalue le niveau de maturité des technologies pour différents produits récupérés des eaux usées pour différents pays en 2019. Il peut être remarqué que la récupération de l'azote est particulièrement développée en Allemagne. En 2019, les pilotes étaient particulièrement développés en France, au Luxembourg, aux Pays-Bas et aux Royaume-Unis. En revanche, rien n'était développé en Belgique. (WOW! State of the art report, 2019)

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 13 sur 70

Tableau III-1 - Niveau de maturité technologique pour différents produits récupérés à partir des eaux usées pour différents pays (WOW! State of the art report, 2019)

\ Country	DE	FR	NL	UK	BE	LU
Value chain \						
Power (biogas)						
Heat (WWTP)						
Heat (sewer system)						
Phosphorus						
Nitrogen						
Extrapolymers						
Cellulose						
PHA						
Lipid						
Pyrolysis						

	no application
	lab scale (TRL 1-4)
	pilot scale (TRL 5-7)
	large scale (TRL 8-9)

Différentes technologies de récupération de l'azote sont présentées dans cette section. Le schéma repris à la

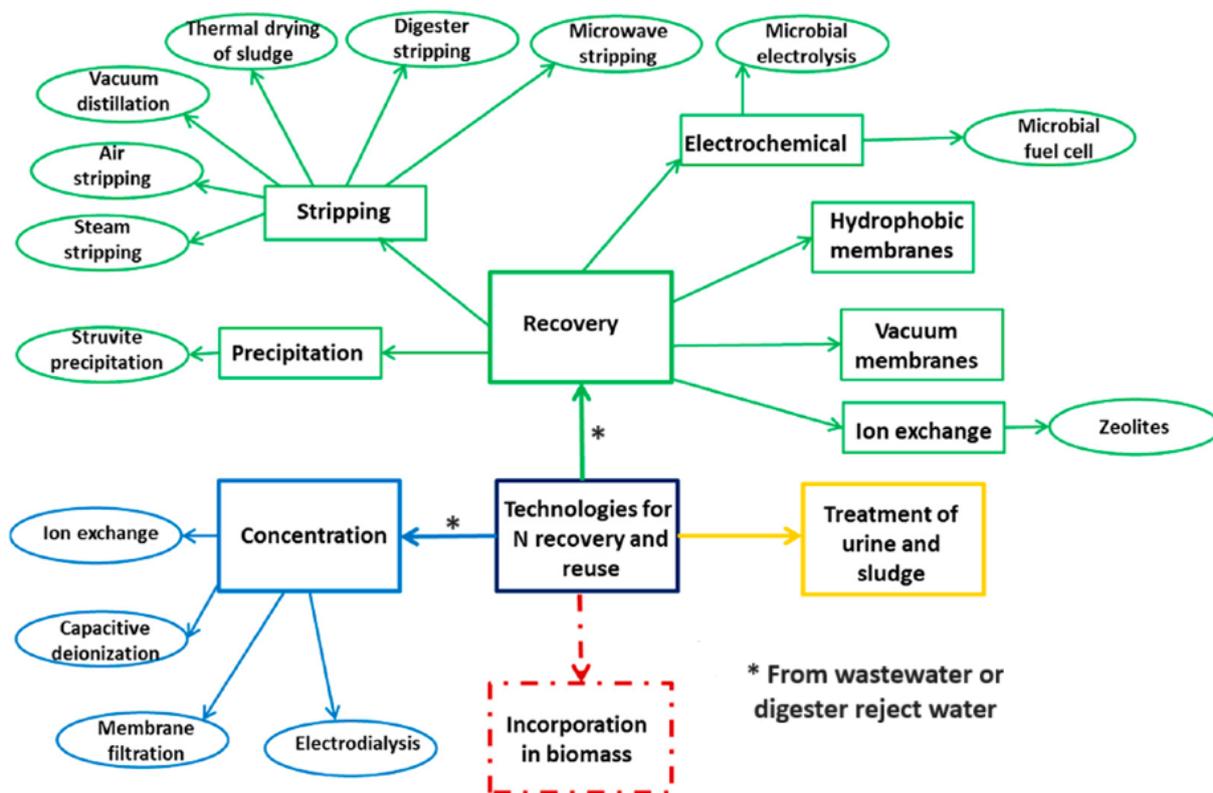


Figure III-1 : Différentes technologies de récupération et de réutilisation de l'azote. Basé sur (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

classe les technologies de récupération l'azote en 4 catégories (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018) :

- Les technologies qui permettent la récupération directe de l'azote au départ des eaux usées ou des effluents de digesteur ;
- Les technologies de concentration de l'azote pour améliorer l'efficacité des technologies de récupération de l'azote ;
- Les technologies appliquées à l'urine et aux boues ;
- Les technologies qui consistent à incorporer l'azote dans la biomasse, non développées ici.

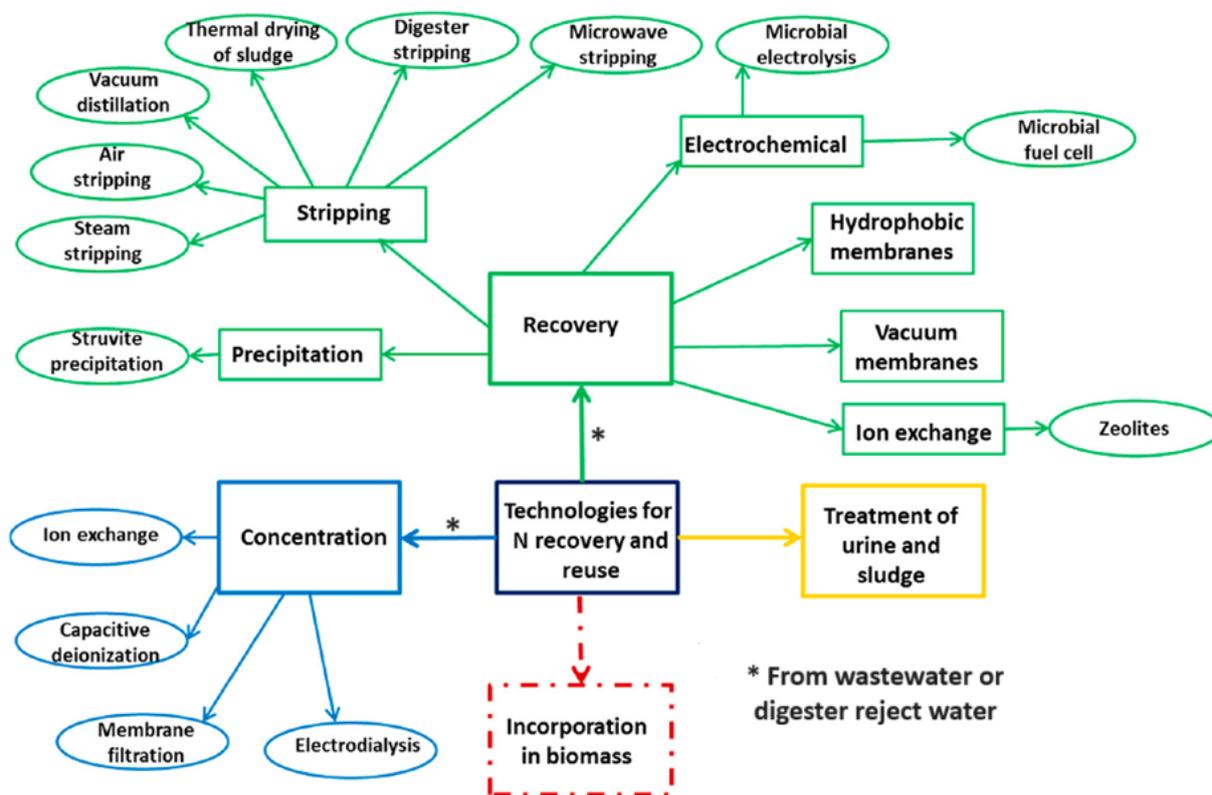


Figure III-1 : Différentes technologies de récupération et de réutilisation de l'azote. Basé sur (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

D'après la revue d'une centaine d'articles scientifiques, le stripping de l'ammoniac est la technologie industrielle la plus utilisée. D'autres technologies sont en cours de développement et certaines sont opérationnelles à l'échelle industrielle, telles que les technologies membranaires, l'échange d'ions et d'autres technologies innovantes. Malgré cela, il reste encore de nombreux problèmes à surmonter et des essais à réaliser sur des sites (fermes, stations d'épuration) et à faire fonctionner au quotidien. (European Sustainable Phosphorus Platform 2, 2023)

Afin de déterminer le niveau de durabilité des différentes technologies de récupération et de réutilisation de l'azote dans les sections ultérieures, une comparaison de l'énergie requise pour produire et éliminer l'azote et du potentiel de réchauffement global se base sur les valeurs issues de la section précédente (point II-1) : (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018) :

- Le coût énergétique total pour la fixation de l'azote (procédé Haber-Bosch) et son élimination dans le cas de la nitrification/dénitrification conventionnelle est de 90 MJ/kg N

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 16 sur 70

- Le coût énergétique total pour la fixation de l'azote (procédé Haber-Bosch) et son élimination dans le cas du procédé Anammox est de 61 MJ/kg N, qui sert de valeur de référence à ce rapport
- Le procédé Anammox émet très peu de N₂O comparativement au procédé conventionnel de nitrification/dénitrification. Son « potentiel de réchauffement global » est estimé à 40% de celui du procédé conventionnel et servira de valeur de référence à ce rapport.

Les mêmes auteurs comparent les besoins énergétiques des technologies de récupération avec les techniques classiques d'élimination de l'azote (Tableau VIII-3 en annexe)

Tableau III-2 reprend un ensemble de critères suggérés par (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018) pouvant être utilisés pour évaluer les technologies sur base de leur consommation énergétique globale et de leur empreinte environnementale (N₂O) en comparaison au procédé Anammox. Ceux-ci sont appliqués au Tableau III-3 pour les technologies reprises à la Figure III-1. Ces données ont été fournies dans le cadre d'une étude réalisée sur la station d'épuration Amsterdam-West. Plusieurs technologies ont ainsi été sélectionnées comme indiqué dans le Tableau IV-4 (page 49).

Le bilan énergétique n'est pas en faveur de la récupération d'azote par rapport au procédé Haber-Bosch, sauf dans les cas de la récupération par technique membranaire sur l'effluent brut ou de la collecte sélective de l'urine. Néanmoins, dans ce dernier cas, la nécessité de mettre en place une infrastructure spécifique de collecte rend l'application à grande échelle difficilement envisageable.

Concernant les émissions de N₂O, seule la collecte et le traitement séparé de l'urine, en permettant d'éviter 60% de la charge en azote entrant dans la station d'épuration, s'avère efficace. Les autres techniques sélectionnées (stripping à l'air, struvite, membranes hydrophobiques, membranes à vide) sont adaptées uniquement à la phase aqueuse du digestat, en aval du traitement de l'eau et ne permettent de récupérer qu'au maximum 27% de la charge entrante en azote sans effet significatif sur les émissions de N₂O.

La sélection doit donc se faire sur les autres critères : forme de l'azote récupéré, maturité de la technologie et adaptation aux caractéristiques du flux ciblé.

(Beckinghausen *et al.*, 2020) synthétisent une revue des technologies à l'échelle pilote ou laboratoire (Tableau VIII-2 en annexe) selon les caractéristiques suivantes :

- Substrat utilisé et ses caractéristiques (pH, teneur en azote total, en ammonium)
- Taux d'abattement et de récupération de l'azote
- Forme sous laquelle l'azote est récupéré
- Degré de maturité
-

Les mêmes auteurs comparent les besoins énergétiques des technologies de récupération avec les techniques classiques d'élimination de l'azote (Tableau VIII-3 en annexe)

<p>RESRECOVERY</p> <p>PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES</p>	<p>PR2301553_240926_Azote</p>
	<p>Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD</p>
	<p>Page 17 sur 70</p>

Tableau III-2 - Critères de sélection pour le choix d'une technologie de récupération de l'azote (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

Durabilité		Récupération de l'azote sous une forme utilisable		Maturité de la technologie		Gamme de concentration acceptable	
+	Besoins énergétiques plus faibles ET émissions de N ₂ O plus faibles	++	Produit spécifique	++	Technologie mature	+	Concentration comprise entre 60 (eaux usées) et 8800 mg/L (urine) et capable de traiter de grandes quantités
		+	Flux concentré séparé des eaux usées	+	Disponible sur le marché		
+/-	Besoins énergétiques plus faibles OU émissions de N ₂ O plus faibles	+/-	Eaux usées concentrées	+/-	Installation pilote fonctionnelle		
-	Besoins énergétiques plus élevés ET émissions de N ₂ O plus élevées	-	Transfert sous forme de N ₂ mais avec récupération d'énergie	-	Concept validé	-	Concentration non comprise entre 60 (eaux usées) et 8800 mg/L (urine) et/ou incapable de traiter de grandes quantités
		--	Transfert sous forme de N ₂	--	Phase conceptuelle		

Tableau III-3 - Sélection des technologies pour la récupération de l'azote et sa réutilisation (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

Technologie	Durabilité (énergie et N ₂ O)		Récupération de l'azote sous une forme utilisable		Maturité de la technologie		Gamme de concentration acceptable		
<i>Filtration par membrane</i> III-4.2	+	-	Appliquée sur les eaux usées brutes, tout l'azote n'est pas éliminé, il reste toujours une charge en N. Appliquée sur l'effluent secondaire, le traitement biologique qui précède reçoit toujours la charge complète en N.	+-	L'azote est concentré dans le concentrat (RO) ou dans le perméat (UF)	++	largement appliquée, notamment dans le traitement de l'eau potable. TRL 9	+	Les concentrations dans la plage de 60 à 8 800 mg/l peuvent être traitées.
<i>Déionisation capacitive</i> III-4.2.4. 1)	-		Appliquée après un traitement biologique principal qui reçoit toujours la charge complète en N.	+-	La concentration en azote est augmentée, l'azote n'est pas séparé.	-	Proof of concept TRL 3	+	Les concentrations dans la plage de 60 à 8 800 mg/l peuvent être traitées.
<i>Précipitation de struvite</i> III-3.1	-		La technologie est appliquée sur les boues résiduelles et n'affecte pas le système de traitement des eaux usées.	++	struvite pouvant être utilisé comme engrais.	++	TRL 9	+	Les concentrations après la digestion des boues ont des valeurs telles que la struvite peut être formée.
<i>Stripping à la vapeur</i> III-4.1.2. III-4.1.2. b	-		L'application sur l'eau de rejet du digesteur a un effet limité sur la charge en azote du système de traitement des eaux usées (max. 27 %).	++	En lavant à l'acide, l'ammoniac peut être récupéré sous forme de sulfate d'ammonium ou de nitrate d'ammonium.	+-	TRL 9 mais son applicabilité dans les eaux usées n'est pas connue.	-	Le stripping à la vapeur est particulièrement appliqué à des concentrations très élevées, supérieures à 8 800 mg/l.

<i>Technologie</i>	<i>Durabilité (énergie et N₂O)</i>		<i>Récupération de l'azote sous une forme utilisable</i>		<i>Maturité de la technologie</i>		<i>Gamme de concentration acceptable</i>	
<i>Stripping à l'air III-4.1.2. a</i>	-	L'application sur l'eau de rejet du digesteur a un effet limité sur la charge en azote du système de traitement des eaux usées (max. 27 %).	++	En lavant à l'acide, l'ammoniac peut être récupéré sous forme de sulfate d'ammonium ou de nitrate d'ammonium.	+	Pas encore appliqué dans les eaux usées, mais des technologies sont sur le marché pour le stripping à l'air des lisiers.	+	Le stripping à l'air peut être appliqué sur l'eau de rejet du digesteur.
<i>Distillation sous vide III-4.1.2. f</i>	-	L'application sur l'eau de rejet du digesteur a un effet limité sur la charge en azote du système de traitement des eaux usées (max. 27 %).	++	L'ammoniac peut être récupéré sous forme de sulfate d'ammonium ou de nitrate d'ammonium.	-	TRL 3	+	La distillation sous vide peut être appliquée sur l'eau de rejet du digesteur.
<i>Séchage thermique des boues avec traitement ultérieur de l'air III-4.1.2. e</i>	-	La technologie est appliquée sur les boues résiduelles et n'affecte pas le système de traitement des eaux usées.	++	L'ammoniac peut être récupéré sous forme de sulfate d'ammonium ou de nitrate d'ammonium.	++	TRL 9 appliquée en pratique aux Pays-Bas.	+	Les concentrations dans la plage de 60 à 8 800 mg/l peuvent être traitées.
<i>Stripping de digesteur III-4.1.2. c</i>	-	Le stripping dans le digesteur a un effet limité. Au maximum, la charge du système de traitement des eaux usées est réduite de 27 % (teneur en azote de l'eau de rejet du digesteur).	++	L'ammoniac peut être récupéré sous forme de sulfate d'ammonium ou de nitrate d'ammonium.	-	TRL 3	+	La quantité d'azote dans les boues est décisive, pas la concentration dans la phase aqueuse.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 20 sur 70

Technologie	Durabilité (énergie et N ₂ O)		Récupération de l'azote sous une forme utilisable		Maturité de la technologie		Gamme de concentration acceptable	
<i>Stripping par micro-ondes</i> III-4.1.2. d	-	L'application sur l'eau de rejet du digesteur a un effet limité sur la charge en azote du système de traitement des eaux usées (max. 27 %).	++	L'ammoniac peut être récupéré sous forme de sulfate d'ammonium ou de nitrate d'ammonium.	+	TRL 5	+	Le stripping par micro-ondes devrait être possible sur l'eau de rejet du digesteur.
<i>Électrodialyse</i> III-4.2.4. 2)	-	L'application sur l'eau de rejet du digesteur a un effet limité sur la charge en azote du système de traitement des eaux usées (max. 27 %).	+	La technologie donne un flux d'ammonium concentré, séparé des eaux usées.	+/-	TRL 5	+	Plus la concentration est élevée, plus le processus est efficace, mais la technologie est efficace dans la plage de 60 à 8 800 mg/l.
<i>Électrolyse micro-bienne</i> III-5.1	-	L'application sur l'eau de rejet du digesteur a un effet limité sur la charge en azote du système de traitement des eaux usées (max. 27 %).	++	Dans cette technologie, une solution d'ammonium concentrée est produite, séparée du flux d'eaux usées.	-	TRL 3	+	La technologie est applicable dans la plage de concentration de 60 à 8 800 mg/l.
<i>Pile à combustible microbienne</i> III-5.1	-	L'application sur l'eau de rejet du digesteur a un effet limité sur la charge en azote du système de traitement des eaux usées (max. 27 %).	++	Dans cette technologie, une solution d'ammonium concentrée est produite, séparée du flux d'eaux usées.	-	TRL 3	+	La technologie est applicable dans la plage de concentration de 60 à 8 800 mg/l.

Technologie	Durabilité (énergie et N ₂ O)		Récupération de l'azote sous une forme utilisable		Maturité de la technologie		Gamme de concentration acceptable	
Membranes hydrophobes III-4.2.5.	-	L'application sur l'eau de rejet du digesteur a un effet limité sur la charge en azote du système de traitement des eaux usées (max. 27 %).	++	Avec cette technologie, du sulfate d'ammonium ou du nitrate d'ammonium peuvent être produits.	+	TRL 2 Les membranes hydrophobes ne sont pas encore appliquées, bien que les fabricants affirment que la technologie est disponible.	+	La technologie est applicable dans la plage de concentration de 60 à 8 800 mg/l.
Membranes sous vide Erreur ! Source du renvoi introuvable.	-	L'application sur l'eau de rejet du digesteur a un effet limité sur la charge en azote du système de traitement des eaux usées (max. 27 %).	++	Avec cette technologie, du sulfate d'ammonium ou du nitrate d'ammonium peuvent être produits.	+	TRL 2 Les membranes sous vide ne sont pas encore appliquées, bien que les fabricants affirment que la technologie est disponible.	+	La technologie est applicable dans la plage de concentration de 60 à 8 800 mg/l.
Échange d'ions III-4.3	-	L'application sur l'eau de rejet du digesteur a un effet limité sur la charge en azote du système de traitement des eaux usées (max. 27 %).	++	Les zéolithes avec de l'azote adsorbé peuvent être utilisées comme engrais.	+	TRL 9 (zéolithes)	-	Pour adsorber tout l'azote dans le traitement des eaux usées, beaucoup de matériau est nécessaire.

Technologie	Durabilité (énergie et N ₂ O)		Récupération de l'azote sous une forme utilisable		Maturité de la technologie		Gamme de concentration acceptable	
<i>Traitement de l'urine</i> <i>III-1</i>	+-	En collectant séparément l'urine, la charge en N du système de traitement des eaux usées peut être réduite de 80 % : la demande en énergie est inférieure à la référence, mais du N ₂ O sera toujours émis.	++	L'urée de l'urine peut être utilisée comme engrais.	+	LTRL 4 'urine est un engrais bien connu en agriculture. Des technologies pour traiter l'urine sont disponibles.	+	Le traitement de l'urine est possible dans la plage de concentration de 60 à 8 800 mg/l.
<i>Réutilisation des boues</i> <i>III-2</i>	-	La technologie est appliquée sur les boues résiduelles et n'affecte pas le système de traitement des eaux usées.	++	Les boues sont un engrais azoté organique et peuvent être utilisées en agriculture.	+-	Expérience limitée avec le traitement des boues (élimination des métaux lourds) avant qu'elles puissent être utilisées comme engrais.	+	La concentration n'est pas pertinente pour cette technologie.

L'azote récupéré se présente majoritairement sous forme de solution aqueuses d'ammonium, relativement diluées. Il s'agit d'un problème significatif car le transport rend l'ammonium peu rentable, en plus de la dispersion des différents sites. La concentration maximale de solutions dites « concentrées » est de 8%N/kg pour le sulfate d'ammonium et de 15%N/kg pour le nitrate d'ammonium¹, ce qui est faible en comparaison à la concentration en azote dans l'urée pouvant aller jusqu'à 46%N/kg. (European Sustainable Phosphorus Platform 2, 2023)

De plus, la plupart des substrats utilisés pour la récupération de l'azote (digestats, lisier,...) sont sous forme liquide, ce qui ne rend pas le transport rentable sur de longues distances. Cela signifie que la récupération de l'azote doit se faire de manière locale et donc dans de petites installations. (European Sustainable Phosphorus Platform 2, 2023)

III-1. Récupération de l'azote de l'urine

L'urine représente environ 80% de la charge totale en azote dans les eaux usées (principalement sous forme d'urée), malgré un volume de l'ordre de 1% du total des eaux usées. La collecte séparée de l'urine s'avère donc être le point de départ idéal pour la récupération des nutriments, par exemple sous forme de struvite. Cependant, ce procédé nécessite la mise en place d'un système de collecte d'urine spécifique. Malgré le fait qu'elle soit utilisable directement comme engrais, le transport de l'urine liquide est coûteux. Elle ne contient que 10 à 15% des nutriments présents dans le fumier animal, dont le transport de ce dernier impacte déjà fortement la rentabilité de la récupération des nutriments. De plus, pour obtenir une solution nutritive exempte de micropolluants et adaptée à une utilisation en tant qu'engrais, il est impératif de séparer les composés pharmaceutiques et œstrogéniques des sels contenus dans l'urine. (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

III-2. Concentration et valorisation biologique de l'azote

III-2.1. Utilisation directe des boues de stations d'épuration

Les boues de traitement des eaux usées peuvent être utilisées comme engrais biologique riche en phosphore, contenant en outre de l'azote et des composés organiques. (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

Les boues de stations d'épuration peuvent contenir des quantités significatives de polluants organiques potentiellement dangereux (comme les hydrocarbures aromatiques ou les PFAS), des métaux lourds, des produits pharmaceutiques, en plus des pathogènes retrouvés dans les eaux usées (virus, bactéries, parasites). Certaines de ces substances peuvent être phytotoxiques, et/ou toxiques pour les humains ou les animaux. (Zhou, Hinkelmann and Barjenbruch, 2017) De plus, les boues non traitées (par compostage par exemple) ne sont pas stabilisées et sont à l'origine d'odeurs.

¹ On notera que le N du nitrate, qui représente la moitié du N, provient de l'acide nitrique utilisé pour le scrubbing et non de des eaux usées.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 24 sur 70

La législation est de plus en plus stricte par rapport à l'utilisation des boues d'épuration comme engrais, en particulier en ce qui concerne la définition des concentrations maximales autorisées de métaux lourds dans les boues entrant dans le sol. La Suisse interdit d'ailleurs l'épandage des boues de stations d'épuration en agriculture. (Melia *et al.*, 2017) Les technologies de traitement des boues et de récupération indirecte du phosphore sont donc de plus en plus couramment utilisées. Malgré cela, les boues d'épuration restent souvent utilisées directement comme engrais, en particulier dans les pays en voie de développement, principalement en raison du manque d'accès et de ressources pour l'incinération des boues d'épuration ou les technologies chimiques de récupération du phosphore. (Salkunić, Vuković and Smiljanić, 2022)

De plus, le transport et la gestion des boues fortement hydratées (généralement au-dessus de 50 % H₂O) peuvent représenter 25 à 65 % des coûts opérationnels d'une station. (Salkunić, Vuković and Smiljanić, 2022) Il s'agit là en plus d'une opération assez difficile car elles sont volumineuses et denses. La déshydratation permet de réduire les coûts de transport et les difficultés d'application, mais le coût énergétique est important.

III-2.2. Compostage (digestion aérobie)

Le procédé le plus simple utilisé pour le traitement des déchets d'origine biologique est le compostage. (Witek-Krowiak *et al.*, 2022) Contrairement aux boues brutes, le compost formé est un produit facile à manipuler, stabilisé (ne génère pas ou peu d'odeurs, quasiment dénué d'organismes pathogènes). (Syndicat Mixte Recyclage Agricole du Haut-Rhin, 2018) Toutefois, ce traitement n'élimine pas les métaux toxiques et autres polluants persistants.

Ce procédé réduit également le volume et la quantité d'eau dans le matériau, mais il induit des pertes significatives d'azote sous forme d'ammoniac (79% à 94% des pertes totales en azote). De plus, la nitrification et dénitrification naturelle induit également l'émission de N₂O (0,2% à 9,9% des pertes totales en azote). (Shan *et al.*, 2021) Selon (European Sustainable Phosphorus Platform, 2023), les trois quarts de l'azote sont perdus dans l'atmosphère lors du compostage sous forme d'ammoniac. De plus, à peine 6% de l'azote contenu dans le compost est disponible la première année après application sur les sols (16% après 3 ans), comparé au digestat, qui lui permet une disponibilité de l'azote de 65% la première année (75% après 3 ans).

Le schéma repris à la Figure III-2 montre les différentes étapes de transformation de la matière azotée lors du compostage.

<p style="text-align: center;">RESRECOVERY</p> <p style="text-align: center;">PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES</p>	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 25 sur 70

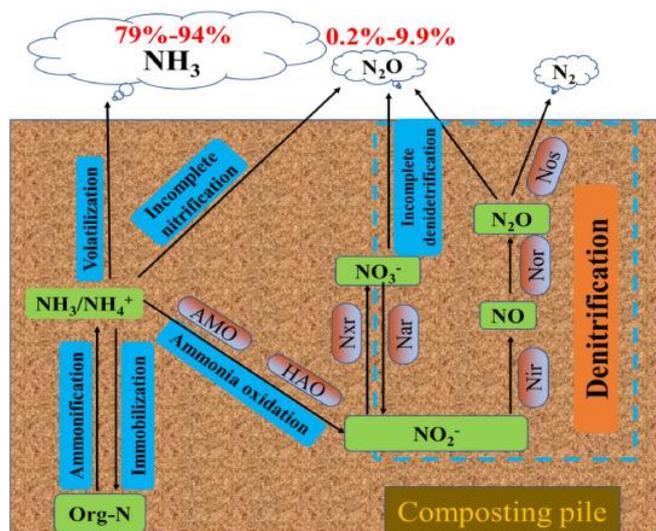


Figure III-2 - Procédés de conversion de la matière azotée lors du compostage (Shan et al., 2021)

Il ne s'agit donc pas d'un procédé adapté à la récupération de l'azote, contrairement au phosphore. Certains chercheurs ont suggéré l'ajout d'additifs anti-nitrification pour éviter l'émission de N_2O (jusqu'à 50%), ou encore la modification du pH, l'ajout d'adsorbants, l'ajout de réactifs et d'autres techniques pour retenir l'ammoniac (jusqu'à 50%). (Shan et al., 2021)

III-2.3. Digestion anaérobie

La digestion anaérobie permet de convertir l'azote sous forme organique en ammoniac soluble. Elle permet également de réduire le volume des boues, de les stabiliser, de produire du biogaz et d'augmenter la libération des nutriments qui sont ainsi plus facilement récupérables. En effet, 24 à 50% de l'azote lié est libéré sous forme d'ammonium. Les principales limitations sont le temps de résidence élevé (généralement 20 à 30 jours) et la lente réduction de volume des solides (20 à 50%), lié généralement à une lente hydrolyse de cette fraction solide. (Segura et al., 2023) (Witek-Krowiak et al., 2022)

Comme indiqué dans la section précédente, l'azote contenu dans le jus de digestion épandu en agriculture est disponible à hauteur de 65% la première année (75% après 3 ans). (European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

La majorité des métaux toxiques sont retenus dans le digestat (solide) par précipitation avec les sulfures générés in situ, tout comme certains produits pharmaceutiques non dégradés qui sont retenus dans la phase solide par adsorption. De plus, ces boues se filtrent beaucoup plus facilement que les boues non digérées. (Melia et al., 2017)

III-2.4. Prétraitement par hydrolyse des boues

La digestion anaérobie libère les nutriments, mais de manière incomplète. Afin d'augmenter la quantité de nutriments libérés (et donc le potentiel de récupération), de réduire le temps de digestion et d'accroître la désintégration des matières solides, le prétraitement par hydrolyse peut se montrer très

<p>RESRECOVERY</p> <p>PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES</p>	<p>PR2301553_240926_Azote</p>
	<p>Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD</p>
	<p>Page 26 sur 70</p>

efficace. Plusieurs techniques sont efficaces, telles que l'hydrolyse thermique, chimique, mécanique ou encore des méthodes combinées. En particulier, l'hydrolyse thermique, en soumettant les boues à des températures entre 100 et 200°C pendant un quart d'heure, sous pression (chauffage à volume constant), a démontré son efficacité dans l'amélioration des performances de la digestion anaérobie, en réduisant le temps de digestion de 10 jours. (Segura *et al.*, 2023)

III-2.5. Lagunage

L'assimilation biologique par les plantes dans les lagunages permet de capturer l'azote à hauteur de 83 à 87%, en plus du phosphore (70 à 85%). (Sengupta, Nawaz and Beaudry, 2015)

Ces plantes peuvent ensuite être collectées pour être digérées et ensuite récupérer l'azote.

Il s'agit toutefois d'un procédé utilisé pour l'épuration de l'eau et donc l'élimination de l'azote plutôt que pour sa récupération.

III-3. Précipitation et cristallisation

III-3.1. Production de struvite

La struvite, ou phosphate de magnésium et d'ammonium hexahydraté ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), est un minéral blanc qui peut se former naturellement dans les stations d'épuration des eaux usées, provoquant notamment des problèmes de colmatage en raison de son dépôt dans des endroits indésirables tels que les pompes, les aérateurs et les tuyaux. L'élimination de ces dépôts est d'ailleurs très coûteuse. La struvite peut également être formée volontairement dans des conditions contrôlées dans des réacteurs de cristallisation, produisant de petits granules plus faciles à manipuler et en limitant ainsi les dépôts indésirables.

La précipitation par formation de struvite est le procédé le plus employé et le plus étudié à partir de différents substrats et dans différents réacteurs. Il s'agit d'ailleurs du seul procédé de cristallisation utilisé à l'échelle industrielle. Toutefois, ce procédé est utilisé principalement pour la récupération du phosphore, car il permet d'en récupérer 80 à 90%, alors que la récupération de l'azote sous forme d'ammonium ne se fait qu'à hauteur de 30% seulement, le phosphore étant généralement l'élément limitant d'un point de vue stœchiométrique. (Chrispim, Scholz and Nolasco, 2019) Pour obtenir une récupération élevée de l'azote, un ajout de sel de phosphates serait nécessaire. (Beckinghausen *et al.*, 2020) D'ailleurs, l'installation de traitement des eaux usées d'Amsterdam-West ne permet que de récupérer 1,1% de la charge totale en azote entrant dans la station d'épuration (voir IV-1).

La formation de struvite aux pH habituellement rencontrés (entre 7 et 11) se déroule via cette équation :



À noter que l'azote ne représente que 6% de la masse de la struvite.

Plusieurs paramètres influent sur ce procédé :

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 27 sur 70

- Ratio Mg:N:P, qui doit être idéalement entre 1:1:1 et 2:1:1 (généralement 1,3:1:1)
- pH : entre 8,5 et 9
- Température
- Qualité du mélange
- Concentration en Mg^{2+}
- Ensemencement
- Présence d'ions concurrents (Ca^{2+})
- Matière organique

Dans le cas où l'on souhaiterait privilégier la récupération de l'azote plutôt que du phosphore, le ratio Mg :N :P doit être plutôt égal à 1,2 :1 :1,2. Dans ce cas, du phosphore doit être ajouté sous forme de NaH_2PO_4 , qui ne sera ensuite pas totalement récupéré. Avec ce ratio, l'azote ammoniacal est récupéré à plus de 95%. (Zhou *et al.*, 2023)

La formation de struvite dépend principalement du pH, de la concentration de magnésium et de la présence d'autres ions concurrents tels que le calcium dans la solution principale. Souvent, le magnésium est l'élément limitant dans les flux d'eaux usées, et il est ajouté au processus sous forme de $MgCl_2$, $Mg(OH)_2$ ou MgO pour garantir une concentration stœchiométrique. On ajoute généralement de l'hydroxyde de sodium pour maintenir le pH adéquat car la faible solubilité de MgO et de $Mg(OH)_2$ limite leur utilisation.

La présence d'ions concurrents, en particulier le calcium (Ca^{2+}) et les ions ferriques (Fe^{3+}), constitue l'un des principaux défis dans la voie de la précipitation chimique. Ces ions peuvent entraîner des impuretés dans le précipité final et une irrégularité de la formation des cristaux de struvite. Les ions calcium et surtout les ions ferriques inhibent d'ailleurs significativement la formation des cristaux de struvite.

L'ajout d'agents de nucléation (ou d'ensemencement) dans le système peut améliorer le processus de cristallisation en accélérant la vitesse de formation des cristaux et en réduisant le temps de réaction. La struvite elle-même peut être utilisée comme agent de nucléation. (Salkunić, Vuković and Smiljanić, 2022)

III-4. Traitement physico-chimique

III-4.1. Stripping/scrubbing de l'ammoniac

III-4.1.1. Principe

Le stripping de l'ammoniac est une des techniques disponibles commercialement les plus établies pour la récupération de l'azote à partir de digestat, de lisier, et autres flux concentrés.

L'ammoniac NH_3 généré lors de la digestion anaérobie, est surtout présent sous la forme d'ions ammonium pour ces gammes de pH (6,5-7,8). Une base doit être ajoutée pour déplacer l'équilibre vers la

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 28 sur 70

formation d'ammoniac (voir le graphique de la Figure III-3). Un pH généralement compris entre 10,8 et 11,5 permet d'extraire la majorité de celui-ci selon l'équilibre suivant :

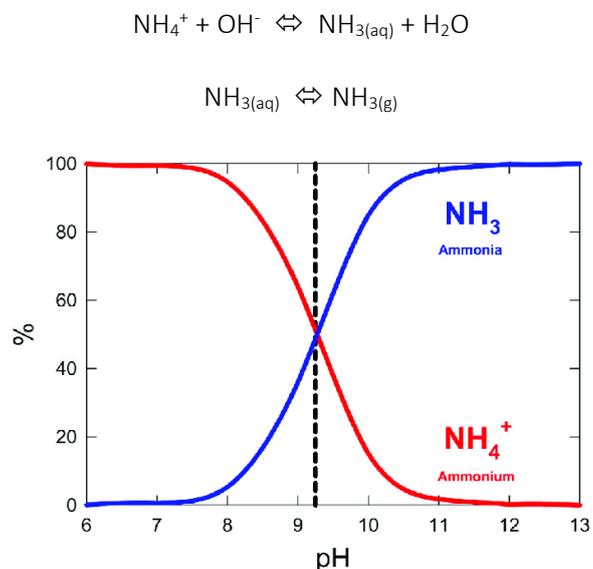


Figure III-3 - Pourcentage d'abondance des espèces NH_3 et NH_4^+ en fonction du pH (Langenfeld et al., 2021)

Le procédé consiste à injecter de l'air dans l'effluent liquide pour désorber l'ammoniac, ce qui est favorisé à un pH élevé et une température élevée, et ensuite de récupérer celui-ci par condensation, absorption réactive ou oxydation.

Généralement de la soude caustique NaOH ou de la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est ajoutée pour augmenter le pH. Il est recommandé d'éliminer un maximum de carbonates dans la mixture afin de limiter la consommation de base et également d'éviter précipitation de CaCO_3 dans le stripper. Une première étape de stripping permet d'éliminer une partie du dioxyde de carbone dissout dans l'effluent liquide. En cas de récupération de la chaleur de combustion du biogaz, celle-ci peut être valorisée pour augmenter la température de stripage. Celle-ci a un impact significativement positif sur les équilibres (libération d'ammoniac gazeux). (Sengupta, Nawaz and Beaudry, 2015)

Le procédé est réalisé dans des colonnes à garnissage (stripper), dans lesquelles l'effluent liquide est réparti sur la plus grande surface possible pour augmenter le contact avec l'air et l'efficacité de désorption. Les principaux désavantages sont les incrustations de struvite et de carbonate ; ce dernier pouvant être limité par stripping préalable du CO_2 . De plus, une séparation liquide/solide préalable est nécessaire pour éviter le colmatage du garnissage (TSS < 2%). Toutefois, un nettoyage périodique du garnissage reste nécessaire.

Le procédé peut aussi être réalisé par injection d'air directement dans l'effluent, rendant la séparation liquide/solide superflue (pour des teneurs classiques de digestat, i.e. 8-9%). Toutefois, les performances sont moins bonnes et la consommation énergétique est plus importante.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 29 sur 70

Le gaz utilisé pour le stripping est injecté en bas de la colonne. À noter que si le gaz utilisé est de l'air, l'activité des micro-organismes anaérobie peut être inhibée. Il est donc préférable d'utiliser du biogaz si l'on souhaite maintenir une production de biogaz importante. Les injecteurs sont de plus sujet à l'incrustation et nécessitent une maintenance régulière.

Dans tous les cas, la présence d'un dévésiculateur est nécessaire pour retenir les fines gouttelettes.

Un schéma du procédé est repris à la Figure III-4.

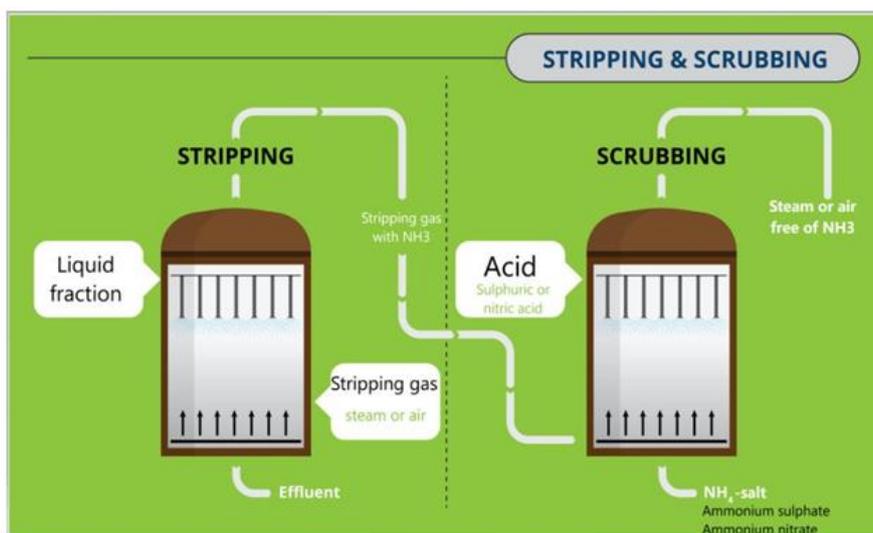


Figure III-4 - Schéma du stripping/scrubbing de l'ammoniac (Systemic Project, 2021)

Le gaz chargé en ammoniac est ensuite capturé dans une autre colonne à garnissage, ou à l'aide d'un pulvérisateur permettant d'absorber l'ammoniac. Une solution acide, généralement sulfurique ou nitrique, est utilisée. Une solution de sulfate ou de nitrate d'ammonium est obtenue, qui peut ensuite être une alternative aux fertilisants. Le gaz utilisé pour le stripping peut être recirculé, permettant de limiter les rejets atmosphériques d'ammoniac et autres gaz indésirables. Si la concentration de la solution en sulfate d'ammonium est supérieure à 40% en masse, une cristallisation peut apparaître et causer des blocages au niveau des injecteurs. Une dilution est donc nécessaire. Le gaz chargé en CO₂ et NH₃ est mis en contact avec du gypse (CaSO₄) pour éliminer le CO₂ et récupérer du sulfate d'ammonium :



Même si techniquement les procédés permettent d'atteindre jusqu'à 98% d'élimination de l'ammoniac, les procédés commerciaux fonctionnent plutôt autour d'une valeur de 80 à 90% afin de réduire les coûts opératoires. En effet, le stripping requiert beaucoup d'énergie et de réactifs, en comparaison aux procédés biologiques classiques pour l'élimination de l'azote et n'est compétitif qu'en cas de valorisation commerciale significative. À noter que ce procédé permet :

- d'éliminer les odeurs et les poussières ;
- de réduire la toxicité liée à l'ammoniac lors de la digestion anaérobie ;
- de limiter la présence d'ammoniac dans les boues finales épandues ;

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 30 sur 70

- et surtout de limiter la charge en azote renvoyée en amont des stations d'épuration. (Systemic Project, 2021) (Pikaar *et al.*, 2022) (Verbeke, Van Dijk and Brienza, 2021). (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

III-4.1.2. Différentes techniques de stripping

a. Stripping à l'air

Le stripping à l'air est la technique conventionnelle du stripping de l'ammoniac, comme décrit ci-dessus. Celui-ci permet d'éliminer l'ammoniac des eaux usées vers la phase gazeuse : l'ammoniac est transféré dans le flux d'air qui est dirigé vers un absorbeur. L'absorbeur contient de l'acide dans lequel l'ammoniac se dissout et forme des sels d'ammonium. Le pH doit être augmenté pour déplacer l'équilibre $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ vers NH_3 . (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

b. Stripping à la vapeur

Le stripping à la vapeur utilise de la vapeur d'eau au lieu de l'air pour réduire la consommation de produits chimiques (scrubbing). Un inconvénient est la plus grande consommation d'énergie. (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

c. Stripping du digesteur

L'ammoniac est extrait du digesteur simultanément avec le processus de digestion en utilisant de l'azote comme gaz de stripping, après quoi le gaz riche en ammoniac est lavé dans une solution acide pour récupérer l'ammonium. (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

d. Stripping par micro-ondes

Dans le stripping par micro-ondes, l'eau est chauffée par des micro-ondes avant d'être strippée. (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

e. Séchage thermique des boues avec traitement ultérieur de l'air

Les boues déshydratées sont séchées à haute température (100-160 °C), ce qui libère de l'ammoniac dans l'air. L'air est lavé dans une solution acide pour récupérer l'ammonium. (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

f. Distillation sous vide

La distillation sous vide utilise le même principe que le stripping à l'air, sous dépression pour déplacer l'équilibre et réduire la consommation d'énergie. Les eaux usées riches en azote sont pulvérisées dans une cuve sous vide après ajustement du pH à pH 8-10 (par ajout de soude caustique) et chauffage à 60-70 °C. En conséquent, l'ammoniac dissous est relargué en grande quantité vers la phase gazeuse. (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 31 sur 70

III-4.1.3. Efficacité de récupération

L'efficacité du stripping de l'ammoniac dépend de plusieurs paramètres tels que

- la concentration en ammonium : faisabilité économique pour des concentrations initiales en ammonium de 400-500 mgN/L ;
- la capacité tampon du milieu : les carbonates et phosphates se trouvant dans le digestat maintiennent celui-ci à pH ~ 8 et déterminent la quantité de base à ajouter (chaux, soude, potasse) pour augmenter le pH. Les carbonates peuvent être éliminés par un stripping préalable du CO₂, ce qui permet d'augmenter le pH. Il ne devrait en principe pas y avoir besoin d'ajouter de base dans ce cas. Un système spécifique de stripping doit être conçu pour éviter la précipitation de carbonate de calcium dans le garnissage;
- la surface d'échange du garnissage ;
- la température, le pH : les conditions optimales sont les suivantes :
 - o Un pH de 10-11 et une température de 70°C
 - o Une température de 80°C, indépendamment du pH
 - o Une température supérieure à 58°C est nécessaire pour que le carbonate d'ammonium se dissocie.
- le temps de rétention, ainsi que les débits de gaz et de liquide.

Cette efficacité peut théoriquement varier de 20% à 98%. Une valeur de 80-90% est généralement visée pour limiter les coûts.

(Systemic Project, 2021)

III-4.2. Procédés membranaires

III-4.2.1. Procédés membranaires basés sur la différence de pression

Les procédés membranaires basés sur la différence de pression, ou procédés baro-membranaires, sont une technologie bien établie et largement utilisée dans diverses applications industrielles telles que le traitement de l'eau et des eaux usées. Ces procédés comprennent la microfiltration (MF – élimine les particules de taille supérieure à 0,1µm ainsi que les algues et les bactéries), l'ultrafiltration (UF - élimine les petits colloïdes et les virus), la nanofiltration (NF - élimine la matière organique dissoute et les ions multivalents) et l'osmose inverse (RO – élimine jusqu'aux espèces monovalentes). Chaque type de membrane utilise une taille de pore différente et nécessite une pression spécifique pour son fonctionnement. La pression nécessaire avec l'osmose inverse peut atteindre 150 MPa, ce qui rend l'opération peu intéressante pour la récupération de l'azote.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 32 sur 70

La taille hydratée de l'ion ammonium (0,25 nm) est bien inférieure à la taille nominale des pores des membranes de MF et d'UF, ces membranes sont donc souvent utilisées en prétraitement à la nanofiltration et l'osmose inverse pour la récupération de l'azote. En plus de leur capacité à éliminer les solides, les microbes et les virus, ces étapes de prétraitement contribuent à réduire l'encrassement des membranes et à améliorer la qualité de l'eau récupérée.

Les membranes polymériques ou en céramique peuvent être utilisées pour la récupération de l'azote. Bien que les membranes céramiques présentent des avantages tels que leur facilité de nettoyage et leur large plage de pH, les membranes polymériques sont souvent privilégiées en raison de leur coût plus faible. Les matériaux couramment utilisés incluent le polypropylène (PP), le polyfluorure de vinyle (PVDF), le polyamide (PA), le polyéthersulfone (PES) et le polysulfone (PSU). Cependant, le choix du matériau de membrane dépendra de divers facteurs tels que la tendance à l'encrassement et la facilité de nettoyage. (Al-Juboori *et al.*, 2023)

Le Tableau VIII-1 en annexe reprend une liste de matériaux utilisés pour chacune des technologies et leur efficacité.

III-4.2.2. Procédés membranaires basés sur l'osmose directe

Parmi les différents procédés membranaires basés sur l'osmose, l'osmose inverse est le plus connu mais n'est pas adapté aux effluents concernés à cause de l'encrassement et des pressions extrêmement importantes. En revanche, l'osmose directe peut être appliquée à ces milieux chargés car elle requiert uniquement une solution chargée en sel, et n'a pas besoin d'être soumise à une différence de pression. Les membranes d'osmose directe se composent d'une couche active non poreuse et d'une couche de support poreuse. D'un côté se trouve l'effluent à concentrer et de l'autre se trouve la solution de tirage, concentrée en sel (NaCl ou MgCl₂). Cette dernière va capter l'eau de l'effluent sans créer la couche d'encrassement généralement liée à l'application d'une pression. La solution concentrée peut ensuite être utilisée pour produire de la struvite. La solution salée est ensuite. La consommation énergétique est donc faible.

Un des problèmes de cette technologie est le « flux inverse de sel », qui est défini comme la diffusion du sel à travers la membrane de la solution de tirage vers la solution d'alimentation, qui entraîne plusieurs problèmes, notamment la dilution de la solution de tirage, la contamination de la solution d'alimentation et la diminution de la force motrice osmotique.

Ce qui distingue l'osmose directe des procédés baro-membranaires dans les applications des eaux usées, c'est la faible demande en énergie et la facilité de nettoyage. L'osmose directe n'est néanmoins pas immunisée contre l'encrassement.

Malgré les performances élevées de l'osmose directe en termes de récupération des nutriments, elle nécessite un prétraitement de l'alimentation pour réduire l'encrassement. Plusieurs facteurs affectent l'efficacité de la récupération de l'azote, notamment la température, le débit, le pH et la composition de la solution d'alimentation et de la solution de tirage, ainsi que la nature du matériau de la membrane.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 33 sur 70

En conclusion, la technologie d'osmose directe montre un potentiel significatif pour la récupération de l'azote, mais elle présente encore des défis tels que l'encrassement et la sélection appropriée des membranes et des solutions de tirage. (Al-Juboori *et al.*, 2023)

III-4.2.3. Procédés membranaires améliorés biologiquement

On retrouve trois principales technologies : le bioréacteur à membrane anaérobie (AnMBR), le bioréacteur à membrane osmotique (OMBR) et le photobioréacteur à membrane. Il existe également des procédés bio-électrochimiques membranaires mais qui seront traités dans la section suivante.

a. AnMBR

L'AnMBR (anaerobic membrane bioreactor) est une technologie émergente combinant la microfiltration ou l'ultrafiltration avec la digestion anaérobie des boues. Cela permet d'extraire l'effluent riche en nutriment sans extraire la biomasse méthanogène. L'AnMBR produit du méthane, ce qui peut compenser une partie de l'énergie nécessaire pour faire fonctionner le système. De plus, cette technologie peut convertir les nutriments en formes réactives qui peuvent être utilisées directement si la qualité de l'effluent est acceptable. Cependant, l'AnMBR présente des défauts tels que la nécessité d'une concentration élevée en matières organiques dans les eaux usées, des conditions de fonctionnement spécifiques en termes de température, l'encrassement des membranes et le risque lié à la présence d'inhibiteurs dans les déchets pouvant affecter les performances du système. (Al-Juboori *et al.*, 2023)

b. OMBR

L'OMBR (osmotic membrane bioreactor) est une technologie de récupération d'azote qui combine un digesteur, une unité de séparation par osmose directe (FO) et un système de régénération de la solution de tirage. Contrairement à l'AnMBR, l'OMBR utilise une membrane FO non poreuse pour la séparation et nécessite une aération pour maintenir une activités biologique efficace et contrôler l'encrassement de la membrane. Il existe différentes configurations d'OMBR en fonction de l'application et de la gestion de la solution de tirage. Cette technologie présente des défauts similaires à l'AnMBR. Cependant, l'OMBR offre des avantages potentiels tels que la possibilité de réduire la pré-concentration des eaux usées. (Al-Juboori *et al.*, 2023)

c. Photobioréacteurs à membrane

Les photobioréacteurs à membrane (PBRM) combinent des membranes avec des photobioréacteurs pour la récupération des nutriments en utilisant des microalgues. Cette technologie permet la conversion du dioxyde de carbone et des nutriments en biomasse de microalgues, qui peut être récoltée à l'aide de la séparation membranaire. Les PBRM peuvent être utilisés pour produire divers produits de valeur tels que des produits pharmaceutiques, des biocarburants et des aliments pour animaux. Cependant, les PBRM présentent des défauts tels que l'encrassement fréquent de la membrane, la nécessité

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 34 sur 70

d'aération pour contrôler l'encrassement et la complexité du processus physique-biologique qui peut être difficile à optimiser. (Al-Juboori *et al.*, 2023)

III-4.2.4. Procédés membranaires électrochimiques

Les procédés membranaires électro-chimiques combinent des techniques électrochimiques avec des processus de filtration membranaire pour limiter les problèmes récurrents liés aux méthodes de filtration traditionnelles. On retrouve plusieurs catégories :

1) La déionisation capacitive membranaire (MCDI).

Il s'agit d'une variante de la déionisation capacitive classique qui fonctionne en appliquant un gradient de potentiel électrique à travers une solution aqueuse entre des électrodes poreuses couplées avec des membranes d'échange d'ions. Les ions vont ainsi se fixer dans cette membrane. Une régénération est nécessaire pour les éliminer. Cette technique permet l'élimination efficace et sélective des ions de la solution, ainsi qu'une faible consommation d'énergie. Cependant cette technique est initialement coûteuse et requiert un nettoyage fréquent. Elle n'est de plus pas indiquée pour des solutions concentrées. (Al-Juboori *et al.*, 2023)

2) L'électrodialyse membranaire

L'électrodialyse est une technique de séparation basée sur des membranes d'échange d'anions et de cations disposées alternativement. En appliquant un potentiel électrique, les ions sont sélectivement transportés à travers les membranes, permettant ainsi la séparation des composants de la solution, en continu. Deux flux sont générés, un déionisé et l'autre concentré. Cette technique est adaptée à des effluents concentrés et consomme peu d'énergie, mais requiert un nettoyage fréquent et a un coût initial élevé.

Des chercheurs ont utilisé un système se basant sur ces deux techniques, à savoir couplant le principe de l'électrodéionisation capacitive membranaire et l'électrodialyse à membrane bipolaire, permettant de récupérer 77% de l'azote ammoniacal et 89% du phosphore. Ce système a permis de réduire considérablement l'ajout de réactifs chimiques et l'énergie utilisée. Une autre étude réalisée avec le principe de la déionisation capacitive membranaire a montré une élimination de 82% de l'azote ammoniacal, 91% des nitrites, et 98% des nitrates. (Al-Juboori *et al.*, 2023)

Tableau III-4 - Efficacité de récupération de l'azote en fonction de différentes technologies membranaires (Al-Juboori et al., 2023)

Technologie	Substrat	Récupération de l'azote	Consommation énergie
Electrodialyse bipolaire (échelle pilote)	Urine diluée séparée à la source	88% NH ₄ ⁺	13 Wh/gN
Combinaison d'électrodialyse et de stripping membranaire	Urine séparée à la source	93% sulfate d'ammonium	30,6 MJ/kg N 8,3 Wh/gN

<i>Désionisation à membrane par électrode en carbone</i>	Eaux usées synthétiques	82% NH ₄ ⁺ , 91% NO ₂ ⁻ , 98% NO ₃ ⁻	
<i>Désionisation capacitive membranaire (à l'échelle pilote)</i>	Eaux usées urbaines	39 ± 5 % NH ₄ ⁺	1.16 kWh/m ³
<i>Désionisation capacitive membranaire</i>	Surnageant de digestat et eaux usées urbaines	89% et 67% avec eaux usées de digestat synthétique et réel	

III-4.2.5. Procédés membranaires perméables aux gaz

Ce type de procédé utilise des membranes hydrophobes microporeuses pour séparer les gaz dissouts des liquides. Dans le cas de l'azote ammoniacal, il est nécessaire d'augmenter le pH de la solution pour favoriser la présence de l'espèce NH₃ volatile. Un pH de 12 semble être efficace à température ambiante. Un pH de 10 est aussi efficace mais à plus haute température. Le stripping du CO₂ ou l'ajout de chaux permettent d'augmenter le pH. Des inhibiteurs de nitrification permettent aussi de contrer la diminution du pH liée à cette dernière.

Deux types de procédés existent :

- Procédé par contact membranaire (DCMD)
- Distillation membranaire

Dans le **procédé par contact membranaire**, une solution acide est placée de l'autre côté de la membrane pour immobiliser l'ammoniac sous forme d'ion ammonium. Malgré la plus grande valeur marchande du nitrate ou du phosphate d'ammonium, c'est l'acide sulfurique qui est préféré : moins dangereux que l'acide nitrique et offrant une meilleure dissociation que l'acide phosphorique. Le sel obtenu est de haute pureté mais est fortement dilué dans la solution, qui doit être ensuite concentrée pour pouvoir être transportée efficacement.

La **distillation membranaire** (MD) est basée sur la présence d'un gradient de pression de vapeur induit par une différence de température à travers la membrane. Ce procédé permet de retenir les composés non volatils du côté du concentrat tout en permettant aux substances volatiles ou gazeuses (telles que NH₃) de traverser la membrane pour être ensuite condensés. Différentes configurations de distillation membranaire ont été utilisées pour récupérer l'ammoniac de différents effluents, notamment la distillation membranaire sous vide (VMD), la distillation membranaire à balayage de gaz (SGMD) et la distillation membranaire à lame d'air (AGMD).

Divers matériaux polymériques sont utilisés pour la membrane, tels que le PVDF (Polyfluorure de vinylidène), le PP et le PTFE. Parmi ceux-ci, le PTFE est le matériau le plus prometteur en raison de sa haute stabilité chimique, de la plus faible perte d'hydrophobicité et de la plus faible énergie de surface, réduisant ainsi le risque de « noyer » la membrane.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 36 sur 70

Comparé aux processus membranaires basés sur une différence de pression, la distillation membranaire présente une pression de fonctionnement plus faible et est moins sujette à l'encrassement, ce qui lui permet de traiter des flux de moindre qualité. De plus, l'une des caractéristiques de la distillation membranaire est la possibilité d'utiliser des sources d'énergie thermique de faible qualité telles que la géothermie et les sous-produits énergétiques des processus de traitement des eaux usées tels que la riothermie et le biogaz.

Parmi les configurations de distillation membranaire étudiées pour la récupération de l'ammoniac, c'est la VMD qui semble offrir le meilleur potentiel, bien que d'autres études sur l'AGMD et le SGMD soient nécessaires pour confirmer cette conclusion. Les facteurs tels que le pH et la température influent sur l'efficacité de la récupération de l'ammoniac. Dans la plupart des cas, un pH proche ou plus élevé que le pKa de l'ammoniac et une température élevée favorisent une meilleure récupération.

Malgré les performances élevées de la distillation membranaire en termes de récupération de l'ammoniac, la consommation énergétique élevée et les problèmes d'encrassement et de « noyage » de la membrane limitent encore son utilisation généralisée. (Al-Juboori *et al.*, 2023)

Le Tableau III-5 rapporte l'efficacité des différents procédés fonctionnant par contact membranaire. Selon (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018), l'efficacité de ce procédé dépend fortement des conditions, entre 70 et 90%. Il s'agit toutefois de procédés étudiés à l'échelle du laboratoire principalement.

Tableau III-5 - Liste de différentes études sur la récupération de l'azote par contact membranaire (Al-Juboori et al., 2023)

Membrane Type	Waste Stream	pH Raising Agent	Stripping Solution	NH ₄ ⁺ -N Recovery (%)	Scale
Expanded polytetrafluoroethylene (ePTFE)	Diluted swine manure	Aeration+NaHCO ₃ +N-Allylthiourea (nitrification inhibitor)	H ₂ SO ₄	99	Lab
ePTFE	The effluent of anaerobically digested swine wastewater	Aeration+nitrapyrin (nitrification inhibitor)	H ₂ SO ₄	96-98	Lab
ePTFE	Swine manure centrate	Aeration+Allylthiourea	H ₂ SO ₄	90	Lab
ePTFE	Raw manure and digestate of dairy farm	-	H ₂ SO ₄	-3-13	Lab
PP	Centrate of anaerobic digester of domestic wastewater treatment	NaOH	H ₂ SO ₄	>99	Lab
ePTFE	Treated mesophilic digester wastewater with ballasted sedimentation	Slaked lime	H ₂ SO ₄ HNO ₃	55 41	Pilot
ePTFE	Treated mesophilic digester wastewater with ballasted Landfill leachate Human urine	Slaked lime NaOH Slaked lime	H ₂ SO ₄	92.5 86.5 70	Pilot
PP	Synthetic hydrolyzed human urine	KOH	H ₃ PO ₄	90.9	Lab
PP	Hydrolyzed human urine	NaOH	H ₂ SO ₄	93	Lab
PP	Synthetic hydrolyzed human urine	NaOH	H ₃ PO ₄	97	Lab
PTFE	Hydrolyzed urine	Ca(OH) ₂	H ₂ SO ₄	98	Lab

III-4.2.6. Procédés membranaires hybrides

Les différentes technologies présentées dans les sections précédentes montrent que toutes les technologies membranaires ont des défauts qui empêchent leur utilisation directe pour la récupération des nutriments (N et P). Il serait recommandé d'utiliser ces techniques en complément d'autres technologies pour obtenir une haute efficacité. Plusieurs combinaisons sont suggérées par (Al-Juboori *et al.*, 2023).

III-4.3. Adsorption et échange d'ions

Les ions ammonium contenus dans l'eau peuvent être retenus sur des résines échanges d'ions ou différents adsorbants spécifiques à ces ions. Ils permettent d'atteindre une efficacité d'élimination élevée en plus de pouvoir être régénérés et produire un flux concentré en NH_4^+ . La cinétique d'adsorption/désorption est rapide et l'opération est simple. (Sengupta, Nawaz and Beaudry, 2015) D'après (Beckinghausen *et al.*, 2020), les zéolites démontrent une affinité particulière pour les ions ammonium, tout en étant hautement sélectives et en offrant une capacité d'échange importante. Leur régénération est possible, permettant ainsi d'obtenir un concentré d'ions ammonium (entre 2 et 6 g/L) dans une solution de NaCl ou de NaOH. De plus, en cas d'épandage, les zéolites libèrent progressivement des ions ammonium dans l'environnement. (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018) suggèrent l'utilisation d'une zéolite naturelle particulière : la clinoptilolite.

La régénération de ces matériaux se fait généralement avec une solution de NaCl ($\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{NH}_4^+$). D'autres techniques de régénération peuvent se faire à l'aide d'acides, de chaleur (procédé d'adsorption exothermique) ou par régénération biologique. La solution récupérée, riche en NH_4^+ , peut ensuite être strippée par injection d'air à un pH supérieur à 9,3 pour ensuite capter NH_3 avec de l'acide sulfurique et produire du sulfate d'ammonium. (Sengupta, Nawaz and Beaudry, 2015)

Des chercheurs ont suggéré l'utilisation d'un mélange de résines anioniques et cationiques pour récupérer simultanément phosphates et ammonium. D'autres suggèrent de nouveaux adsorbants, tels que des nanotubes de carbone, hydrogels, composites (palygorskite) et substances naturelles (paille, tuff volcanique, posidonie, ...). (Sengupta, Nawaz and Beaudry, 2015)

III-5. Traitement biologique

III-5.1. Systèmes bio-électrochimiques

Les systèmes bio-électrochimiques se basent sur l'utilisation de micro-organismes catalysant des réactions à l'anode et/ou à la cathode d'une cellule électrochimique, ce qui permet de convertir de l'énergie chimique en énergie électrique. Il existe 3 types de système :

- Cellules électrolytiques microbiennes (MEC)
 - o Deux électrodes sont séparées par une membrane sélective d'ions, dans lequel un courant électrique est utilisé pour transporter les ions ammonium de l'anode vers la cathode où ils peuvent être éliminés sous forme d' NH_3 . Il ne s'agit pas d'un procédé

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 39 sur 70

thermodynamiquement favorable, et nécessite donc de l'énergie électrique pour fonctionner.

- Piles à combustible microbienne (MFC)
 - o Il s'agit d'un procédé thermodynamiquement favorable où l'oxygène est réduit en eau à la cathode et les matières organiques sont oxydées à la cathode, permettant de générer de l'électricité

Ces procédés sont soumis à des limitations liées au colmatage des membranes. (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)(Beckinghausen *et al.*, 2020)

D'après (Sengupta, Nawaz and Beaudry, 2015), aucune installation à grande échelle n'a été réalisée, mais une installation pilote a été implémentée aux Pays-Bas à Leeuwarden en 2013.

III-5.2. Production de protéines microbiennes

L'ammonium contenu dans les eaux usées peut être récupéré sous forme de biomasse microbienne riche en protéine (protéines microbiennes). Celle-ci est générée par un procédé de fermentation aérobie. La biomasse générée peut ensuite être utilisée, en fonction de sa qualité, sous la forme d'engrais à libération lente ou encore comme supplément riche en protéines pour l'alimentation animale ou l'aquaculture. Dans le cas où cette biomasse est produite avec des effluents « propres », par exemple des effluents d'industries agroalimentaires, elle pourrait être utilisée dans l'alimentation générale, comme d'autres produits tels que le Quorn™.

Différents types de micro-organismes peuvent être utilisés en fonction du type de fermentation :

- Fermentation aérobie : bactéries hétérotrophes, autotrophes, chemo-lithotrophes
- Fermentation anaérobie : bactéries photolithotrophes

L'origine des eaux considérées (« propres », ou contenant des pathogènes) va influencer le choix de la technologie et des micro-organismes utilisés. Dans le cas d'eaux « propres », une approche par assimilation directe peut être envisagée alors que dans le cas d'eaux usées contaminées par des matières fécales, il serait envisagé de créer une barrière entre les différents milieux (par exemple par une phase gazeuse), ou encore d'ajouter un mélange de cultures libres. Un post-traitement par la chaleur peut être nécessaire, en particulier pour l'alimentation animale.

Dans le cas de la production de protéines microbiennes à partir d'eaux usées, deux concepts émergents sont proposés :

- L'assimilation directe et l'utilisation des protéines microbiennes produites en aquaculture ou en alimentation animale (technologie Biofloc, ou ValPromic)

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 40 sur 70

- **Biofloc** : Le principe de la technologie Biofloc est de favoriser la croissance de micro-organismes capables de transformer les déchets organiques en une source de protéines utilisable pour l'alimentation des animaux aquatiques. Ce procédé est envisagé en aquaculture pour traiter l'eau contaminée (et donc économiser la ressource), tout en réutilisant les déchets, qui finissent par s'accumuler et poser des problèmes de toxicité. Les bactéries et autres micro-organismes présents dans le biofloc dégradent les déchets organiques, transformant une partie de l'azote en protéines microbiennes. Ces protéines peuvent ensuite être utilisées comme source de nourriture, créant ainsi un système fermé et durable où les déchets sont réutilisés pour nourrir les organismes élevés.
- Le procédé **Valpromic²** repose sur l'assimilation directe de l'azote (et du phosphate) présent dans les eaux usées par une culture mixte de bactéries hétérotrophes. Contrairement au procédé Biofloc, des eaux usées d'industries agroalimentaires sont traitées mais les protéines microbiennes (SCP : single Celle Protein) produites ne sont pas utilisées directement. Elles nécessitent une étape de déshydratation, de séchage et de stérilisation, ainsi que l'utilisation d'un réacteur de fermentation, ce qui ajoute de la complexité et des investissements en capital. Le démarrage de la première usine de démonstration à pleine échelle de Valpromic d'une capacité totale d'environ 5000 tonnes de protéine microbienne par an, à partir des eaux de traitement des pommes de terre était annoncé pour fin 2018. Une usine est en cours de construction à Wielsbeke (Courtrai) pour la valorisation de flux provenant de l'industrie de la pomme de terre en aliments pour animaux domestiques. La communication relative au projet n'est pas claire, mais il semblerait qu'il s'agisse de ce type de procédé.
- Le stripping de l'ammoniac et ensuite la production de protéines microbiennes dans un autre réacteur (PowerToProtein)
 - Le concept Power-to-Protein est une approche de traitement des eaux usées domestiques, visant à valoriser l'azote ammoniacal extrait de ces eaux usées, par stripping de l'ammoniac voire par ajout d'une étape membranaire, en utilisant des bactéries pour le combiner à de l'hydrogène et de l'oxygène générés par électrolyse de l'eau, ainsi qu'à du CO₂ provenant du biogaz. Les matières organiques présentes dans les eaux usées sont utilisées pour produire du biogaz. Le biogaz produit peut ensuite être utilisé pour produire de l'hydrogène grâce à une unité de cogénération. Comme la quantité d'hydrogène produite de cette manière ne peut couvrir que 12% des besoins totaux en hydrogène, pour valoriser tout l'azote théoriquement récupérable des eaux usées, de l'hydrogène supplémentaire est produit par électrolyse de l'eau grâce à une énergie renouvelable. Ce concept est encore loin d'être appliqué.

² Partenariat Agristo, Clarebout, Akwadok, et Avecom

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 41 sur 70

L'intérêt de cette technologie comparativement aux procédés classiques de stripping et de précipitation de struvite est que ces dernières requièrent une concentration en ammonium importante (i.e. digestat) pour que le procédé soit économiquement rentable alors que la production de protéines microbiennes pourrait être directement adaptée aux eaux usées urbaines. De plus, le coût énergétique est beaucoup moins élevé car il n'y a pas d'étape de séparation dans le cas où la source est dénuée de matières fécales. En effet, le stripping de l'ammoniac et la production de struvite nécessitent toujours plus d'énergie que la production d'ammoniac par le procédé Haber-Bosch. (Pikaar *et al.*, 2022)

IV. ÉTUDE DE CAS

Le Tableau VIII-4 en annexe reprend une liste de technologies rapportées par pays, et par organisation. Celui-ci ne donne pas d'informations sur l'efficacité de récupération mais permet de représenter les secteurs et pays actifs dans le domaine de la récupération de l'azote. Plusieurs d'entre-elles sont décrites dans les sections suivantes.

IV-1. *Meta-analyse sur les techniques de récupération de l'azote*

L'article de (Beckinghausen *et al.*, 2020) présente une compilation de recherches sur la récupération de l'azote et compare différentes techniques sur base de la consommation énergétique et de l'efficacité de récupération. Malheureusement, plus d'un tiers des articles passés en revue pour réaliser cette analyse ne donnent pas d'informations concernant la consommation énergétique du procédé, et encore moins l'aspect économique, pourtant nécessaire pour envisager une implémentation à plus grande échelle.

Le Tableau IV-1 liste un ensemble de technologies de récupération de l'azote en fonction du substrat considéré, qui pour la très large majorité sont encore à l'échelle du laboratoire. Il peut être remarqué que les produits les plus courants de ces technologies sont la struvite et les solutions concentrées en ammoniac.

Certaines méthodes, comme MEC-FO et les membranes liquide-liquide, atteignent déjà une haute efficacité de récupération de l'azote, tandis que d'autres, comme le stripping sous vide, présentant des taux de récupération plus faibles, nécessitent une optimisation supplémentaire.

Les technologies dépendent des substrats considérés : urine, digestats, eaux usées ou autres, et mettent en évidence l'intérêt d'une séparation à la source pour améliorer l'efficacité énergétique et la récupération des nutriments.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 42 sur 70

Tableau IV-1 – Techniques de récupération de l'azote et performances associées (Beckinghausen et al., 2020).

NB : La part de la charge en azote récupérée est du taux d'élimination par le taux de récupération.

Technique	Source	Forme	Source détaillée	pH	NH4 + -N (mg/L)	TN (mg/L)	Élimination de N (%)	Récupération de N (%)	Forme de N récupérée	Stade expérimental	Remarques
Séparation Solide-Liquide/Evaporation Séquentielle/Osmose Inverse	Industriel	Digestat	Digestat de centrale biogaz	7,8	-	3500	99	100	Solide et solution	Laboratoire	-
Cellule de Dessalement Microbien Submersible	Synthétique	Digestat	Digestat (in situ)	7,8	2400	-	87,9	100	Sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Lixiviats de Cendres de Boues d'Épuration	Agricole	Digestat	Digestion anaérobie de lisier porcin avec lixiviation des cendres	9,5	1727	-	91,95	100	Struvite (MAP)	Laboratoire	-
Anaérobie/Échangeur d'Ions	Agricole	Rejet de digestat	Digestion anaérobie de lisier de vache	7,7	-	492	90	100	Sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Cellule d'Électrolyse Microbienne	Synthétique	Rejet de digestat	Eaux usées synthétiques digérées	-	504	-	83	100	Sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Digestat	Eaux usées	Rejet de digestat	Déchets alimentaires à forte teneur en ammoniac	-	6400	-	54,45	100	Cristaux de sulfate d'ammonium	Pilote	-
Digestat	Eaux usées	Rejet de digestat	Digestat de boues de station d'épuration municipale	-	1093	-	27,54	100	Cristaux de sulfate d'ammonium	Pilote	-
Digestat	Eaux usées	Rejet de digestat	Déchets alimentaires à faible teneur en ammoniac	-	1804	-	47,78	100	Cristaux de sulfate d'ammonium	Pilote	-
Cellule d'Électrolyse Microbienne	Agricole	Rejet d'eau	Lisier filtré de vache	8,1	2150	3270	94	100	Ammoniac en acide borique	Laboratoire	-
Cellule Electrochimique	Agricole	Rejet d'eau	Lisier de porc filtré	8,5	-	2500	59	6,2	Ammoniac en HNO3	Laboratoire	-
Cellule Electrochimique	Agricole	Rejet d'eau	Lisier de porc filtré	-	2500	-	70	14,5	Ammoniac en HNO3	Laboratoire	-
Cellule Electrochimique	Agricole	Rejet d'eau	Surnageant de digesteurs de lisier porcin	8,3 6	2350	-	93-97	92-93	Ammoniac en sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Méthode de la membrane perméable aux gaz avec aération	Agricole	Rejet d'eau	Lisier de porc digéré avec effluent de digesteurs	8,6	1465-2097	-	97-99	96-98	Solution de sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Méthode de la membrane perméable aux gaz sans aération	Agricole	Rejet d'eau	Lisier de porc digéré avec effluent de digesteurs	8,6	1465-2097	-	92-98	76-95	Solution de sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Méthode de la membrane perméable aux gaz	Agricole	Rejet d'eau	Surnageant de digesteurs de lisier de porc	8,3 6	2350	-	93-97	92-93	Solution de sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Stripage thermique/absorption acide	Agricole	Rejet de lisier	Lisier de bovins non digéré	8,5 8	1100	-	96,5-99	100	Cristaux de sulfate d'ammonium	Laboratoire	À ébullition
Distillation membranaire sous vide/absorption acide	Eaux usées	Rejet de digestat	Déchets alimentaires à forte teneur en ammoniac	7,7	70	-	85	100	Ammoniac	Laboratoire	-
Distillation membranaire sous vide/absorption acide	Eaux usées	Rejet de digestat	Digestat de boues municipales	-	1093	-	27,54	100	Cristaux de sulfate d'ammonium	Pilote	-
Distillation membranaire sous vide/absorption acide	Eaux usées	Rejet de digestat	Déchets alimentaires à faible teneur en ammoniac	-	1804	-	47,78	100	Cristaux de sulfate d'ammonium	Pilote	-
Cellule Electrochimique - TransMembrane ChemiSorption	Eaux usées	Urine	Urine	9,2	4250	-	63	56	Sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Cellule Electrochimique - TransMembrane ChemiSorption	Synthétique	Urine	Urine synthétique	9,3	4250	-	92	84	Sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Système Electrochimique de Recyclage de l'Hydrogène & TransMembrane ChemiSorption	Eaux usées	Urine	Urine humaine prétraitée	9	-	3400	73	60	Sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Système Electrochimique de Recyclage de l'Hydrogène & TransMembrane ChemiSorption	Eaux usées	Urine	Urine humaine prétraitée	9	-	3400	73	100	Sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Système Electrochimique de Recyclage de l'Hydrogène & TransMembrane ChemiSorption	Synthétique	Urine	Urine synthétique	9	-	3400	82	64	Sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Cellule Electrochimique Microbienne et TransMembrane ChemiSorption	Eaux usées	Urine	Urine	9,1	3,4	-	47	100	Sulfate d'ammonium	Pilote	-

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

PR2301553_240926_Azote

Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD

Page 43 sur 70

Technique	Source	Forme	Source détaillée	pH	NH4 + -N (mg/L)	TN (mg/L)	Élimination de N (%)	Récupération de N (%)	Forme de N récupérée	Stade expérimental	Remarques
Cellule Electrochimique Microbienne et TransMembrane ChemiSorption	Eaux usées	Urine	Urine	9,1	700	-	42-51	49	Solution de sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Pile à Combustible Microbienne	Eaux usées	Urine	Urine non diluée	-	4050	-	< 1	-	Ammoniac et acide borique	Laboratoire	-
Cellule Electrolytique Microbienne Séparatrice de Nutriments	Synthétique	Urine	Urine diluée à 10 fois	7,9 - 8,5	745	871,4	61	100	Solution	Laboratoire	-
Stripage /Absorption Acide	Eaux usées	Urine	Urine non diluée	9,6	-	4500	91	76	Sulfate d'ammonium	Laboratoire	10 L/hr, 300 min
Stripage /Absorption Acide	Eaux usées	Urine	Urine non diluée	9,6	-	4500	60-73	28-46	Solution de sulfate d'ammonium	Laboratoire	80 L/hr, 45 min
Stripage /Absorption Acide	Eaux usées	Urine	Urine non diluée	9,6	-	4500	94	100	Sulfate d'ammonium	Laboratoire	80 L/hr, recirc., 230 min
Cellule Electrolytique Microbienne de Récupération de Nutriments (Élargie)	Eaux usées	Eaux usées	Eaux usées Eaux usées brutes	-	47,4	-	80	62	Struvite (MAP)	Laboratoire	-
Bio-Électrodialyse	Eaux usées	Eaux usées	Effluent du clarificateur primaire	7,8	70	-	85	52	Ammoniac en acide borique	Laboratoire	sans gaz
Bio-Électrodialyse	Eaux usées	Eaux usées	Effluent du clarificateur primaire	7,8	70	-	90	80	Ammoniac en acide borique	Laboratoire	avec gaz
Capacitive membrane stripping pour la récupération de l'ammoniac,	Eaux usées	Eaux usées	Eaux usées brutes après séparation des solides	-	-	-	62	100	Sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Électrodéionisation (EDI)	Synthétique	Eaux usées	Eaux usées Eaux usées synthétiques	-	28,7	-	90	100	Solution	Laboratoire	-
Cellule électrolytique microbienne avec aération	Eaux usées	Eaux usées	Lixiviat de décharge	-	4540	-	63,7	53,8	Ammonium	Laboratoire	HCO3- & NH42SO4
Cellule électrolytique microbienne – Osmose directe	Synthétique	Eaux usées	Centrifugeuse synthétique	-	1000	-	99,7	100	Struvite (MAP) et sulfate d'ammonium	Laboratoire	-
Cellule de Récupération Microbienne - Bioréacteur à Membrane Osmotique Anaérobie	Synthétique	Eaux usées	Milieu à base de glucose	7,2	21,6	-	28-45	100	Solution	Laboratoire	-
Resource Recovery Microbial Fuel Cell	Synthétique	Eaux usées	Eaux usées contenant de l'urine	-	3,89	-	98	42	Solution	Laboratoire	-
Séparation Solide-Liquide/Évaporation Séquentielle/Osmose Inverse	Eaux usées	Eaux usées	Boues digérées	7,6	-	3500	99	100	Solide et solution	Laboratoire	-
Recyclage de Struvite	Agricole	Eaux usées	Eaux usées porcines	7,7	-	378	90	91	Struvite (MAP) et solution	Laboratoire	-
Distillation membranaire sous vide	Industriel	Eaux usées	Effluent en aval carbonaté de la régénération d'IX	6,1	167	-	96	100	Ammonium	Laboratoire	NaOH
Distillation membranaire sous vide	Industriel	Eaux usées	Effluent en aval carbonaté de la régénération d'IX	10	167	-	99,6	100	Ammonium	Laboratoire	NaOH
Stripage thermique sous vide / Absorption acide	Eaux usées	Eaux usées	Rétentat du lixiviat de décharge	-	5673	-	68,72	100	Sulfate d'ammonium	Pilote	cristaux
Stripage thermique sous vide / Absorption acide	Agricole	Eaux usées	Effluent de digesteur du digestat de fumier de bovin après séparation solide-liquide	-	1620	41,48	100	-	Cristaux de sulfate d'ammonium	Pilote	-
Stripage thermique sous vide / Absorption acide	Eaux usées	Eaux usées	Rétentat de lixiviat de décharge	-	5760	45,27	100	-	Cristaux de sulfate d'ammonium	Pilote	-

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

PR2301553_240926_Azote

Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD

Page 44 sur 70

Tableau IV-2 : Techniques de récupération de l'azote et consommation énergétique associée (Beckingham et al., 2020)³

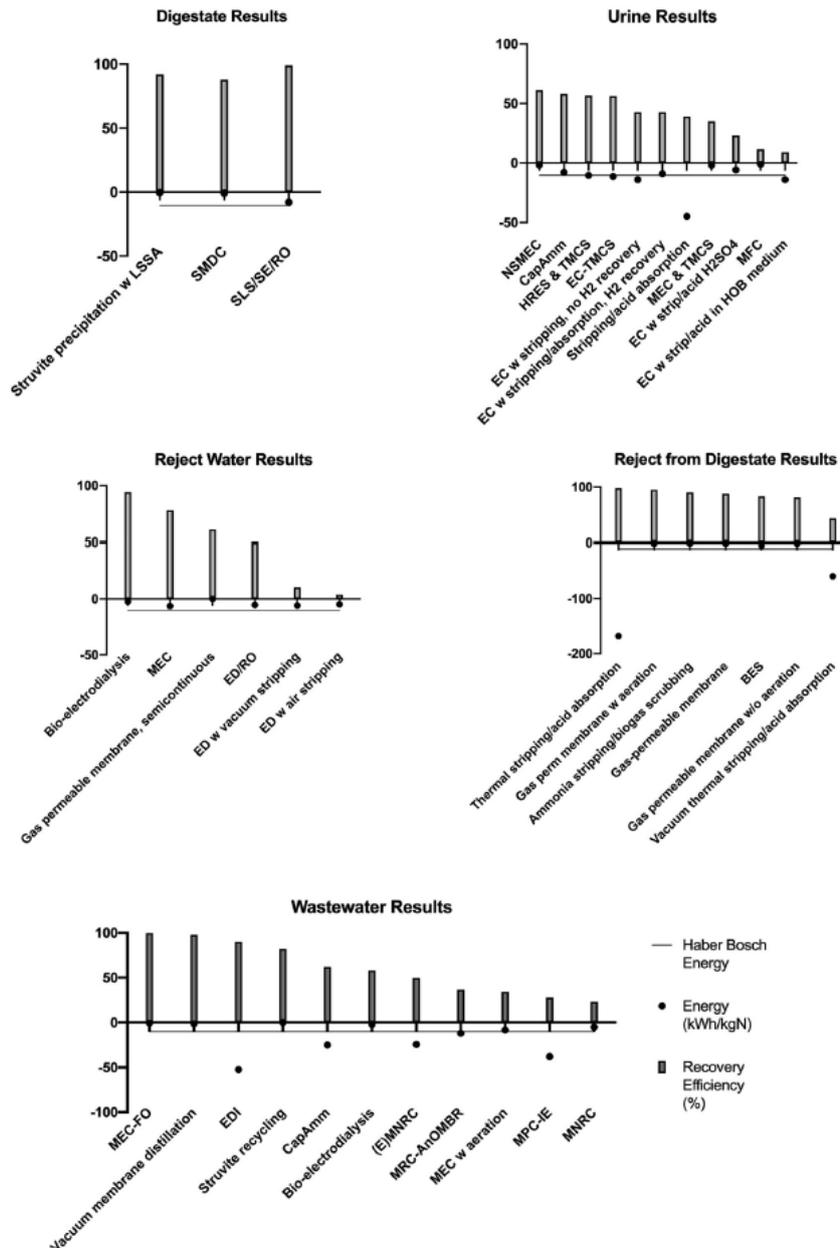
Technique	Substrat	Énergie Requise (kWh/kgN)	Forme d'Énergie Requise	Énergie Récupérée (kWh/kgN)	Forme d'Énergie Récupérée	Delta d'Énergie (kWh/kgN)	EROI
Cellule de Dessalement Microbien Submersible Séparation Solide-Liquide/Évaporation Séquentielle/Osmose Inverse	Digestat	0,9	Électricité	0,09	Bioélectricité	-0,77	0,100
	Digestat	7,9*	Chaleur/Électricité	-7,91			
Stripping Thermique sous Vide / Absorption acide	Rejet du digestat	59,7*	Chaleur/Électricité	26,84*	Chaleur	-32,88	0,449
Système Bioélectrique (BES)	Rejet du digestat	4,5	Électricité			-4,50	
Membrane Perméable au Gaz	Rejet du digestat	1,0*	Électricité			-0,97	
Membrane Perméable au Gaz avec Aération	Rejet du digestat	1,2*	Électricité			-1,17	
Électrodéionisation (EDI) w aération	Rejet du digestat	6,0*	Électricité			-5,95	
Électrodéionisation (EDI) sous Vide	Rejet du digestat	4,9*	Électricité			-4,94	
MEC (Cellule d'Électrolyse Microbienne)	Rejet d'eau	10,4	Électricité	4,01	Hydrogène	-6,43	0,384
Électrodéionisation (EDI)	Rejet d'eau	52,3	Électricité			-52,35	
Membrane Perméable au Gaz	Rejet d'eau	1,2*	Électricité			-1,17	
Distillation sous Vide avec Membrane	Rejet d'eau	1,5*	Électricité			-1,53	
Cellule d'électrolyse microbienne avec osmose directe	Rejet d'eau	1,2	Électricité	0,34	Hydrogène	-0,83	0,287
Cellule d'électrolyse microbienne et chimisorption transmembranaire	Urine	1,4	Électricité	Non rapporté	(Hydrogène)	-1,36	
Cellule d'électrolyse microbienne et chimisorption transmembranaire	Urine	2,5	Électricité	Non rapporté	(Hydrogène)	-2,49	
Capacitive Membrane Stripping for Ammonia Recovery	Urine	7,8	Électricité			-7,80	
Électrochimie à base de recyclage de l'hydrogène et de la chimisorption transmembranaire	Urine	8,5	Électricité			-8,51	
Électrochimie à base de recyclage de l'hydrogène et de la chimisorption transmembranaire	Urine	13,6	Électricité			-13,59	
Pile à Combustible Microbienne (MFC)	Urine	3,1	Électricité	185,982	Électricité	-1,19	0,609
Cellule d'électrolyse microbienne de séparation des nutriments. Stripping, faible débit	Urine	1,8	Électricité			-1,80	
	Urine	61,1*	Électricité			-61,05	
Stripping, débit élevé, avec recirculation	Urine	49,6*	Électricité			-49,61	
Stripping, débit élevé, sans recirculation	Urine	23,6*	Électricité			-23,64	
Électrochimie sans récupération de H ₂	Urine	13,0	Électricité	-13,00			
Électrochimie avec récupération de H ₂	Urine	13,0	Électricité	4	Hydrogène	-9,00	0,308
Système électrochimique de recyclage de l'hydrogène et de la chimisorption transmembranaire , 10 A/m ²	Urine	8,5	Électricité			-8,48	
Système électrochimique de recyclage de l'hydrogène et de la chimisorption transmembranaire , 20 A/m ²	Urine	7,3	Électricité			-7,26	
Système électrochimique de recyclage de l'hydrogène et de la chimisorption transmembranaire , 50 A/m ²	Urine	15,7	Électricité			-15,65	
Électrochimie avec stripping	Urine	19,4	Électricité	5,5	Hydrogène, Oxygène	-13,90	0,284
Cellule de Récupération de Nutriments Microbiens	Eaux usées	6,0	Électricité	0,96	Bioélectricité	-5,04	0,160
Cellule de Récupération de Nutriments Microbiens Élargie	Eaux usées	28,6	Électricité	4,20	Bioélectricité	-24,37	0,147
Microbial Recovery Cell - Anaerobic Osmotic Membrane BioReactor (MRC-AnOMBR)	Eaux usées	40,0*	Électricité	28,07	Méthane	-11,93	0,702
Bioélectrodialyse sans recirculation	Eaux usées	2,7	Électricité	2,4	Hydrogène	-0,51	0,825
Bioélectrodialyse avec recirculation	Eaux usées	2,9	Électricité	2,11	Hydrogène	-0,56	0,790

³ Energy return on investment (EROI) correspond au ratio entre l'énergie récupérée sur l'énergie requise. Le Delta Energy caractérise le bilan énergétique du système. Une valeur négative signifie que le procédé requiert plus d'énergie qu'il ne peut en récupérer. Ces valeurs n'incluent pas l'économie d'énergie réalisé sur l'aération pour la nitrification/dénitrification

Membrane Perméable au Gaz	Eaux usées	0,22*	Électricité			-0,22	
Préconcentration membranaire - Échange d'ions.	Eaux usées	60,3	Électricité	22,41	Méthane	-37,93	0,371
Récupération de Struvite	Eaux usées	0,1	Électricité			-0,10	
Cellule électrolytique microbienne avec aération.	Eaux usées	8,5*	Électricité	Non rap- porté	(Hydrogène)	-8,5	
Capacitive membrane stripping for Ammonia recovery	Eaux usées	25,1	Électricité			-25,10	
Ammonia stripping/biogas scrubbing	Eaux usées	0,61*	Électricité			-0,61	
Thermal stripping/acid absorption	Eaux usées	168,2*	Chaleur	61,00**	Chaleur	-107,25	0,363

* Valeurs énergétiques calculées.

** L'évaluation économique suppose que 100 % de la chaleur est récupérable



SMDC : Cellule de désalinisation microbienne submersible. **SLS/SE/RO** : Séparation solide-liquide/Évaporation séquentielle/Osmose inverse. **MEC** : Cellule d'électrolyse microbienne. **MEC-FO** : Hybride de cellule d'électrolyse microbienne et d'osmose avant. **CapAmm** : Stripping capacitif pour la récupération de l'ammoniac. **MFC** : Pile à combustible microbienne. **HRES & TMCS** : Système électrochimique de recyclage de l'hydrogène et chimisorption transmembranaire. **EC** : Cellule

électrochimique. **MNRC** : Cellule de récupération des nutriments microbiens. **MPC-IE** : Préconcentration membranaire - Échange d'ions. **(E)MNRC** : Cellule de récupération agrandie des nutriments microbiens. **EDI** : Électrodéionisation. **NSMEC** : Cellule microbienne de séparation des nutriments.

Figure IV-1 - Représentation graphique de la consommation énergétique versus l'efficacité de récupération de l'azote pour différentes technologies (Beckinghausen et al., 2020) ⁴

IV-2. Bilan de matière sur la station d'épuration d'Amsterdam-West

La

Figure IV-2 reprend un schéma global de la station d'épuration d'Amsterdam-West. Celle-ci dispose d'une décantation primaire, et d'un procédé par boue activée de type mUTC permettant d'éliminer l'azote et le phosphore. Une digestion anaérobie des boues primaires et secondaires est réalisée, en plus de boues provenant d'autres stations d'épuration. Les boues digérées sont déshydratées et sont ensuite envoyées dans une installation permettant de récupérer de la struvite.

Cette station d'épuration dispose d'une grande capacité de traitement, 1.014.000 EH. La charge en azote provenant des eaux usées est de 3.932 tonnes d'azote par an, correspondant à 4,4% de la charge totale en azote des stations d'épuration des Pays-Bas. Des boues sont également amenées d'autres stations d'épuration, ce qui porte la charge globale en azote à 4.705 tonnes par an.

La digestion des boues permet de libérer une quantité importante d'ammonium, pouvant ensuite être récupéré à l'aide de différentes technologies. (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

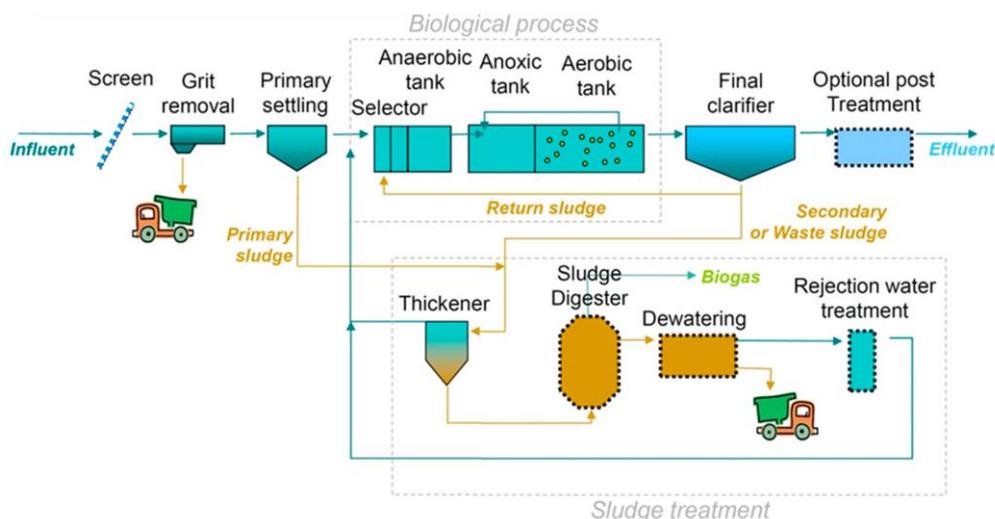


Figure IV-2 - Station d'épuration d'Amsterdam-West. (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

⁴ « Reject water » représente la phase aqueuse de digestion anaérobie.

<p>RESRECOVERY</p> <p>PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES</p>	<p>PR2301553_240926_Azote</p>
	<p>Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD</p>
	<p>Page 47 sur 70</p>

Le bilan de matière en eau est repris à la Figure IV-3 et celui en azote est repris à la Figure IV-4 permettant une estimation de la concentration des flux principaux et de leur part relative de la charge globale entrante en azote a été réalisé (Tableau IV-3).

L'eau usée entrante est fractionnée en plusieurs flux : urines, fèces, eaux de la chasse des toilettes, eaux grises et eaux de pluie, sur base de données issues de la littérature et d'hypothèses (L/pers/j). Pour le bilan sur l'azote, les concentrations des eaux entrantes et sortantes et des phases aqueuses de boues digérées ont permis de calculer les concentrations des autres flux. La concentration en azote dans les boues (primaires, digérées, externes) est considérée comme identique et basée sur une seule mesure (75 g N/kgMS). Enfin le bilan a été bouclé en considérant que tous les flux sortants non mesurés sont sous la forme de diazote N_2 . L'apport en azote dans les eaux usées est ainsi réparti en différents flux : urine, fèces (1,4 g N/EH.jour), eaux grises, eaux de pluie et des chasses d'eaux (pas de contribution).

La concentration de différents flux a donc pu être estimée, ainsi que la contribution relative à la charge entrante en azote (eaux résiduares + boues externes). Il s'avère que l'urine a la plus forte contribution (67%), avec une concentration très élevée (8.800 mg N/L), proche de la valeur de référence mentionnée par la STOWA (8.830 mg N/L). Le second flux important est la phase aqueuse des digestats, avec 27% de la charge totale entrante en azote, et avec une concentration de 1.030 mg N/L. On remarque que les eaux résiduares sont respectivement ~ 15 et ~ 120 fois moins concentrées que les jus de digestion ou l'urine, rendant les technologies de récupération de l'azote directement sur l'influent plus rentables.

À noter que sans récupération totale de l'azote contenu dans les jus de digestion, 78% de la charge en azote est perdue sous forme de diazote N_2 , sans compter les rejets de N_2O dans l'atmosphère.

Tableau IV-3 - Concentration en azote des différents flux et la charge en azote relative à la charge entrante dans la station d'épuration (eau usée entrante et boues provenant d'autres stations d'épuration) (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

<i>Flux considéré</i>	<i>Concentration (mg N/L)</i>	<i>Part relative de la charge totale en N entrante</i>
<i>Urine</i>	8800	67%
<i>Eau de rejet des digesteur</i>	1030	27%
<i>Eaux usées entrantes</i>	61	84%
<i>Boues externes entrantes</i>	75 g N/kgMS	16%
<i>Eaux traitées rejetées</i>	8,1	11%

Le potentiel de récupération de l'azote a été estimé en fonction de différentes technologies et de leur degré de « durabilité » (consommation énergétique et production de N_2O) comme décrit au point II-2 (Les mêmes auteurs comparent les besoins énergétiques des technologies de récupération avec les techniques classiques d'élimination de l'azote (Tableau VIII-3 en annexe)

Tableau III-2 et Tableau III-3). Le Tableau IV-4 en synthétise les conclusions. Une unité de production de struvite est déjà présente au sein de la station d'épuration et a permis de fixer un taux raisonnable de récupération de l'azote. L'efficacité des autres technologies a été estimée comme indiqué dans la colonne « hypothèses ».

La récupération de la struvite ne permet de récupérer qu'une fraction négligeable de l'azote, à peine 1,1%. En effet, la récupération de struvite, tout comme le stripping à l'air et les technologies membranaires ne sont applicables qu'aux jus de digestion des boues, qui correspond à seulement 27% de la charge totale en azote. Dans ce cas, le stripping à l'air a la meilleure efficacité de récupération (24%). Seule la récupération de l'urine (67% de la charge entrante en azote) et son traitement pourrait atteindre un pourcentage de récupération significatif. (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

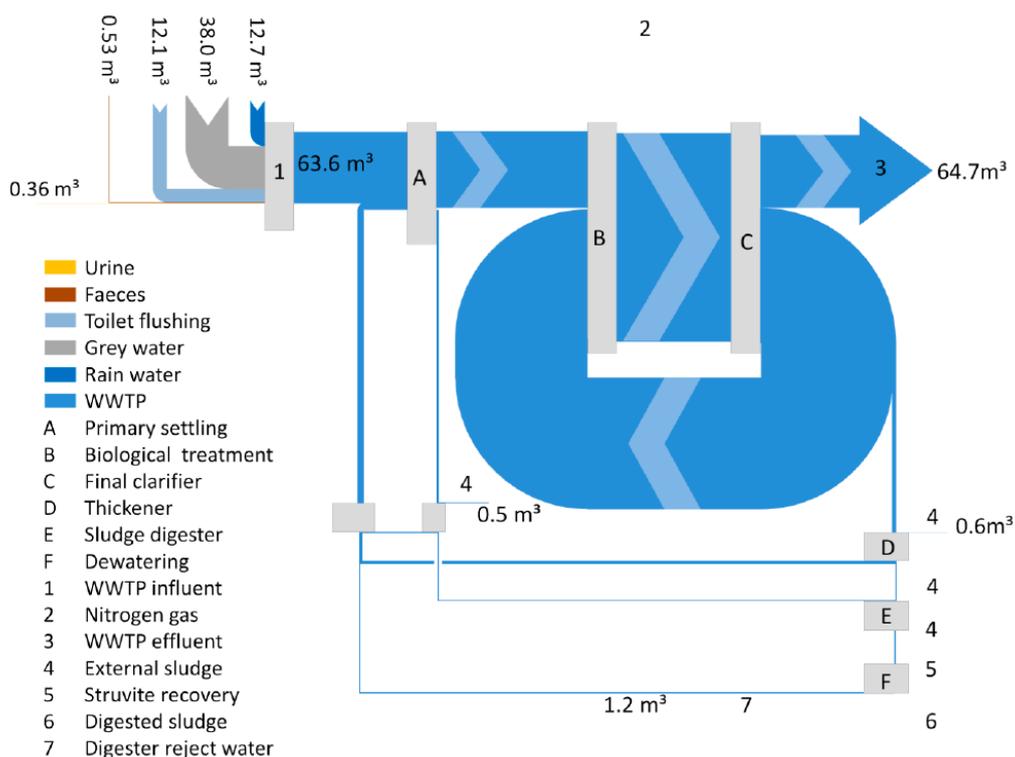


Figure IV-3 - Bilan de matière sur l'eau à la station d'épuration d'Amsterdam-West (débits en millions de m³/an) (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

<p>RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES</p>	<p>PR2301553_240926_Azote</p>
	<p>Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD</p>
	<p>Page 49 sur 70</p>

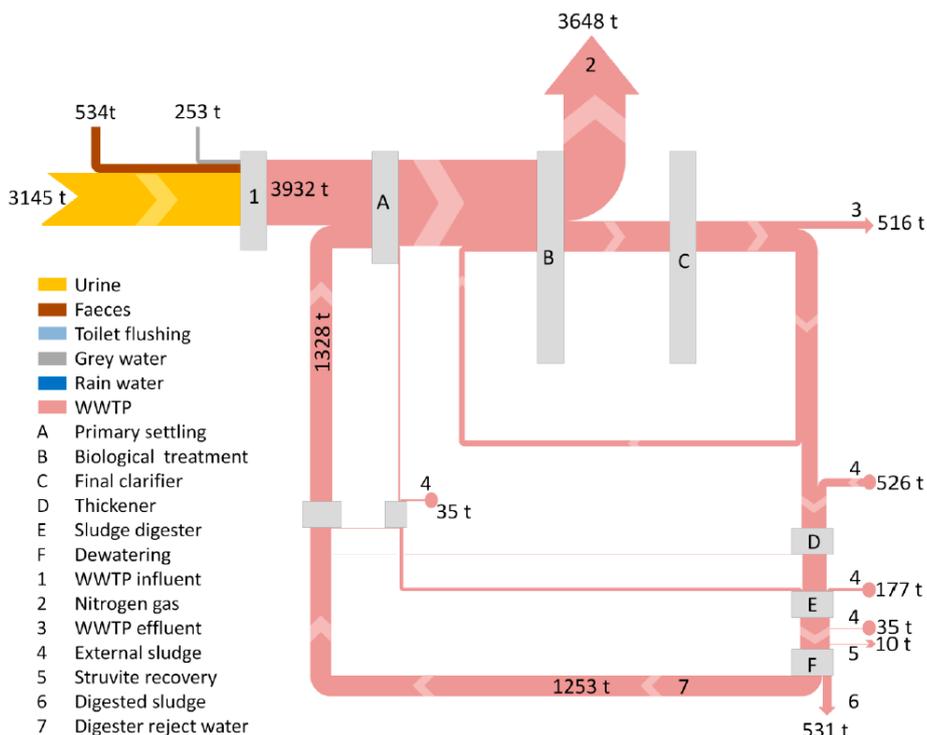


Figure IV-4 - Bilan de matière sur l'azote dans la station d'épuration d'Amsterdam-West (débit en tonnes par an)

Tableau IV-4 - Étude comparative des taux de récupération de l'azote à la station d'épuration d'Amsterdam-West en fonction des technologies et flux considérés. Basé sur (Van der Hoek, Duijff and Reinstra, 2018)

Technologie	Flux considéré	Hypothèses	Récupération de l'azote	
			Masse (tonnes/an)	% du flux total de N
Récupération de struvite	Boues digérées	Production de 900 tonnes de struvite avec 5,7 % de N	51,3	1,1
Stripping à l'air	Eau de rejet de digesteur	Efficacité de 90 %	1128	24
Séchage thermique des boues	Boues digérées	531 tonnes de N dans les boues, 19 % sous forme d'ammoniac, efficacité de 99 %	99,9	2,1
Membranes hydrophobes	Eau de rejet de digesteur	Efficacité de 75 %	940	20
Membranes à vide	Eau de rejet de digesteur	Efficacité de 75 %	940	20
Traitement de l'urine	Urine entrante	Récupération de 90 %	2831	60

Réutilisation des boues	Boues d'égout digérées	Application de 100 %	531	11
-------------------------	------------------------	----------------------	-----	----

IV-3. Anaergia (Canada)

Anaergia est une société qui propose des technologies de récupération des nutriments (stripping pour l'azote) couplée à de la production d'énergie.

Description du procédé :

Le procédé consiste à récupérer l'ammoniac via une technologie brevetée (AMR™) à partir des digestats à travers une série de quatre cuves permettant d'approcher des conditions de flux « piston » pour améliorer les performances. De la chaleur est fournie par la combustion du biogaz produit. L'ammoniac gazeux est récupéré dans une colonne et mis en contact avec de l'acide sulfurique pour former du sulfate d'ammonium. (Pikaar *et al.*, 2022) Plus de 90 % de l'azote, du potassium et du phosphore sont récupérés. Une pyrolyse (PyroSys™) convertit les boues déshydratées en biochars qui sont ensuite utilisés comme engrais.

Substrats considérés :

Digestats
Boues activées en excès et boues primaires
Déchets organiques co-digérés

Produits obtenus :

- biochar sans PFAS, microplastiques ni produits pharmaceutiques
- Engrais riche en azote

Installations en fonctionnement :

Au moins l'installation de traitement des eaux usées de Victor Valley en Californie, USA

(Anaergia, no date)

IV-4. Byosis (Nijhuis Water Technology B.V. - NL)

Nijhuis propose un procédé de récupération de l'azote (stripping) pour les secteurs industriels et municipaux.

Description du procédé :

Ce procédé consiste à éliminer l'ammoniac des digestats pour limiter les besoins en énergie du procédé biologique. Ce procédé consiste en un échangeur de chaleur, un stripping à l'air du CO₂ jusqu'à atteindre un pH égal à 9, un stripping de l'ammoniac, et un scrubber pour l'absorption des gaz. Le stripping est réalisé à 70°C. Le stripping de l'ammoniac sans ajout de réactif basique permet d'atteindre 75 à 80% de récupération. Toutefois, le pH diminue et doit être augmenté avec des réactifs pour atteindre une meilleure efficacité, en plus du chauffage.

La répartition des coûts est reprise ci-dessous :

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 51 sur 70

- Chaleur : 0,40 €/kg N
- Acide sulfurique : 0,40 €/kg N
- Maintenance : 0,10 €/kg N
- Puissance installée : 0,36 €/kg N
- Anti-incrustant : ?

Les économies et bénéfices réalisés sont les suivants :

- 0,35 €/kg N grâce aux anti-incrustants
- Vente du sulfate d'ammonium : 0,08 €/kg N

Il est également rapporté qu'une concentration supérieure à 2 g/L en azote ammoniacal est nécessaire pour que le procédé soit économiquement plus intéressant que le renvoi de l'effluent en tête de station d'épuration. (Pikaar *et al.*, 2022)

Substrats considérés :

Fraction liquide des déchets organiques tels que les boues d'épuration, le fumier ou les digestats. Le design du système évite les obstructions et peut traiter des liquides contenant jusqu'à 15% de matières sèches et/ou des particules jusqu'à 12 mm.

Produits obtenus :

Solution d'ammoniaque, de nitrate d'ammonium ou sulfate d'ammonium

Installations en fonctionnement :

Le procédé est opérationnel dans plusieurs installations :

- Tully Centralised Anaerobic Digestion Plant, en Irlande du Nord, pour le traitement de 40.000 tonnes/an de litière de volaille, avec production de solution de sulfate d'ammonium.
- Bio Energy Coevorden, aux Pays-Bas, pour la digestion de 300.000 tonnes/an de fumier et de déchets, avec production de solution de sulfate d'ammonium.
- ZWAR, à Bergen auf Rügen, en Allemagne, pour la récupération de plus de 80% de l'ammonium à partir de boues digérées et de condensats de sécheur de boues.
- Hardenberg, aux Pays-Bas, pour la récupération d'ammoniac à partir de flux de déchets sous forme de bicarbonate d'ammonium pour un traitement ultérieur en engrais.

(Nijhuis, no date) (European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-5. AgroAmerica (Guatemala)

Agro America est une entreprise spécialisée dans le traitement du fumier de porc, digestats et d'autres déchets organiques pour produire des produits utiles tels que du biochar tout en récupérant des nutriments.

Description du procédé :

Le principe général du procédé de récupération de l'azote de l'installation d'Agro America est le suivant :

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 52 sur 70

Le fumier de porc (ou le digestat) est séparé en fractions solide et liquide par une presse à bande, où la plupart du phosphore reste dans la fraction solide. La fraction liquide est épandue localement dans les champs. La fraction solide est ensuite séchée puis soumise à une pyrolyse, avec recyclage de l'énergie thermique. L'ammoniac peut être récupéré par évaporation puis concentré en solution d'ammoniaque. Le potassium peut être récupéré sous forme de concentré liquide.

Substrats considérés :

- Fumier de porc liquide ou sec
- Digestat de fumier et/ou d'autres déchets organiques

Produits obtenus :

- Biochar riche en phosphore
- Solution d'ammoniaque
- Solution concentrée en potassium
- Eau propre retournant aux eaux de surface

Installations en fonctionnement :

Plusieurs installations de traitement du fumier fonctionnent 24h/24 pendant des périodes significatives, en fonction de l'approvisionnement en fumier et des autorisations.

Les installations comprennent :

- Horst-Venlo (NL) en 2015 : Traitement de 250.000 tonnes de fumier par an
- Oirschot (NL) en 2019 : Traitement de 35.000 tonnes/an + **récupération N** et K
- Storg (BE) en 2020 : Traitement de 45.000 tonnes/an + **récupération N**
- Uden (NL) en 2021 : Traitement de 200.000 tonnes/an + **récupération N** et K
- Sterksel (NL) en 2021 : Traitement de 125.000 tonnes/an plus 80 000 tonnes supplémentaires
- En cours en 2022 : Almelo (NL) traitement de 200.000 tonnes/an + **récupération N, P et K**

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-6. AguaDB (UK)

AguaDB propose un procédé d'échange d'ions pour l'élimination des nitrates.

Description du procédé :

Le procédé se base sur l'échange d'ions pour éliminer les nitrates de l'eau potable. Du chlorure de potassium est utilisé comme sel de régénération. Cela génère des liquides riches en sulfate, nitrate et potassium, qui peuvent être utilisés comme engrais en aquaponie.

Substrats considérés :

- Traitement de l'eau potable
- Eaux usées

Produits obtenus :

Solution de nitrate, avec potassium, sulfate, calcium et magnésium.

Installations en fonctionnement :

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 53 sur 70

Un projet pilote de trois mois avec Affinity Water (une société d'eau potable britannique fournissant 3,6 millions de personnes) a montré une élimination efficace des nitrates jusqu'à 5 mgN/l. La solution résultante a été démontrée comme étant efficace pour une utilisation en hydroponie.

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-7. AMFER (Colsen - NL)

AMFER, développé par Colsen, est un système de récupération de l'azote à partir de flux riches en ammoniac tels que le fumier frais ou le digestat.

Description du procédé :

L'ammoniac est éliminé de l'effluent liquide par strippage par chauffage (60-70°C), et par strippage au CO₂ et/ou ajouts de réactifs pour augmenter le pH. Ensuite, il est récupéré par scrubbing avec de l'acide sulfurique ou de l'acide nitrique.

Substrats considérés :

Digestat ou fumier, liquide ou mélangé

Produits obtenus :

Sulfate d'ammonium ou nitrate d'ammonium, avec une concentration pouvant atteindre 75 g/l pour le sulfate d'ammonium et 150 g/l pour le nitrate d'ammonium.

Installations en fonctionnement :

Trois usines à grande échelle fonctionnent depuis 2021 :

- Van Alphen – Axel NL (30.000 t/an de digestat de station d'épuration)
- Bio-gas Veendam – Veendam NL (30.000 t/an de digestat de station d'épuration)
- Green Create W2V Kent – Kent UK (170.000 t/an de digestat de station d'épuration).
- Des installations en conteneurs sont également disponibles, traitant jusqu'à 43.000 t/an de digestat de station d'épuration.

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-8. Anuvia Plant Nutrient (USA)

Anuvia Plant Nutrients développe des engrais à partir de matières organiques combinés avec des nutriments minéraux.

Description du procédé :

La matière organique est traitée de manière à créer une matrice chargée permettant la fixation des nutriments par échange d'ions. Moins de 5% des nutriments du produit final proviennent des substrats organiques utilisés, la plupart étant ajoutés sous forme de minéraux tout au long du processus de fabrication.

Substrats considérés :

Déchets de culture, fumiers, déchets de transformation alimentaire et déchets issus des eaux usées

Produits obtenus :

Engrais sous forme de granulés (SymTRX®)

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 54 sur 70

Installations en fonctionnement :

Après 5 ans de développement et plus de 450 essais sur le terrain, et suite à l'ouverture d'une nouvelle installation de production à Plant City, en Floride, Anuvia peut produire jusqu'à 1,2 million de tonnes par an de SymTRX.

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-9. Aqua2®N (EasyMining – Allemagne & Suède)

Description du procédé :

Aqua2®N, développé par EasyMining, est un procédé de récupération de l'ammonium à partir de liquides contenant une concentration élevée en ammonium, tels que les liquides de déshydratation des boues de traitement des eaux usées.

L'azote ammoniacal est d'abord précipité avec un produit chimique spécifique. Ensuite, le précipitant est régénéré et renvoyé à la première étape, et de l'acide est utilisé pour convertir l'azote en une forme utilisable soit directement comme engrais, soit pour la production d'engrais transformé.

Substrats considérés :

Liquides avec une concentration élevée en ammonium, tels que les liquides de déshydratation des boues de traitement des eaux usées.

Produits obtenus :

Sulfate d'ammonium

Installations en fonctionnement :

Usine pilote de démonstration d'une capacité de 4 m³/h d'eau entrante à la STEP de Lynetten (Copenhague) , dans le cadre du projet LIFE RE-Fertilize d'EasyMining, atteignant 95% de récupération. Le procédé est désormais en cours de commercialisation.

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-10. CCm Technologies (UK)

Description du procédé :

CCm Technologies se spécialise dans la capture du carbone, en particulier à partir de digestats de boues d'épuration, de déchets alimentaires, de fumier ou d'autres déchets biologiques. L'ammoniac capturé des digestats est utilisé pour capturer le CO₂ des digesteurs, formant ainsi du carbonate d'ammonium. Ce carbonate est ensuite combiné avec les matières organiques dans les gâteaux de digestat, stabilisant ainsi le composé. Le produit est ensuite séché et granulé pour produire un engrais organo-minéral stable.

Substrats considérés :

Digestats de boues d'épuration, déchets alimentaires, fumier ou autres déchets biologiques, ainsi que, dans certains cas, d'autres matériaux secondaires tels que les copeaux de bois, les fibres organiques et les cendres de biomasse.

Produits obtenus :

Engrais organo-minéral sous forme de granulés (CcmGrowth®), contenant de l'azote et du phosphore stabilisés.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 55 sur 70

Installations en fonctionnement :

CCm Technologies dispose de plusieurs installations :

- Un démonstrateur industriel au Kew Technology Sustainable Energy Centre, au Royaume-Uni. Capacité de production : 500 t/an. Opérationnel au T1 2022.
- Un démonstrateur industriel sur le site de Severn Trent Water à Minworth, au Royaume-Uni. Capacité de production : 10 000 t/an. Opérationnel depuis 2021.
- Une usine à grande échelle sur le site de l'usine de transformation de pommes de terre Walkers (Pepsico) à Leicester, au Royaume-Uni. Capacité de production : 12 000 t/an. Opération prévue pour le T2 2022.

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-11.DUCTOR (Finlande)

Description du procédé :

Intégration de la digestion anaérobie avec la production de biogaz et d'engrais. L'azote est éliminé lors d'une pré-fermentation avant la digestion pour éviter les problèmes d'inhibition par l'ammoniac dans le fermenteur. Pas d'information supplémentaire.

Substrats considérés :

Fumiers riches en azote, en particulier de volaille

Produits obtenus :

- Solution de sulfate d'ammonium
- Engrais solide composé de la fraction solide du digestat

Installations en fonctionnement :

- une installation à grande échelle en exploitation à Jalisco, au Mexique, depuis 2021, traitant environ 3.000 tonnes/an de fumier de poulet.
- Une installation mise en service en 2022 à Haren (Emsland, Basse-Saxe, Allemagne), produisant notamment une solution de sulfate d'ammonium à partir d'environ 8.000 tonnes/an de fumier de poulet.
- Des projets sont également en phase de planification en Suède et aux États-Unis.

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-12.GENIUS (Nijhuis Saur Industries – UK & Irlande)

Description du procédé :

Le procédé GENIUS développé par Nijhuis Saur Industries traite le digestat de lisier liquide. Il comprend une séparation solide/liquide par centrifugation et flottation à l'air dissous, suivi d'un strippage à chaud de l'ammoniac et scrubbing à l'acide sulfurique (procédé AECO-NAR®)⁵ et d'une filtration à membrane en deux étapes (UF-RO) pour produire une solution (10-20 %) d'engrais N-K et de l'eau purifiée. La

⁵ Cette étape spécifique à l'azote n'est pas toujours implémentée.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 56 sur 70

fraction solide résultante (10-20%) est hygiénisée et transformée en un engrais organique riche en phosphore.

Substrats considérés :

- Digestat de lisier liquide

Produits obtenus :

- Solution d'engrais N-K utilisée localement par les agriculteurs, avec une teneur en azote de 1 à 1,5 % et environ 1 % de potassium
- Engrais organique solide riche en phosphore, avec une teneur en phosphore de 1 à 3 % (poids sec)
- Eau propre

Installations en fonctionnement :

Une installation à grande échelle est opérationnelle depuis 2019 à Groot Zevert Digestion, Beltrum, aux Pays-Bas, avec une capacité de traitement de 100.000 tonnes/an de lisier (poids humide) et 20.000 t de co-substrats.

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-13.HTCycle (Allemagne)

Principe

La carbonisation hydrothermale en continu (HTC), ou pyrolyse humide, convertit en quelques heures la biomasse en biocharbon, ou HYDROCHAR⁶ par réaction à température élevée (entre 180 et 260°C) et pression élevée (10 à 50 bars) en absence d'oxygène.

Description du procédé :

Le processus breveté HTCycle est une technologie de carbonisation hydrothermale continue, utilisant de la vapeur comme milieu réactionnel à environ 220°C, 24 bars pendant 3 à 5 heures.

Substrats considérés :

- Boues d'épuration avec 25-30% de matière sèche.

Produits obtenus :

- Biochar ou hydrochar (HTC coal) pouvant être utilisé dans le traitement des eaux usées pour éliminer les hormones et les résidus pharmaceutiques.
- Le phosphore peut être extrait du charbon, soit avant soit après son utilisation pour la purification de l'eau, en utilisant de l'acide sulfurique, pour produire de l'acide phosphorique.
- L'ammoniac extrait des gaz résiduels peut être soit réagi avec le phosphore pour produire de la struvite et/ou utilisé pour produire du sulfate d'ammonium.

⁶ Différent du BIOCHAR obtenu par pyrolyse sèche lente – voir à ce sujet Partie 1 – Valorisation des matières organiques dans les eaux usées

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 57 sur 70

Installations en fonctionnement :

Pas d'informations.

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-14. Manure slurry acidification (Biocover - Danemark)

Description du procédé :

Le procédé d'acidification du lisier, développé par BioCover en collaboration avec Vogelsang GmbH, vise à améliorer la gestion du lisier en utilisant une technologie intégrée dans l'équipement de stockage et de distribution de lisier existant des agriculteurs. Ce procédé consiste à injecter de l'acide sulfurique dans le lisier lors de son épandage sur le champ. Le processus entraîne une formation de mousse du lisier avant d'atteindre le champ et abaisse le pH en dessous de 6,4. Cela réduit les émissions d'ammoniac jusqu'à 70 % et augmente l'ammonium disponible pour les plantes. Il n'y a aucun sous-produit indésirable résultant du procédé.

Substrats considérés :

Lisier organique ou digestat

Produits obtenus :

Lisier plus acide, et donc contenant de l'ammonium restant disponible.

L'acidification convertit également le phosphate de calcium en phosphore disponible pour les plantes.

Installations en fonctionnement :

Ce système a le statut de Meilleures Techniques Disponibles (BAT) de l'UE pour le stockage et l'épandage de lisier, ainsi que la certification VERA. Il y a 154 unités opérationnelles dans 8 États membres de l'UE. Il est appliqué sur environ 20 % du volume de lisier au Danemark.

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-15. N2-Applied (Norvège)

Description du procédé :

Procédé visant à réduire les émissions d'ammoniac et de méthane lors du stockage et de l'application sur le terrain du lisier, tout en améliorant l'efficacité d'utilisation de l'azote. Tout d'abord, le lisier ou le digestat subit une étape de séparation liquide/solide, la plupart du phosphore restant dans la fraction solide. La fraction liquide est ensuite traitée dans un réacteur à plasma utilisant de l'électricité renouvelable et de l'air pour fixer l'azote de l'air, générant des oxydes d'azote. Ces oxydes sont ensuite mélangés au lisier ou au fumier et réagissent pour former des nitrates et des nitrites. Cela abaisse le pH de sorte que l'azote ammoniacal soit stabilisé. Après la séparation solide/liquide, la fraction liquide du lisier ou du digestat peut être gérée comme un engrais liquide à base de nitrate d'ammonium stabilisé, tandis que la plupart du phosphore reste dans la fraction solide.

Substrats considérés :

- Lisier de bétail, digestat de biogaz (tout type d'entrées).

Produits obtenus :

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 58 sur 70

- Engrais liquide à base de nitrate d'ammonium stabilisé

Installations en fonctionnement :

Des pilotes à l'échelle de la ferme ont été réalisés en 2021 et 2022, traitant entre 5 et 15 m³/jour (de fraction liquide) sur des exploitations au Royaume-Uni, en Norvège, en Suède, en Finlande, au Danemark et aux Pays-Bas, sur du lisier frais de vache et de porc ainsi que sur divers digestats de biogaz (variés en termes de matière première). Le lancement commercial était prévu en 2022 avec des unités N2 traitant entre 5 et 15 m³ (de fraction liquide) par jour, principalement en fonction de la teneur en ammoniac-N du matériau d'entrée.

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-16.PAKU (Endev - Finlande)

Description du procédé :

PAKU, développé par Endev, est un procédé de traitement des boues d'épuration qui vise à produire des cendres à faible teneur en contaminants, utilisables comme engrais, et à éliminer les contaminants organiques présents dans les boues d'épuration. Les boues déshydratées sont thermiquement séchées à 95 % de matières sèches, en utilisant de l'énergie secondaire provenant du réacteur PAKU (la chaleur est transférée à l'aide de sable chaud). Le condensat du sécheur subit une récupération d'azote (stripping d'ammoniac) et une récupération d'énergie. Les boues séchées sont ensuite incinérées à 850 °C dans le réacteur PAKU, sans besoin d'apport de combustible supplémentaire en fonctionnement. Les cendres de l'étape d'incinération sont séparées en une fraction d'engrais et une petite fraction (environ 5 % de la production de cendres) qui est envoyée en décharge.

Substrats considérés :

Boues d'épuration déshydratées ou digestat de boues déshydratées.

Produits obtenus :

- Cendres avec des niveaux de contaminants faibles pouvant être utilisées comme engrais. Les contaminants organiques présents dans les boues d'épuration sont éliminés.
- Solution de sulfate d'ammonium, 25 %.
- Énergie secondaire pour, par exemple, le réseau de chauffage urbain : environ 1 MWh de chaleur par tonne de boues traitées.

Installations en fonctionnement :

Une usine pilote à pleine échelle fonctionne depuis 2019 à la station d'épuration de Rovaniemi, en Finlande (projet NEVE), avec une capacité de 10 kt/an de boues (25 % de MS) = boues pour 50.000 équivalents habitants.

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-17.RAVITA® (HSY - Finlande)

Description du procédé :

Ravita, développé par l'Autorité des services environnementaux de la région d'Helsinki, est un procédé de récupération du phosphore et de l'azote à partir des effluents des stations d'épuration des eaux usées. Le processus implique une post-précipitation chimique sur l'effluent de la station d'épuration,

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 59 sur 70

suivie d'une récupération du phosphore à partir de la boue riche en phosphore résultante. De plus, la récupération de l'azote est effectuée à partir jus de déshydratation des boues d'épuration. Les produits de sortie incluent de l'acide phosphorique, la récupération de produits chimiques de fer/aluminium pour une utilisation comme coagulants dans l'élimination du phosphore des stations d'épuration, et du phosphate d'ammonium.

Substrats considérés :

- Eaux usées

Produits obtenus :

- Acide phosphorique
- Sels de fer/aluminium
- Phosphate d'ammonium.

Installations en fonctionnement :

La post-précipitation est opérationnelle depuis 2017 à la STEP de Viikinmäki avec un pilote de 1000 EH pour l'élimination tertiaire du phosphore (atteignant un rejet de 0,4 mgP/l dans les eaux usées de la station d'épuration). La récupération du phosphore est toujours en phase de test et de scale up. (European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-18.Struvite: WASSTRIP (Ostara), Phosphogreen (Suez), Phosporce (Veolia), Parforce, Pearl (Ostara), NuReSys, Struvia (Veolia), Airprex, Phorwater

Description du procédé :

Ces procédés de récupération de struvite sont conçus pour les stations d'épuration utilisant l'élimination biologique du phosphore (EBPR), généralement avec digestion des boues (AD). Ils ciblent la récupération des nutriments dans le flux de retour de digestion anaérobie ou de séparation liquide/solide des boues non digérées. Ces procédés sont surtout adaptés à la récupération du phosphore.

Substrats considérés :

Eaux usées

Produits obtenus :

Struvite

Installations en fonctionnement :

- Environ 100 unités de précipitation de struvite à pleine échelle opèrent dans des stations d'épuration des eaux usées et d'autres installations de traitement des eaux usées dans le monde entier. Certaines unités fonctionnent depuis plus de 10 ans.
- La plus grande installation à ce jour est Ostara à la STEP de Chicago Stickney, produisant environ 9.000 tonnes/an de struvite.
- La plus grande installation en Europe nordique est Phosphogreen à la STEP de Marselisborg, au Danemark, avec une capacité de 200 t/an de struvite.
- Veolia (Struvia) propose également des installations compactes et a également démontré la récupération de struvite dans une STEP à bio-P sans AD (LET Brésil 2017).
- Les installations en fonctionnement sur d'autres flux comprennent l'unité NuReSys chez Clarebout Potatoes (Belgique), produisant environ 440 t/an de struvite.
- Ostara WASSTRIP (Crystal Green) fonctionne dans 12 STEP dans le monde
- Phosphogreen à Aarhus Åby, avec 70.000 équivalents habitants depuis 2013

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 60 sur 70

- Veolia Phosphogreen : essais à l'échelle pilote sur 3 sites, avec une mise à l'échelle de la démonstration prévue.
- Parforce : en construction (début 2022) à Wolfsburg, en Allemagne, avec une capacité de 150 000 équivalents habitants

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-19. Struvite (MSE-mobile - Allemagne)

Description du procédé :

Ce procédé de récupération de struvite est conçu pour les stations d'épuration utilisant l'élimination chimique ou biologique du phosphore, par ajout d'acide sulfurique aux boues d'épuration pour dissoudre le phosphore, suivi d'une séparation solide/liquide avec un filtre à presse. La phase liquide acide est traitée avec de l'acide citrique pour complexer et éliminer les ions métalliques, puis neutralisée avec de l'hydroxyde de sodium et de l'oxyde de magnésium est ajouté pour précipiter la struvite. Ce procédé est surtout dédié à la récupération du phosphore.

Substrats considérés :

Boue d'épuration avant la déshydratation, provenant des stations d'épuration utilisant l'élimination chimique ou biologique du phosphore

Produits obtenus :

- Struvite
- Boue d'épuration déshydratée appauvrie en phosphore (gâteau de filtre)

Installations en fonctionnement :

Une installation pilote mobile (deux conteneurs) est en fonctionnement depuis 2016 dans 7 stations d'épuration. Elle a une capacité de traitement de 50 tonnes par jour de boue d'épuration entrante (poids humide avant la déshydratation).

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

IV-20. Varcor® (Sedron - USA)

Description du procédé :

Le procédé Varcor® de SEDRON est une technologie de traitement de l'eau et de l'assainissement. Il combine la recompression mécanique des vapeurs (MVR – récupération d'énergie pour le chauffage) et le séchage en couche mince des boues avec la récupération de l'ammoniac par condensation.

Substrats considérés :

- Fumiers
- Boues d'épuration (avant ou après digestion anaérobie)
- Flux de déchets organiques de l'industrie alimentaire

Produits obtenus :

- Engrais solide organique pelletisé (à haute teneur en carbone organique), sec (<10% d'eau), désinfecté (100°C pendant un minimum garanti de 2 minutes)

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 61 sur 70

- Solution d'ammoniaque : 10%-12% N. Vendue comme engrais liquide. Sans phosphore.
- Le produit solide peut également être incinéré pour la production d'énergie.
- Eau claire

Installations en fonctionnement :

Début 2023 : deux unités à pleine échelle en fonctionnement, opérant depuis 1 à 3 ans, ainsi que des pilotes à l'échelle industrielle.

- Unité de 150 000 t-ww/an traitant le fumier brut de 4000 vaches, Indiana, en fonctionnement depuis 2020.
- Unité de 150 000 t-ww/an traitant les boues d'épuration et les boues de fosses septiques, Seattle, depuis 2022.
- Unité de 1000 t-ww/an traitant les déchets de distillateurs (vinasse) depuis 2022.
- Unité de 800 000 t-ww/an de fumier laitier en cours de construction.
- Traitement des boues de la STEP de Sumner, Washington, 20.000 m³/j (2023)

(European Sustainable Phosphorus Platform, 2023)

V. INVENTAIRE DES GISEMENTS EN RÉGION WALLONNE

V-1. Inventaire des STEP urbaines

Une base de données reprend l'ensemble des stations d'épuration et leurs caractéristiques (débit journalier, concentrations avant et après traitement, capacité épuratoire, ...) en 2020, 2021 et 2022⁷. La répartition de la capacité épuratoire (EH administratif⁸ nominal), essentiellement concentrée au nord du sillon Sambre-Meuse est reprise dans la carte à Figure V-1.

⁷ Source : SPGE, 2022

⁸ Par « EH administratif », on se réfère à la définition « européenne » de l'EH, soit 60 g DBO5/jour

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 62 sur 70

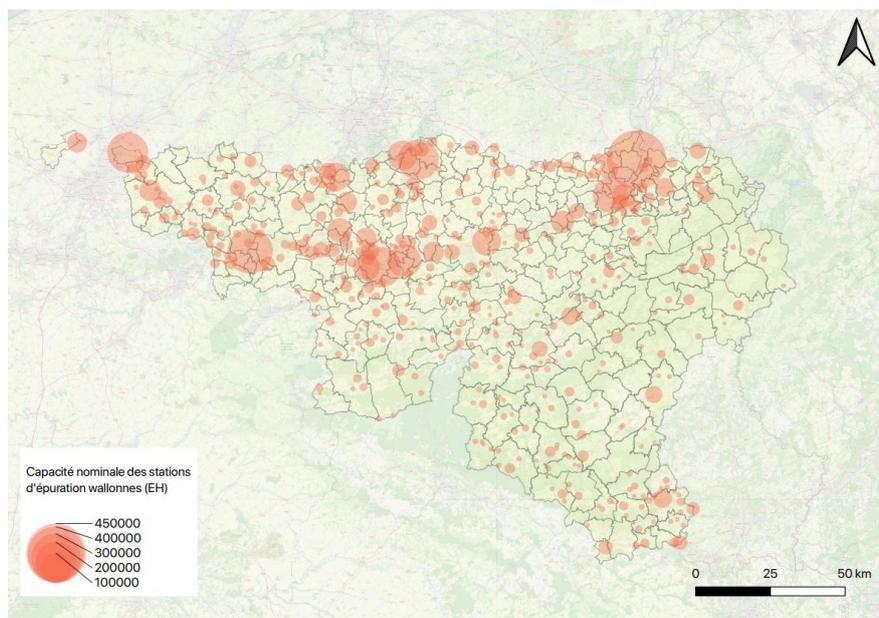


Figure V-1 - Capacité épuratoire des stations d'épuration Wallonnes

V-2. Charges en azote à l'échelle du territoire

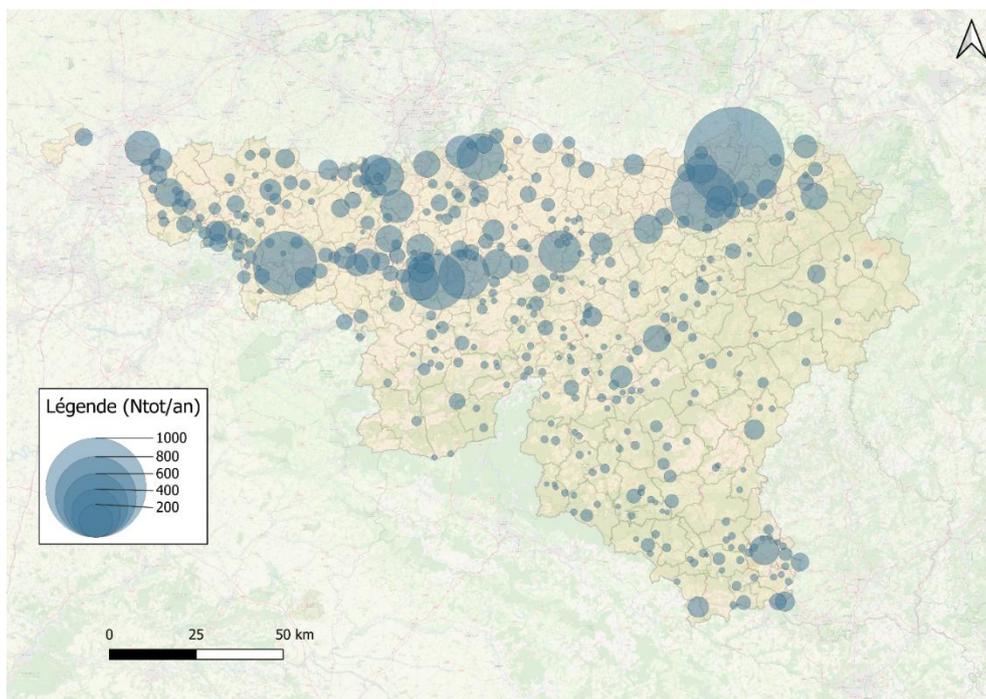


Figure V-2 – Charge annuelle en azote dans les stations d'épuration Wallonnes

La Figure V-2 représente les 444 stations d'épuration de la base de données et leur charge moyenne en azote (t/an).

En 2022, la charge totale en azote était de 11.274 t/an :

<p>RESRECOVERY</p> <p>PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES</p>	<p>PR2301553_240926_Azote</p>
	<p>Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD</p>
	<p>Page 63 sur 70</p>

- 25 stations reçoivent une charge supérieure à 100 t N/an pour un total de 6.360 t/an, c'est-à-dire plus de 56 % de la charge totale.
- 124 stations reçoivent une charge supérieure à 10 tonnes par an pour un total de 3.980 t/an, soit 35 % de la charge totale.

En se limitant aux stations de capacité administrative ≥ 2000 EH, soit 208 STEP ($\sim 47\%$ des 444 documentées dans la base de données), la charge en azote totale est de 10.720 t N/an, soit 95% de la charge globale.

La charge moyenne des plus grosses stations d'épuration est de :

- Liège Oupeye : 898 t N/an
- Wasmuel : 580 t N/an
- Basse Wavre : 370 t N/an
- Montignies sur Sambre : 466 t N/an
- Mouscron : 203 t N/an

La répartition de la charge azoté est d'environ 63 % sous forme ammoniacale, 34 % sous forme organique et 3% sous forme oxydée.

Selon le procédé épuratoire mis en œuvre et le mode de gestion/traitement des boues, la charge azotée entrante se répartit différemment dans les différents formes chimiques et différents compartiments de sortie : azote gazeux, organique ou minéral, réduit ou oxydé ; dans l'effluents, les boues ou l'atmosphère.

Le graphique de la Figure V-3 présente une répartition, en première approche, des différentes formes de l'azote dans les différents compartiments. Plusieurs hypothèses ou simplifications ont été faites :

- Seules les stations pour lesquelles nous disposons d'analyses complètes sur l'azote (NK et Ntot, in et out) ont été prises en compte, cela représente 385 STEP (87 % du parc) et 3.971.548 EH adm (97 % du parc). ;
- Lorsqu'il y a une décantation primaire, on considère que 10 % de l'azote entrant est décanté dans les boues primaires (Deronzier Gaëlle *et al.*, 2001);
- La teneur en azote des boues secondaire est fixée à 5,5 % ;
- La digestion des boues libère 50 % de l'azote qu'elles contiennent ;
- Dans l'effluent, l'azote ammoniacal représente en moyenne 56 (± 2 %) de l'azote réduit (données 2022 – 10.786 analyses)

Sur cette base, on estime qu'environ la moitié de l'azote de l'influent est oxydé en azote gazeux, le solde se répartit environ 1:1 entre l'effluent et les boues (ou leurs sous produits).

L'azote le plus facilement récupérable (par précipitation dans les jus de digestion) représente environ 100 t/an ($< 1\%$ de la charge in). Toutefois, l'azote précipitable étant stoechiométriquement limité par la quantité de phosphore présente (34,5 tP/an estimé dans les jus), seulement 15,6 t/an pourraient être récupérées sous forme de struvite.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 64 sur 70

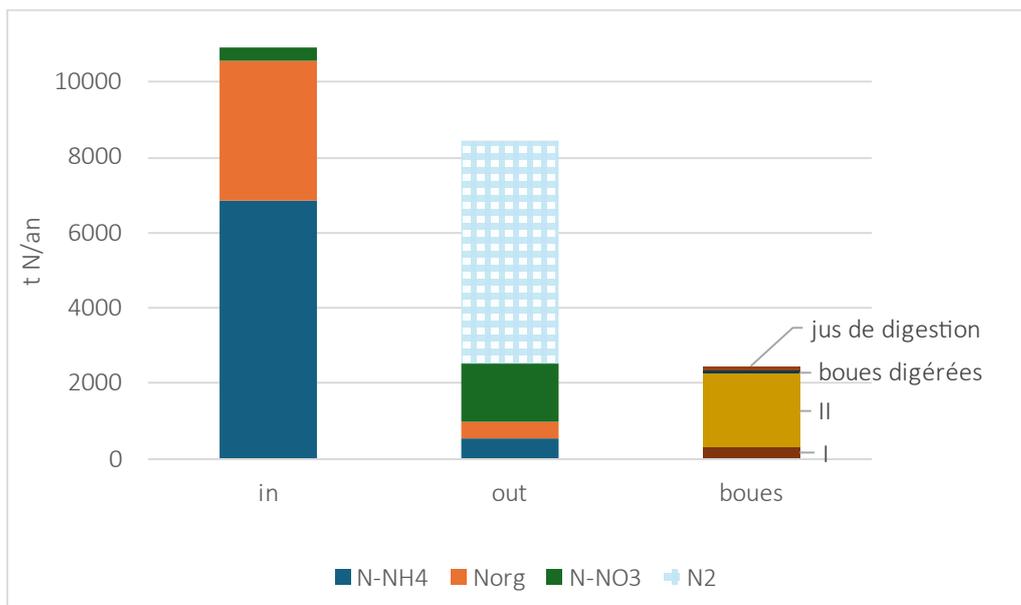


Figure V-3 : Bilan global sur l'azote, approche macroscopique sur 385 STEP– données 2022

V-3. Gisement associé aux ERI

Sur base de la caractérisation des effluents industriels pour la détermination de la charge polluante, les charges en azote rejetées dans les égouts (eaux brutes) par les entreprises des différents secteurs sont représentées (○) à la Figure V-4.

Ce graphique permet d'appréhender :

- L'importance du gisement global associé aux industries d'un secteur (taille du point) ;
- L'importance du gisement moyen par entreprise d'un secteur donné (axe des abscisses) ;
- La concentration moyenne en phosphore dans les effluents d'un secteur donné (axe des ordonnées).

Le gisement global en azote dans les eaux industrielles rejetées en égout est de l'ordre de 372 t/an. Plus spécifiquement, on relève comme potentiellement intéressants :

- Dans le domaine agroalimentaire :
 - Sur 7 à 8 sites, les abattoirs totalisent 34 tN/an, soit près de 10% de la charge industrielle rejetée en égout, dans des effluents très concentrés (~ 240 mgN/L)
 - L'industrie de la pomme de terre : ~ 68 tN/an et ~ 11 t/site (pour les rejets en égout) ; effluents concentrés (~ 50 mgN/L) ;

- Les industries laitière, de transformation de la viande et d’abattoirs de volaille génèrent des effluents concentrés en azote (~ 100 mgN/L) pour un total ~ 53 tN/an et ~ 1 à 5 t/site (pour les rejets en égout)
- Dans le domaine de l’industrie chimique :
 - l’industrie des peroxydes (1 seul rejet concentré - ~ 115 mg/L – représente ~ 5 % de la charge totale – 17 tN/an en moyenne) ;
 - l’industrie pharmaceutique : ~ 16 tN/an et ~ 1 t/site (pour les rejets en égout) ; effluents moins concentrés (~ 12 mgN/L)

De même, les rejets des brasseries et d’ autres IAA en général représentent des gisements non négligeables d’azote (77,5 t/an, ~ 1 à 1,5 t/an/rejet à des concentrations de l’ordre de 40 à 80 mgN/L).

Plusieurs observations nuancent ce constat :

- La base de données de caractérisation des rejets industriels ne permet pas de faire la distinction entre les différentes formes de l’azote. Néanmoins, en ce qui concerne les industries agroalimentaires, constituant la majorité des sources industrielles d’azote dans les eaux résiduaires collectées, il s’agit vraisemblablement pour une grande partie d’azote réduit ;
- Les données utilisées caractérise le rejet final, il existe certainement dans de nombreux cas des flux plus concentrés au sein des process industriels, plus favorable à une récupération de l’azote ;
- Comme pour le phosphore : récupération à la source (au niveau de l’industrie) et récupération dans la STEP sont antinomiques ;
- Enfin, en ce qui concerne une potentielle récupération par rpécipitation (struvite), le phosphore est largement limitant d’un point de vue stoechiométrique, les ● sur la Figure V-4 représentent à l’échelle la charge maximale en azote récupérable sous forme de struvite (si tout le phosphore était sous forme de phosphate et si le rendement de précipitation était de 100%) sans ajout complémentaire de phosphates. Celle-ci ne représente plus qu’un total de 35,75 tN/an, soit moins de 10% de la charge totale. Parmi les principaux contributeurs à la charge, les secteurs de brasseries et de l’industrie laitière sont ceux qui présente le ratio stoechiométrique P/N le moins défavorable (respectivement 17 et 25%).

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L’AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 66 sur 70

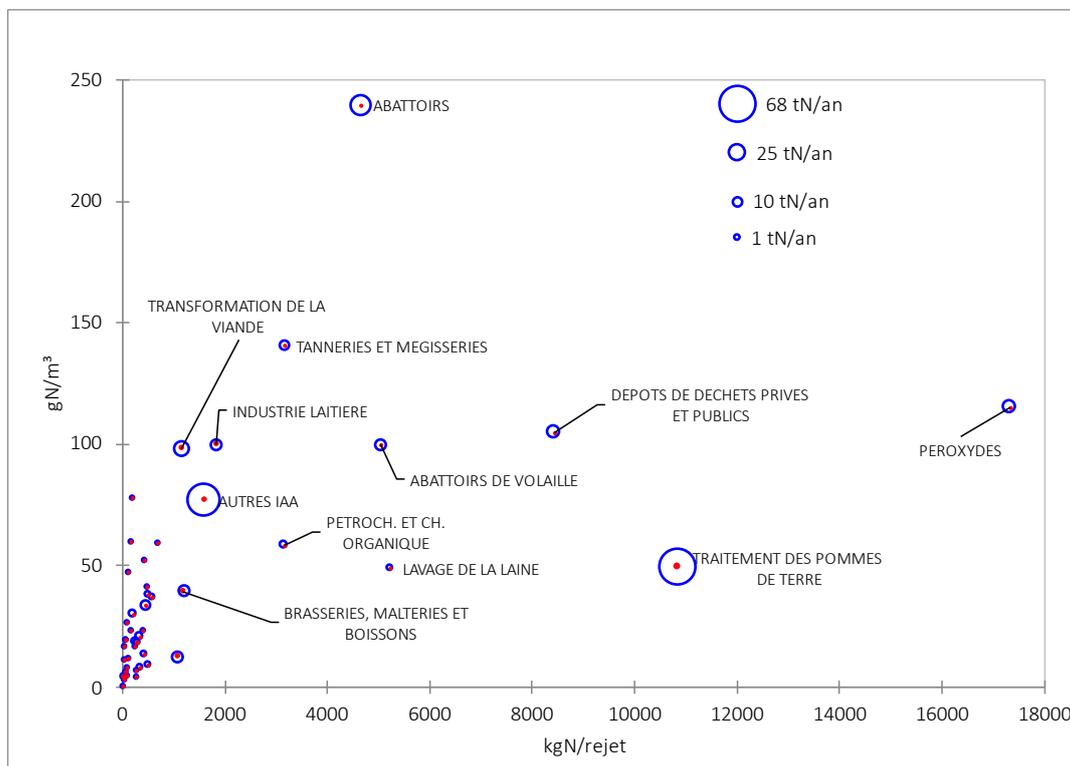


Figure V-4 : Charge en azote dans les effluents des différents secteurs industriels (○) et charge récupérable par précipitation sous forme de struvite (●).

En ce qui concerne les entreprises rejetant **en eau de surface** et réalisant en général leur propre épuration, les charges correspondantes sont difficiles à estimer.

Sur base des concentrations moyennes estimées ci-dessus pour les rejets en égout, complétées par des valeurs de référence pour les secteurs pour lesquels il n'existe aucun rejet en égout⁹, et des débits rejetés, on estime très grossièrement la charge azotée avant épuration pour l'ensemble des entreprises rejetant en eau de surface à environ 6.000 tN/an, soit 16 fois plus que les rejets en égout.

A priori, les secteurs générant les charges (brutes) en azote les plus importantes sont les secteurs des engrais (2.700 t/an), du papier/carton (1.200 t/an). Les industries sucrière, laitière, de traitement des

9

	N mg/L	P mg/l
INDUSTRIE SUCRIERE	100	20
DISTILLERIES ET LEVURERIES	140	15
ENGRAIS	75	2,3
PRODUCTION DE PRODUITS PYROTECHNIQUES	45	0,2

pommes de terre, les distilleries et levureries, les brasseries et les abattoirs totaliseraient de l'ordre de 950 tN/an.

Un certain nombre de ces entreprises sont équipées ou s'équipent de biométhaniseurs, une piste intéressante à étudier serait la possibilité de valorisation de l'azote conjointement au phosphore présent dans les digestats de ces industries. De nombreux facteurs seraient à prendre en compte tels que les équipements déjà en place, le coût, encore mal connu, d'une installation de récupération, les possibilités de débouchés pour les valorisation du phosphore récupéré,...

VI. SYNTHÈSE

La récupération de l'azote dans les eaux usées est très un « bénéfice collatéral » de la récupération du phosphore, par co-précipitation sous forme de struvite. L'intérêt de produire un amendement du sol azoté dans une démarche de circularité n'est toutefois pas sans intérêt.

Un autre aspect à prendre en compte est l'aspect énergétique (économie d'énergie liée à l'aération nécessaire au processus de nitrification). En outre, le processus de nitrification-dénitrification tel qu'actuellement pratiqué dans la plupart des STEP est à l'origine d'émissions de N₂O, parmi les GES les plus puissants.

De multiples technologies sont déjà au point et certaines font l'objet de mises en œuvre à l'échelle industrielle.

La majorité d'entre elle récupèrent l'azote par :

- Précipitation conjointe avec le phosphore dans les flux liquides, dans le cas des stations urbaines il s'agit essentiellement des jus de digestion ou de déshydratation des boues. Dans ce cas, le taux de récupération de l'azote est généralement limité par la stoechiométrie (rapport P/N limitant)
- Stripping et scrubbing pour produire une solution, généralement de sulfate ou de nitrate d'ammonium.

Les principaux aspects et implications liés à ces technologies sont synthétisés dans la grille annexée en fin de ce rapport.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 68 sur 70

VII. BIBLIOGRAPHIE

1H2O3 (no date) *Le cycle de l'azote*. Available at: <https://www.1h2o3.com/apprendre/parametres-des-eaux-usees/parametres-de-qualite-des-eaux-usees/cycle-azote-en-epuration-nitrification-et-denitrification/> (Accessed: 15 March 2024).

Al-Juboori, R.A. *et al.* (2023) 'Membrane Technologies for Nitrogen Recovery from Waste Streams: Scientometrics and Technical Analysis', *Membranes*. MDPI. Available at: <https://doi.org/10.3390/membranes13010015>.

Anaergia (no date) *Nutrients & Biosolids Management*. Available at: <https://www.anaergia.com/solutions/wastewater-resource-recovery/nutrients-biosolids-management/> (Accessed: 9 April 2024).

Beckinghausen, A. *et al.* (2020) 'From removal to recovery: An evaluation of nitrogen recovery techniques from wastewater', *Applied Energy*, 263, p. 114616. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114616>.

Chen, G.H. *et al.* (2020) *Biological Wastewater Treatment*.

Chripim, M.C., Scholz, M. and Nolasco, M.A. (2019) 'Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: Critical review of challenges and opportunities for developing countries', *Journal of Environmental Management*. Academic Press. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109268>.

Dai, F. *et al.* (2019) 'Microbial characteristics of nitrifiers, denitrifiers and anammox bacteria on different support media to treat space mission wastewater', *Journal of Environmental Management*, 232, pp. 943–951. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.008>.

Deronzier Gaëlle *et al.* (2001) *traitement de l'azote dans les stations d'épuration biologique des petites collectivités*.

Djelal, H., Rigail, M. and Boyer, L. (2008) 'Les effluents industriels et leur traitement', *Management & Avenir*, n° 20(6), pp. 275–288. Available at: <https://doi.org/10.3917/mav.020.0275>.

Etat de l'environnement wallon (2022) *Consommation d'engrais en agriculture*. Available at: <http://etat.environnement.wallonie.be>.

European Sustainable Phosphorus Platform (2023) *ESPP-DPP-NNP nutrient recovery technology catalogue*. Available at: https://phosphorusplatform.eu/images/download/ESPP-NNP-DPP_nutrient-recovery_tech_catalogue.pdf (Accessed: 5 March 2024).

European Sustainable Phosphorus Platform 2 (2023) *Summary of the ESPP Workshop (19th January 2023) on Nitrogen Recovery*. Available at: https://phosphorusplatform.eu/images/scope/SCOPE_145_N-recovery.pdf (Accessed: 29 March 2024).

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 69 sur 70

H2orus (no date a) 'Traitement des eaux usées d'abattoirs toutes viandes'. Available at: <http://h2orus.fr/wp-content/uploads/2015/09/1-Fiche-secteur-abattoir-14082015.pdf> (Accessed: 29 December 2023).

H2orus (no date b) 'Traitement des eaux usées de l'industrie laitière'. Available at: <http://h2orus.fr/wp-content/uploads/2015/09/5-Fiche-secteur-industrie-laitiere-14082015.pdf> (Accessed: 29 December 2023).

H2orus (no date c) 'Traitement des eaux usées d'élevages et de lisiers'. Available at: <http://h2orus.fr/wp-content/uploads/2015/09/7-Fiche-secteur-elevages-traitement-de-lisiers-14082015.pdf> (Accessed: 29 December 2023).

Van der Hoek, J., Duijff, R. and Reinstra, O. (2018) 'Nitrogen Recovery from Wastewater: Possibilities, Competition with Other Resources, and Adaptation Pathways', *Sustainability*, 10(12), p. 4605. Available at: <https://doi.org/10.3390/su10124605>.

Langenfeld, N.J. *et al.* (2021) 'Optimizing Nitrogen Fixation and Recycling for Food Production in Regenerative Life Support Systems', *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 8. Available at: <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.699688>.

Melia, P.M. *et al.* (2017) 'Trends in the recovery of phosphorus in bioavailable forms from wastewater', *Chemosphere*. Elsevier Ltd, pp. 381–395. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.089>.

Mozumder, M.S.I. and Hossain, M.D. (2020) 'Interaction between Biological Nitrogen Removal Processes and Operating Parameters: A Review', *Journal of Scientific Research*, 12(4), pp. 757–774. Available at: <https://doi.org/10.3329/jsr.v12i4.46092>.

Nijhuis (no date) *Nitrogen Recovery solutions*. Available at: <https://www.nijhuisindustries.com/news/nitrogen-recovery-solutions> (Accessed: 9 April 2024).

Pikaar, I. *et al.* (2022) *Resource recovery from water principles and application*.

Rosenwinkel, K.-H. *et al.* (2009) 'Conventional and Advanced Technologies for Biological Nitrogen Removal in Europe', *Water Practice and Technology*, 4(1). Available at: <https://doi.org/10.2166/wpt.2009.014>.

Salkunić, A., Vuković, J. and Smiljanić, S. (2022) 'Review of Technologies for the Recovery of Phosphorus from Waste Streams', *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. Assoc. of Chemists and Chemical Engineers of Croatia, pp. 91–116. Available at: <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2022.2066>.

Segura, Y. *et al.* (2023) 'Improvement of biogas production and nitrogen recovery in anaerobic digestion of purple phototrophic bacteria by thermal hydrolysis', *Bioresource Technology*, 367, p. 128250. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128250>.

RESRECOVERY PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Azote
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD
	Page 70 sur 70

Sengupta, S., Nawaz, T. and Beaudry, J. (2015) 'Nitrogen and Phosphorus Recovery from Wastewater', *Current Pollution Reports*, 1(3), pp. 155–166. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0013-1>.

Shan, G. *et al.* (2021) 'Additives for reducing nitrogen loss during composting: A review', *Journal of Cleaner Production*, 307, p. 127308. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127308>.

Suez Water Handbook (no date) *Effluents industriels*. Available at: <https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/quelles-eaux-a-traiter-pourquoi/les-effluents-industriels/nature-des-effluents> (Accessed: 28 December 2023).

Syndicat Mixte Recyclage Agricole du Haut-Rhin (2018) '*Et nos boues deviennent compost*'. Available at: https://www.smra68.net/z_pdf/taboue-story/et-nos-boues-deviennent-compost.pdf (Accessed: 30 January 2024).

Systemic Project (2021) 'TECHNOLOGY FACT SHEET Ammonia stripping-scrubbing'. Available at: <https://systemicproject.eu/wp-content/uploads/NH3stripping-scrubbing.pdf> (Accessed: 18 March 2024).

United Nations Environment Programme and Food and Agriculture Organization (2024) *Global Nitrous Oxide Assessment*. Available at: <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46562>.

Verbeke, M., Van Dijk, K. and Brienza, C. (2021) *Cover Delivery Report Title of the Deliverable: Report with scenario's and schemes of proven NRR techniques WP Title and Number: WP3, D*. Available at: <https://systemicproject.eu/business->.

Witek-Krowiak, A. *et al.* (2022) 'Phosphorus recovery from wastewater and bio-based waste: an overview', *Bioengineered*, 13(5), pp. 13474–13506. Available at: <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2077894>.

WOW! State of the art report (2019) *Designing value chains for carbon based elements from wastewater*.

Zhou, M.S.K., Hinkelmann, I.R. and Barjenbruch, M. (2017) *Phosphorus recovery from wastewater and sludge: Concept for different regional conditions vorgelegt von*.

Zhou, Y. *et al.* (2023) 'A Comprehensive Review on Wastewater Nitrogen Removal and Its Recovery Processes', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), p. 3429. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph20043429>.

VIII. ANNEXES

Tableau VIII-1 - Différentes membranes de procédés baro-membranaires utilisées pour la récupération de l'azote (Al-Juboori et al., 2023)

Membrane Technology	Membrane Material	Feed Type	Flux (LMH)	NH ₄ ⁺ Rejection (%)
MF	Aluminum oxide (Al ₂ O ₃) ceramic membranes	Filtered sow slurry (15-20 g/L)	-	Slurry volume reduced by 70%
	α-Al ₂ O ₃ flat sheet ceramic membranes	Pre-coagulated domestic wastewater	41.7	40-50
	PVDF	Pre-coagulated raw sewage	-	28-52 *
	PVDF	Raw sewage	5-10	37.5
UF	Multi-channel membrane with an active surface layers made of Al ₂ O ₃ , TiO ₂ and ZrO ₂	Pig manure after settling tank	-9 *	Concentration factor of 3.7
		Pig manure after screening	-7 *	Concentration factor of 3.7
	PVDF	Pig manure after screening + settling	-10 *	Concentration factor of 2.2
		Pig manure after screening + settling + aerobic bioreactor	-34 *	Concentration factor of 4.3
		Laundry wastewater	-130 *	-99
NF	PVDF	Primary clarifier effluent	91-168 depending on flow velocity and applied pressure	Only 10% rejection of total N but nor rejection of NH ₄ ⁺
	PVDF	screen raw sewage with 0.56 mm sieve	70-110 depending on flow velocity and applied pressure	Only 10% rejection of total N but nor rejection of NH ₄ ⁺
	PVDF	Activated sludge effluent	-14 *	0-58% rejection when varying filtration/backwash time ration of 5-9
	PA active layer+ PSU support layer	Dairy manure digestate	125-150 at pH = 11	-32
RO	PA active layer+ PSU support layer	Synthetic urine	-130-170 for pH = 3-9	45 *
	PES	Aquaculture effluent	-8-18 for 2-10 bars	68
	PA	Synthetic wastewater with micropollutants	-	60
	PA	Anaerobically digested pig manure	-10-68 * depending on the concentration factor achieved	95
	PA active layer+ PSU support layer	Prefiltered Sow slurry with MF	-	-91 *
	PA	Prefiltered heifer wastewater by 30 μm filter	30	96
RO	PA	Pre-treated swine manure with diatomaceous earth	-	-98 for pH 4.5-7
	PA	Pre-filtered swine manure	-	66.6
	PA	Pre-filtered swine manure	-30 *	Concentration factor of 5.6
	RO (Dow, USA)	Pre-treated digested cattle manure with screw press separation + centrifugation + UF	-	99.5
		Pre-treated digested swine manure with screw press separation + centrifugation + UF	-	96
	PA	Effluent of fluidized bed reactor + anaerobic membrane bioreactor	12.3	94-100 for pH = 8-4
PA	Municipal wastewater	-52 *	-100	

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Tableau VIII-2 : Techniques de récupération de l'azote – Caractéristiques de l'influent et résultats (Beckinghausen et al., 2020)

Technique	Source	Form	Detailed Source	pH	NH4 + -N (mg/L)	TN (mg/L)	N removal (%)	N Recovery (%)	Form of recovered N	Experimental Stage	Author	Notes
SLS/SE/RO SMDC	Industrial	Digestate	Biogas plant digestate	7.8		3500	99	100	Solid and solution	Lab	[54]	
	Synthetic	Digestate	(In situ) digestate	7.8	2400		87.9	100	Ammonium sulfate solution	Lab	[55]	
Struvite precipitation w LSSA	Agricultural	Digestate	Anaerobic digestion of piggery wastewater w LSSA addition	9.5	1727		91.95	100	Struvite (MAP)	Lab	[56]	
Ammonia stripping/biogas scrubbing BES	Agricultural	Reject from digestate	Anaerobic digestion of dairy manure	7.7		492	90	100	Ammonium sulfate solution	Lab	[57]	
	Synthetic	Reject from digestate	Synthetic digested wastewater		504		83	100	Ammonium sulfate solution	Lab	[58]	
Gas permeable membrane	Agricultural	Reject from digestate	Digested swine effluent	8.6	1465–2097		97–99	96–98	Ammonium sulfate solution	Lab	[48]	with aeration
Gas permeable membrane	Agricultural	Reject from digestate	Digested swine effluent	8.6	1465–2097		92–98	76–95	Ammonium sulfate solution	Lab	[48]	without aeration
Gas-permeable membrane	Agricultural	Reject from digestate	Digester supernatant from swine wastewater	8.36	2350		93–97	92–93	Ammonium sulfate solution	Lab	[59]	
Thermal stripping/acid absorption	Agricultural	Reject from digestate	Digester effluent from cattle manure anaerobic digestion	8.58	1100		96.5–99	100	Ammonium sulfate crystals	Lab	[33]	at boiling
Vacuum membrane distillation	Domestic	Reject from digestate	Anaerobic digestion supernatant	7.7	70		85	100	Ammonium hydroxide solution	Lab	[60]	
Vacuum thermal stripping/acid absorption	Domestic	Reject from digestate	High ammonia food waste digestate		6400		54.45	100	Ammonium sulfate crystals	Pilot	[32]	
Vacuum thermal stripping/acid absorption	Domestic	Reject from digestate	Municipal sludge digestate		1093		27.54	100	Ammonium sulfate crystals	Pilot	[32]	
Vacuum thermal stripping/acid absorption	Domestic	Reject from digestate	Low ammonia food waste digestate		1804		47.78	100	Ammonium sulfate crystals	Pilot	[32]	
Bio-electrodialysis	Agricultural	Reject water	Filtered cattle manure	8.1	2150	3270	94	100	Ammonia in boric acid	Lab	[44]	
ED w air stripping	Agricultural	Reject water	Filtered swine manure	8.5		2500	59	6.2	Ammonia in HNO3	Lab	[61]	
ED w vacuum stripping	Agricultural	Reject water	Filtered swine manure			2500	70	14.5	Ammonia in HNO3	Lab	[61]	
ED/RO	Agricultural	Reject water	Filtered swine manure	8.26	4215		75	66.6	Solution	Lab	[62]	
Gas permeable membrane, semi- continuous	Agricultural	Reject water	Centrate from swine manure			3451	56–79	90	Ammonium sulfate solution	Lab	[63]	
Liquid-liquid membrane contactors	Domestic	Reject water	Zeolite regeneration solution	12.2	2400		85–98	95–98	Di-ammonium phosphate solution	Lab	[35]	
MEC	Domestic	Reject water	Municipal reject water		1000		72.2	100	Ammonium chloride	Lab	[39]	
MEC	Synthetic	Reject water	Synthetic reject water		1000		83.6	100	Ammonium chloride	Lab	[39]	
Sludge fermentation	Domestic	Sludge	Centrate from fermented sludge	6.73	30		63–83.2	75.7	Struvite (MAP)	Lab	[64]	
Thermal stripping/acid absorption	Agricultural	Sludge (manure)	Undigested cattle manure	7.83	600		96.5–99	100	Ammonium sulfate crystals	Lab	[33]	at boiling
TSAHP (Two step alkaline hydrolysis process)	Domestic	Sludge	Sludge from secondary sedimentation tank	9.7		856	7.78	41.98	Struvite (MAP)	Lab	[65]	
CapAmm	Synthetic	Urine	Synthetic urine		43		58	100	Ammonium sulfate solution	Lab	[66]	
EC w stripping	Domestic	Urine	Domestic urine	9.18	5490		87.1		Ammonium sulfate solution	Lab	[45]	20 A/m2 with acid absorption
EC w stripping	Synthetic	Urine	Synthetic urine		5490		59	13.3	Ammonium in HOB medium	Lab	[45]	20 A/m2 with HOB medium
EC w stripping/absorption	Domestic	Urine	Undiluted urine	8.5	1700		75	57	Ammonium sulfate solution	Lab	[67]	average over 3–10 days
EC w stripping/absorption	Domestic	Urine	Undiluted urine	9.2	5100		65–76	53–77	Ammonium sulfate solution	Lab	[67]	day 2, day 9

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 2 sur 20

Technique	Source	Form	Detailed Source	pH	NH4 + -N (mg/L)	TN (mg/L)	N removal (%)	N Recovery (%)	Form of recovered N	Experimental Stage	Author	Notes
EC-TMCS	Domestic	Urine	Urine	9.2	4250		63	56	Ammonium sulfate solution	Lab	[68]	
EC-TMCS	Synthetic	Urine	Synthetic domestic	9.3	4250		92	84	Ammonium sulfate solution	Lab	[68]	
HRES & TMCS	Domestic	Urine	Pretreated human urine	9		3400	73	60	Ammonium sulfate solution	Lab	[69]	at 10 A/m2
HRES & TMCS	Domestic	Urine	Pretreated human urine	9		3400	73	100	Ammonium sulfate solution	Lab	[69]	at 20 A/m2
HRES & TMCS	Synthetic	Urine	Synthetic urine	9		3400	82	64	Ammonium sulfate solution	Lab	[69]	at 50 A/m2
MEC & TMCS	Domestic	Urine	Urine	9.1	3.4		47	100	Ammonium sulfate solution	Pilot	[70]	
MEC & TMCS	Domestic	Urine	Urine	9.1	700		42-51	49	Ammonium sulfate solution	Lab	[71]	
MFC	Domestic	Urine	Undiluted urine			4050		< 1	Ammonia in boric acid	Lab	[72]	
NSMEC	Synthetic	Urine	10x diluted urine	7.9-8.5	745	871.4	61	100	Solution	Lab	[73]	
Stripping/acid absorption	Domestic	Urine	Undiluted urine	9.6		4500	91	76	Ammonium sulfate solution	Lab	[74]	10 L/hr, 300 min
Stripping/acid absorption	Domestic	Urine	Undiluted urine	9.6		4500	60-73	28-46	Ammonium sulfate solution	Lab	[74]	80 L/hr, 45 min
Stripping/acid absorption	Domestic	Urine	Undiluted urine	9.6		4500	94	100	Ammonium sulfate solution	Lab	[74]	80 L/hr, recirc, 230 min
(E)MNRC	Domestic	Wastewater	Raw domestic wastewater		47.4		80	62	Struvite (MAP)	Lab	[75]	
Bio-electrodialysis	Domestic	Wastewater	Primary clarifier effluent	7.8	70		85	52	Ammonia in boric acid	Lab	[44]	without gas circulation
Bio-electrodialysis	Domestic	Wastewater	Primary clarifier effluent	7.8	70		90	80	Ammonia in boric acid	Lab	[44]	with gas circulation
CapAmm	Domestic	Wastewater	Raw sewage after solids separation		42.5		62	100	Ammonium sulfate solution	Lab	[66]	
EDI (Electrodeionization)	Synthetic	Wastewater	Synthetic domestic		28,700		90	100	Solution	Lab	[76]	
MEC w aeration	Domestic	Wastewater	Landfill leachate		4540		63.7	53.8	Ammonium bicarbonate and ammonium sulfate	Lab	[77]	
MEC-FO	Synthetic	Wastewater	Synthetic side stream centrate		1000		99.7	100	Struvite (MAP) and ammonium sulfate	Lab	[78]	
MNRC	Synthetic	Wastewater	Domestic wastewater		23.8		96	24	Solution	Lab	[38]	
MPC-IE	Domestic	Wastewater	Raw sewage after solid separation		27.4		74.4	37.5	Solution	Lab	[43]	
MRC-AnOMBR	Synthetic	Wastewater	Glucose based medium	7.2	21.6		28-45	100	Solution	Lab	[79]	
RRMFC	Synthetic	Wastewater	Urine containing wastewater (dilute)		3.89		98	42	Solution	Lab	[80]	
SLS/SE/RO	Domestic	Wastewater	Digested sludge	7.6		3500	99	100	Solid and solution	Lab	[54]	
Struvite recycling	Agricultural	Wastewater	Swine wastewater	7.7		378	90	91	Struvite (MAP) and solution	Lab	[81]	
Vacuum membrane distillation	Industrial	Wastewater	Carbonated downstream effluent from IX regeneration process	6.1	167		96	100	Ammonium hydroxide solution	Lab	[60]	
Vacuum membrane distillation	Industrial	Wastewater	Carbonated downstream effluent from IX regeneration process	10	167		99.6	100	Ammonium hydroxide solution	Lab	[60]	
Vacuum thermal stripping/acid absorption	Domestic	Wastewater	Retentate of landfill leachate		5673		68.72	100	Ammonium sulfate crystals	Pilot	[32]	

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 3 sur 20

Technique	Source	Form	Detailed Source	pH	NH4 + -N (mg/L)	TN (mg/L)	N removal (%)	N Recovery (%)	Form of recovered N	Experimental Stage	Author	Notes
Vacuum thermal stripping/acid absorption	Agricultural	Wastewater	Digester effluent from cattle manure digestate after solid-liquid separation		1620		41.48	100	Ammonium sulfate crystals	Pilot	[32]	
Vacuum thermal stripping/acid absorption	Domestic	Wastewater	Retentate of landfill leachate		5760		45.27	100	Ammonium sulfate crystals	Pilot	[32]	

SLS/SE/RO: Solid-Liquid Separation/Sequential Evaporation/Reverse Osmosis. LSSA: Leachate of Sewage Sludge Ash. SMDC: Submersible Microbial Desalination Cell. MEC: Microbial Electrolysis Cell. MEC-FO: Microbial Electrolysis Cell-Forward Osmosis hybrid. ED/RO: Electrodialysis/Reverse Osmosis. CapAmm: Capacitive membrane stripping for Ammonia recovery. MFC: Microbial Fuel Cell. HRES & TMCS: Hydrogen Recycling Electrochemical System & TransMembrane ChemiSorption. EC: Electrochemical Cell. MRC-AnOMBR: Microbial Recovery Cell - Anaerobic Osmotic Membrane BioReactor. MNRC: Microbial Nutrient Recovery Cell. MPC-IE: Membrane based PreConcentration - Ion Exchange. AN/IX: Anaerobic/Ion Exchange. (E)MNRC: Enlarged Microbial Nutrient Recovery Cell. RRMFC: Resource Recovery Microbial Fuel Cell. NSMEC: Nutrient Separation Microbial Electrolysis Cell.

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 4 sur 20

Tableau VIII-3 : Bilan énergétique des technologies de récupération de l'azote (Beckinghausen et al., 2020)

Technique	Substrate	Energy Required (kWh/kgN)	Form of Energy Required	Energy Recovered (kWh/kgN)	Form of Energy Recovered	Delta Energy (kWh/kgN)	EROI	Author
Nitrogen Recovery Techniques								
SMDC	Digestate	0.9	Electricity	0.09	Bioelectricity	-0.77	0.100	[55]
SLS/SE/RO	Digestate	7.9*	Heat/electricity			-7.91		[54]
Vacuum thermal stripping/acid absorption	Reject from digestate	59.7*	Heat/electricity	26.84*	Saved heat	-32.88	0.449	[32]
Bioelectrical system (BES)	Reject from digestate	4.5	Electricity			-4.50		[58]
Gas-permeable membrane	Reject from digestate	1.0*	Electricity			-0.97		[48]
Gas-permeable membrane w aeration	Reject from digestate	1.2*	Electricity			-1.17		[48]
ED w air stripping	Reject from digestate	6.0*	Electricity			-5.95		[61]
ED w/ vacuum stripping	Reject from digestate	4.9*	Electricity			-4.94		[61]
MEC	Reject Water	10.4	Electricity	4.01	Hydrogen	-6.43	0.384	[39]
EDI (Electrodeionization)	Reject Water	52.3	Electricity			-52.35		[76]
Gas-permeable membrane	Reject Water	1.2*	Electricity			-1.17		[59]
Vacuum membrane distillation	Reject Water	1.5*	Electricity			-1.53		[32]
MEC-FO	Reject Water	1.2	Electricity	0.34	Hydrogen	-0.83	0.287	[78]
MEC & TMCS	Urine	1.4	Electricity	Not reported	(Hydrogen)	-1.36		[70]
MEC & TMCS	Urine	2.5	Electricity	Not reported	(Hydrogen)	-2.49		[71]
CapAmm	Urine	7.8	Electricity			-7.80		[66]
EC-TMCS	Urine	8.5	Electricity			-8.51		[68]
EC-TMCS	Urine	13.6	Electricity			-13.59		[68]
MFC	Urine	3.1	Electricity	1.85982	Electricity	-1.19	0.609	[72]
NSMEC	Urine	1.8	Electricity			-1.80		[73]
Stripping/acid absorption, low flow	Urine	61.1*	Electricity			-61.05		[74]
Stripping/acid absorption, high flow, w recirc	Urine	49.6*	Electricity			-49.61		[74]
Stripping/acid absorption, high flow w/o recirc	Urine	23.6*	Electricity			-23.64		[74]
EC w stripping/absorption, no H2 recovery	Urine	13.0	Electricity			-13.00		[67]
EC w stripping/absorption, H2 recovery	Urine	13.0	Electricity	4	Hydrogen	-9.00	0.308	[67]
HRES & TMCS, 10 A/m2	Urine	8.5	Electricity			-8.48		[69]
HRES & TMCS, 20 A/m2	Urine	7.3	Electricity			-7.26		[69]
HRES & TMCS, 50 A/m2	Urine	15.7	Electricity			-15.65		[69]
EC w stripping	Urine	19.4	Electricity	5.5	Hydrogen, Oxygen	-13.90	0.284	[45]
MNRC	Wastewater	6.0	Electricity	0.96	Bioelectricity	-5.04	0.160	[38]
(E)MNRC	Wastewater	28.6	Electricity	4.20	Bioelectricity	-24.37	0.147	[75]
MRC-AnOMBR	Wastewater	40.0*	Electricity	28.07	Methane	-11.93	0.702	[79]
Bioelectrodialysis w/o recirc	Wastewater	2.7	Electricity	2.4	Hydrogen	-0.51	0.825	[44]
Bioelectrodialysis w/ recirc	Wastewater	2.9	Electricity	2.11	Hydrogen	-0.56	0.790	[44]
Gas-permeable membrane	Wastewater	0.22	Electricity			-0.22		[63]
MPC-IE	Wastewater	60.3	Electricity	22.41	Methane	-37.93	0.371	[43]
Struvite recycling	Wastewater	0.1	Electricity			-0.10		[81]
MEC w aeration	Wastewater	8.5*	Electricity	Not reported	(Hydrogen)	-8.5		[77]
CapAmm	Wastewater	25.1	Electricity			-25.10		[66]
Ammonia stripping/biogas scrubbing	Wastewater	0.61*	Electricity	Not reported	(Biogas)	-0.61		[57]
Thermal stripping/acid absorption	Wastewater	168.2*	Heat	61.00**	Saved heat	-107.25	0.363	[33]
Nitrogen Removal Techniques								
Nitrification/denitrification	Wastewater	13	Electricity			-13		[87]
Air stripping	Wastewater	3.1-9	Electricity			-3.1(-)9		[55,88,87]
Sharon-ANAMMOX	Wastewater	5	Electricity			5		[87]

SMDC: Submersible Microbial Desalination Cell. SLS/SE/RO: Solid-Liquid Separation/Sequential Evaporation/Reverse Osmosis. MEC: Microbial Electrolysis Cell. MEC-FO: Microbial Electrolysis Cell-Forward Osmosis hybrid. CapAmm: Capacitive membrane stripping for Ammonia recovery. MFC: Microbial Fuel Cell. HRES & TMCS: Hydrogen Recycling Electrochemical System & TransMembrane ChemiSorption. EC: Electrochemical Cell. MNRC: Microbial Nutrient Recovery Cell. MPC-IE: Membrane based PreConcentration - Ion Exchange. (E)MNRC: Enlarged Microbial Nutrient Recovery Cell. NSMEC: Nutrient Separation Microbial Electrolysis Cell.

* Energy values calculated.

** economic evaluation assumed 100% heat is recoverable, estimated heat recovery based on Anwar/Tao [52] analysis of same system.

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 5 sur 20

Tableau VIII-4 - Technologies de récupération de l'azote classées par Pays, et organisations

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
Allemagne	WWTP de Münster	Administration	Utilisateur de tech.	-	Eaux usées	Membrane Contacteur	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Allemagne	Station d'épuration des eaux usées de Münster	Administration	Utilisateur de tech.	-	Eaux usées	Contacteur membranaire	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Allemagne	RVT Process Equipment GmbH	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	Unités clé en main	Eaux usées, déjections animales	Stripping & Scrubbing	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Allemagne	RVT Process Equipment GmbH	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	Unités clés en main ENVIMAC	Eaux usées, Digestat	Stripping & Scrubbing	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Allemagne	Benas-GNS	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	FiberPlus	Fumier de poulet	Stripping	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Allemagne	Benas-GNS	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	FiberPlus	Fumier de poulet	Stripping	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Allemagne	Envimac	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	tech. de stripping ENVIMAC	Gaz de décharge, Digestat, Boues	Stripping	Industriel	Sulfate d'ammonium, Sulfate d'ammonium	Engrais
Allemagne	Envimac	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	tech. d'élimination d'ammoniac ENVIMAC	Gaz de décharge, digestat, boues	Stripping	Industriel	Sulfate d'ammonium, Sulfate d'ammonium et AS	Engrais
Allemagne	Université des sciences appliquées de Münster	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées	Membrane Contacteur	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Allemagne	Université des sciences appliquées de Münster	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées	Contacteur membranaire	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Allemagne	KWB	Centre de recherche	Développeur de tech.	-	Déjections animales	Stripping sous vide	Pilote	-	Engrais
Allemagne	KWB	Centre de recherche	Développeur de tech.	-	Digestat	Stripping sous vide	Pilote	-	Engrais
Allemagne	GNS (Röblingen am See, DE)	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	FiberPlus (Anciennement ANAStrip)	Fumier de poulet	Stripping & Scrubbing	Pilote	Liquide d'ammoniac, Sulfate d'ammonium	Engrais
Allemagne	Fraunhofer UMSICHT, Département Environnement et Utilisation des ressources	Centre de recherche	Développeur de tech.	-	Phase liquide	Membrane	Pilote	Solution de nitrate, liquide d'ammoniac désorption	Engrais
Allemagne	Fraunhofer UMSICHT, Division Environnement et Utilisation des ressources	Centre de recherche	Développeur de tech.	-	Boues de station d'épuration	Membrane, Échange d'ions	Pilote	Solution de nitrate, Solution d'azote	Engrais

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 6 sur 20

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
Australie	Université de tech. de Sydney (UTS)	Université	Développeur de tech.	-	Urine	Osmose inverse avancée (FO) et Distillation membranaire (MD)	Laboratoire	Solution de nitrate d'ammonium et d'urée	Engrais
Australie	Université de tech. de Sydney (UTS)	Université	Développeur de tech.	-	Urine	Forward Osmosis (FO)	Laboratoire	Solution de sulfate d'urée et d'ammonium (FDFO)	Engrais
Australie	Université de tech. de Sydney (UTS)	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées synthétiques	Osmose inverse avancée (FO)	Laboratoire	Solution d'urée et de sulfate d'ammonium	Engrais
Australie	Université de Nouvelle-Galles du Sud	Université	Développeur de tech.	CapAmm	Eaux usées	Electrolyse à électrodes d'écoulement (CADEI)	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Australie	Université de tech. de Sydney (UTS)	Université	Développeur de tech.	NITRI (dans un bioréacteur à membranes) et EVA solaire	Urine	-	Pilote	Solution de nitrate	Engrais
Autriche	Montanuniversität Leoben	Université	Développeur de tech.	-	Boues d'épuration	IEZXEO	Pilote	Sulfate d'ammonium	Agent réducteur pour le traitement des gaz industriels
Autriche	Montanuniversität Leoben	Université	Développeur de tech.	-	Fumier de porc	IEZXEO	Pilote	Sulfate d'ammonium	Nettoyage des gaz industriels (DeNOx) ou engrais
Belgique	John Cockerill	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	Recov'Ammonia™	-	Stripping & Scrubbing	Industriel	Ammonium	Engrais
Belgique	TASK Environmental Engineering	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux usées	Stripping & Scrubbing	Industriel	Ammonium	Engrais
Belgique	Vermeulen Construct	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	VeDoWS	Urine	-	Industriel	Ammonium	Engrais
Belgique	DETRICON	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	DIG - Fumier d'animaux	Stripping et Scrubbing	Industriel	Solution de nitrate d'ammonium et de nitrate	Engrais
Belgique	Group op de Beeck	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	DIG	Stripping, Évaporation, Concentration par évaporation	Industriel	Solution de sulfate d'ammonium	Engrais
Belgique	Waterleau	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux usées industrielles, Fumier d'animaux	Évaporation et Concentration par évaporation	Industriel	Solution de sulfate d'ammonium	Réducteur dans le système DeNOx des incinérateurs
Belgique	Groupe op de Beeck	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Digestat	Centrifugation, Évaporation, Stripping	Industriel	Solution NH4	Engrais
Belgique	Waterleau	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux usées industrielles, Fumier animal	Concentration par évaporation	Industriel	Solution NH4	Réducteur dans le système DeNOx des installations d'incinération
Belgique	DETRICON	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Digestat, Fumier animal	Stripping & Scrubbing	Industriel	Solution NH4 / NO3	Engrais

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 7 sur 20

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
Belgique	John Cockerill	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	Recov'Ammonia™	-	Stripping et Scrubbing	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Belgique	TASK Environmental Engineering	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux usées	Stripping et Scrubbing	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Belgique	Vermeulen Construct	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	VeDoWS	Urine	-	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Belgique	Université de Gand	Université	Développeur de tech.	-	Digestat	Oxydation à l'eau subcritique et supercritique (WOXI)	Laboratoire	-	Solution de NH ₄ , Solution de NO ₃
Belgique	Université de Gand	Université	Développeur de tech.	-	DIG	Oxydation à l'eau subcritique et supercritique (WOXI)	Laboratoire	+, Solution de nitrate -, Solution de nitrate d'ammonium	Engrais dans les systèmes de support de vie régénératifs
Belgique	Université de Gand	Université	Développeur de tech.	-	Cendres de porc	Stripping & Scrubbing	Laboratoire	Solution d'ammonium, Solution de nitrate	-
Belgique	Université de Gand	Université	Développeur de tech.	-	Filtrat de fermentation	Séchage thermique (Oxydation haute température)	Laboratoire	Solution de nitrate et d'ammonium	Nutrition des plantes dans les systèmes de support de vie régénératifs
Belgique	Université de Gand	Université	Développeur de tech.	-	Lixiviats de fermentation	Thermique (oxydation à haute température)	Laboratoire	Solution de nitrate et d'ammonium	Nutrition des plantes dans les systèmes de support de vie régénératifs
Belgique	Université de Gand	Université	Développeur de tech.	-	Fumier de porc	Stripping et Scrubbing	Laboratoire	Sulfate d'ammonium, Nitrate d'ammonium	-
Brésil	Université fédérale de Minas Gerais	Université	Développeur de tech.	-	Déchets alimentaires	Stripping et Scrubbing	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Brésil	Université fédérale de Pelotas	Université	Développeur de tech.	-	Lixiviats de décharge	Stripping et Scrubbing	Pilote	Monoammonium phosphate	Engrais
Canada	BTS Biogas	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	NITROstripp	Gaz	Stripping et Scrubbing	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Chili	Universidad Técnica Federico Santa María	Université	Développeur de tech.	-	Cadavres de saumon	Hydrolyse	Laboratoire	Hydrolysats de protéines de poisson (FPH)	Compléments alimentaires
Chine	Université agricole de Chine	Université	Développeur de tech.	-	1. Lixiviats de décharge - Compost, 2. DIG	Charbon actif	Laboratoire	1. Lixiviat de compost brut d'une ferme porcine	Compostage, engrais
Chine	Université du Nord-Est	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées minières	1. Stripping & Scrubbing, 2. Cristallisation	Laboratoire	1. Sulfate d'ammonium, 2. Urée	Engrais
Chine	Université de Nanchang	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées de porcs	Charbon actif & IEXZEO	Laboratoire	Après adsorption, les microalgues NH ₄ ont été cultivées	-
Chine	Université de Chongqing de tech. et des Affaires	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées municipales - Sable activé	Pyrolyse	Laboratoire	Bicarbonate d'ammonium	-

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 8 sur 20

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
Chine	Université agricole de Huazhong	Université	Développeur de tech.	-	Purin de biogaz - Humidification/ déshumidification	Humidification	Laboratoire	Bouillie de nutriments concentrés	Engrais
Chine	Université de Donghua	Université	Développeur de tech.	-	Lixiviats de palladium - Eaux usées minières	Distillation membranaire à contact direct (DCMD)	Laboratoire	Chlorure d'ammonium	-
Chine	Université de Nankai	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées	Microbial Fuel Cell (MFC)	Laboratoire	Fertilisant	-
Chine	Université de Gongshang	Université	Développeur de tech.	-	Écailles de poisson	Hydrolyse	Laboratoire	Hydrolysats de protéines de poisson (FPH)	Compléments alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques
Chine	Université de Tsinghua	Université	Développeur de tech.	-	Solution d'urine synthétique	NITRI & Réacteur biologique à oxygène dissous (DO)	Laboratoire	Nitrate d'ammonium	Engrais
Chine	Université de Xi'an d'Architecture et de tech.	Université	Développeur de tech.	-	Boues activées	Stripping	Laboratoire	Solution de sulfate d'ammonium	Non précisé
Chine	Université de Tsinghua	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées synthétiques	Electrolyse à électrodes d'écoulement (CADEI)	Laboratoire	Solution de sulfate d'ammonium	-
Chine	Université de Wuhan	Université	Développeur de tech.	-	Effluent de station d'épuration	Échange d'ions	Laboratoire	Solution de sulfate d'ammonium	Engrais
Chine	Université de Chongqing	Université	Développeur de tech.	-	Lixiviats de décharge	Electrolyse à électrodes d'écoulement	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Chine	Université de Tianjin	Université	Développeur de tech.	-	Solution d'urée synthétique	Microbial Fuel Cell (MFC) & Humidification (HM)	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Chine	Université de Beijing Jiaotong	Université	Développeur de tech.	-	Solution d'urine synthétique	Stripping thermique sous vide (VTSTRIP)	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	-
Chine	Shanghai Laogang Municipal Solid Waste Treatment Co., Ltd	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Lixiviats de décharge	Stripping	Pilote	Bicarbonate d'ammonium	Engrais et industrie chimique
Chine	Université de Fudan	Université	Développeur de tech.	-	Lixiviats de décharge	Stripping	Pilote	Bicarbonate d'ammonium	Industrie et agriculture
Chine	Université de Qingdao de tech.	Université	Développeur de tech.	ENRRA	Eaux usées industrielles	Electrolyse à électrodes d'écoulement	Pilote	Sulfate d'ammonium	Engrais
Chine	Université de Beihang	Université	Développeur de tech.	-	Solution d'urine synthétique	Hydrolyse	Pilote	Sulfate d'ammonium	Engrais pour les systèmes de support de vie spatiaux
Danemark	Ammongas	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Gaz	Stripping & Scrubbing	Industriel	Ammonium	Engrais
Danemark	Ammongas	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Gaz	Stripping & Scrubbing	Industriel	Nitrate d'ammonium	Engrais
Danemark	Université technique du Danemark	Université	Développeur de tech.	-	Cadre de morue	Hydrolyse	Laboratoire	Hydrolysats de protéine de poisson	Antioxydants dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 9 sur 20

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
Danemark	Université technique du Danemark	Université	Développeur de tech.	-	Cadre de cabillaud	Hydrolyse	Laboratoire	Hydrolysats de protéines de poisson (FPH)	Antioxydants dans les industries alimentaires et pharmaceutiques
Danemark	Université technique du Danemark	Université	Développeur de tech.	-	Biowaste domestique	Électrochimie	Laboratoire	Solution d'ammonium	Milieu de culture pour la production de protéines unicellulaires (SCP) - pour l'alimentation animale
Danemark	Université technique du Danemark	Université	Développeur de tech.	-	Urine, Eaux usées domestiques, Digestat	Électrochimie	Laboratoire	Solution d'ammonium	Culture de méthanotrophes pour la production de protéines microbiennes
Danemark	Université technique du Danemark	Université	Développeur de tech.	-	Déchets biologiques domestiques	Electrolyse à électrodes d'écoulement	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Milieu de culture pour la production de protéines unicellulaires (SCP) - pour l'alimentation animale
Danemark	Université technique du Danemark	Université	Développeur de tech.	-	URI, Eaux usées domestiques, DIG	Electrolyse à électrodes d'écoulement	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Cultivation de méthanotrophes pour la protéine microbienne
Danemark	Université de Copenhague	Université	Développeur de tech.	-	Eau de drainage agricole	Échange d'ions avec des zéolithes	Pilote	Solution d'ammonium	Engrais
Danemark	Université de Copenhague	Organisation académique	Université	-	Eaux de drainage agricole	IEXZEO	Pilote	Sulfate d'ammonium	Engrais
Espagne	Cetaqua	Centre de recherche	Fournisseur de tech.	-	-	Échange d'ions avec zéolite et contacteur membranaire	-	Sels d'ammonium	Engrais
Espagne	Cetaqua	Centre de recherche	Fournisseur de tech.	-	-	Échange d'ions et contacteur membranaire	-	Sels d'ammonium	Engrais
Espagne	Ecotec	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux usées, air	ASTRIP & SCRUB	Industriel	Liquide d'ammonium, phosphate d'ammonium	Engrais
Espagne	Ecotec	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux usées, Air	Stripping et Scrubbing	Industriel	Solution d'azote (liquide), Phosphate d'ammonium diammonique (DAP)	Engrais
Espagne	Université Miguel Hernandez	Université	Développeur de tech.	-	DIG	HM	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Espagne	Institut de recherche technologique agricole-alimentaire	Organisation de recherche	Développeur de tech.	-	DIG de lisier de porc	Électrolyse et HM	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Espagne	Institut de recherche technologique agricole-alimentaire	Organisation de recherche	Développeur de tech.	-	DIG de lisier de porc	Électrolyse et HM	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 10 sur 20

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
Espagne	Universidad de Leon	Université	Développeur de tech.	-	DIG et lisier de porc	Électrolyse	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Espagne	Université Miguel Hernandez	Université	Développeur de tech.	-	Digestat	Membranes hydrophobes	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	-
Espagne	Institut de recherche technologique agroalimentaire	Organisation de recherche	Développeur de tech.	-	Digestat de lisier de porc	Microbiologie électrochimique et membranes hydrophobes	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Espagne	Université de León	Université	Développeur de tech.	-	Digestat et lisier de porc	Microbiologie électrochimique	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Espagne	Universitat Politècnica de València	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées	Contacteur membranaire	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Espagne	Universitat Politècnica de València	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées	Contacteur membranaire	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Espagne	Centre technologique Leitat	Organisation de recherche	Développeur de tech.	-	Eaux usées synthétiques	Microbial Fuel Cell (MFC) et Stripping	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Espagne	Centre technologique Leitat	Organisation de recherche	Développeur de tech.	-	Eaux usées synthétiques	Électrolyse et stripping	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Espagne	Université de Valladolid	Université	Développeur de tech.	-	Digestat	Contacteur membranaire	Pilote	-	Engrais
Espagne	Université de Valladolid	Université	Développeur de tech.	-	Fumier	Stripping membranaire	Pilote	-	Engrais
Espagne	Université de Barcelone	Université	Développeur de tech.	-	Bouillon/boue de déchets solides municipaux	Contacteur membranaire	Pilote	Sulfate d'ammonium	Engrais
Espagne	Université de Barcelone	Université	Développeur de tech.	-	Bouillon/lisier de déchets solides municipaux	Contacteur membranaire	Pilote	Sulfate d'ammonium	Engrais
Espagne	Institut technologique agricole de Castille-et-León (ITACyL)	Organisation de recherche	Développeur de tech.	-	Eaux usées d'élevage	Membranes hydrophobes	Pilote	Sulfate d'ammonium	Engrais
Espagne	Institut technologique agricole de Castille et León (ITACyL)	Organisation de recherche	Développeur de tech.	-	Eaux usées d'élevage	HM	Pilote	Sulfate d'ammonium	Engrais
Finlande	Centre de recherche technique VTT de Finlande	Centre de recherche	Développeur de tech.	-	Phase liquide	Membranes	-	Solution de nitrate, liquide d'ammoniac désorption	Engrais
Finlande	Université Aalto	Université	Développeur de tech.	-	1. Eaux usées municipales, 2. Lixiviats de décharge	Coagulation & Membrane contactor	1. Laboratoire & Pilote, 2. Laboratoire	Ammonium Sulfate	Engrais
Finlande	Université Aalto	Université	Développeur de tech.	-	1. Eaux usées municipales, 2. Lixiviats de décharge	Coagulation & Contacteur membranaire	1. Laboratoire et Pilote, 2. Laboratoire	1. Sulfate d'ammonium	1. Engrais
Finlande	Centre de recherche technique VTT de Finlande	Centre de recherche	Développeur de tech.	-	Phase liquide	Membrane	Email	-	-
Finlande	Université de tech. de Lappeenranta-Lahti LUT	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées domestiques	Capacitive deionisation	Laboratoire	-	-
Finlande	Université de tech. de Lappeenranta	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées domestiques	CADEI	Laboratoire	-	-

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 11 sur 20

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
Finlande	Université de tech. de Lappeenranta-Lahti LUT	Université	Développeur de tech.	-	Digestat - Boues de station d'épuration & Eaux usées	Séchage thermique & Scrubbing	Laboratoire	Ammonium Sulfate	Engrais
Finlande	Université des sciences appliquées de Kajaani	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées de stations d'épuration & eaux de mine	Membrane contactor & Résines d'échange ionique	Laboratoire	Ammonium Sulfate, Monoammonium Phosphate	-
Finlande	Université de tech. de Tampere	Université	Développeur de tech.	-	URI	Électrolyse et électrodialyse	Laboratoire	Bicarbonate d'ammonium	-
Finlande	Université de tech. de Tampere	Université	Développeur de tech.	-	Urine	Électrochimie	Laboratoire	Bicarbonate d'ammonium	-
Finlande	Université de tech. de Lappeenranta	Université	Développeur de tech.	-	Déjections animales	Pyrolyse	Laboratoire	Gaz d'ammoniac	-
Finlande	Université de tech. de Lappeenranta	Université	Développeur de tech.	-	Digestat	Séchage thermique	Laboratoire	Gaz d'ammoniac	-
Finlande	Université de tech. de Tampere	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées domestiques	Microbial Electrolysis & Electrodialysis	Laboratoire	Solution d'ammonium	-
Finlande	Université de tech. de Tampere	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées synthétiques et eaux usées	Électrochimie & Stripping	Laboratoire	Solution d'ammonium, Solution de Sulfate d'ammonium	Engrais
Finlande	Université de tech. de Lappeenranta	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées municipales et synthétiques	Pyrolyse et Scrubbing	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Finlande	Université des sciences appliquées de Kajaani	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées de STEP et de mine	Contacteur membranaire et échangeur d'ions	Laboratoire	Sulfate d'ammonium, MAP	-
Finlande	Université de Tampere	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées domestiques et synthétiques	Électrolyse et Stripping	Laboratoire	Sulfate d'ammonium, Sulfate d'ammonium et AS	Engrais
Finlande	Services environnementaux de la région d'Helsinki (HSY)	Administration	Utilisateur de tech.	RAVITA	Eaux usées traitées	Stripping	Pilote	(NH4)3PO4	Engrais
Finlande	Napapiirin Energia ja Vesi (NEVE) Ltd.	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Boues de station d'épuration	Stripping & Scrubbing	Pilote	Ammonium Sulfate	Engrais
Finlande	Services environnementaux de la région d'Helsinki HSY	Administration	Utilisateur de tech.	RAVITA	Eaux usées de station d'épuration	Stripping	Pilote	Phosphate d'ammonium	Engrais
Finlande	Napapiirin Energia ja Vesi (NEVE) Ltd.	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Boues d'épuration	Stripping & Scrubbing	Pilote	Sulfate d'ammonium	Engrais
Finlande	Université Aalto	Université	Développeur de tech.	NPHarvest	Eaux usées domestiques, Lixiviats de décharge, Urine	Membrane contactor & Stripping	Pilote et Industriel	Ammonium Sulfate	Engrais
Finlande	Université Aalto	Université	Développeur de tech.	NPHarvest	Eaux usées domestiques, lixiviat de décharge et URI	Contacteur membranaire et Stripping	Pilote et Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
France	Geotexia	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Déjections animales et biomasse	Concentration, Ultrafiltration et Osmose inverse	Industriel	Liquide de nitrate (20% MS)	Engrais
France	France Evaporation	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux usées, air	Stripping et Scrubbing	Industriel	Liquide d'ammonium, diammonium phosphate, solution d'ammoniac	Engrais

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 12 sur 20

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
France	Geotexia	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Digestat (Fumier + bio-waste)	Centrifugation -> Liquide : Ultrafiltration + Osmose inverse -> Concentration : Évaporation	Industriel	Liquide NK (20% de matière sèche)	Engrais
France	France Évaporation	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux usées, Air	Stripping & Scrubbing	Industriel	Solution d'azote	Engrais
France	John Cockerill Europe Environnement	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	RECOV'AMMONIA	Déjections animales	Stripping & Scrubbing	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
France	John Cockerill Europe Environnement	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	RECOV'AMMONIA	Digestat	Stripping & Scrubbing	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
France	Agence spatiale européenne (ESA)	Multi-gouvernementale	Développeur de tech.	MELLISA - Loop	Tous les organiques	Pyrolyse haute température	Pilote	Nourriture pour microorganismes	Engrais
France	Agence spatiale européenne (ESA)	Organisation intergouvernementale	Développeur de tech.	MELLISA - Loop	Tous les organiques	Combustion à haute température	Pilote	Solution d'azote	Engrais
Hongrie	Université de Szeged	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées de salle de traite	IEX avec PPP dopé NH4+	Laboratoire	-	-
Hongrie	Université de Szeged	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées de salle de traite	Échange d'ions avec poudre de peau de grenade	Laboratoire	NH4+ dopé en PPP	-
Hongrie	Université de tech. et d'économie de Budapest	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées d'URI	HM	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Hongrie	Université de tech. et d'économie de Budapest	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées industrielles	Membrane hydrophobe	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Inde	Université VIT	Université	Développeur de tech.	-	URI	Carbonisation hydrothermale	Laboratoire	Urée	Engrais
Iran	Université islamique Azad	Université	Développeur de tech.	-	Têtes et peaux de poisson	Hydrolyse enzymatique	Laboratoire	Hydrolysats de protéines de poisson	Antioxydants dans l'alimentation et l'industrie pharmaceutique
Irlande	BioAtlantis	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Algues marines	Hydrolyse	Industriel	Acides aminés	Nutrition humaine et animale
Irlande	BioAtlantis	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Algues marines	Hydrolyse	Industriel	Acides aminés	Nutrition humaine et animale
Irlande	Biomarine Ingredients	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Poissons	Hydrolyse et filtration	Industriel	Isolats de protéines de poisson hydrolysées	Ingrédients pour la nutrition humaine et animale
Irlande	Biomarine Ingredients	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Poissons	Hydrolyse et filtration	Industriel	Isolats de protéines de poisson hydrolysés	Ingrédients pour l'alimentation humaine et animale
Irlande	tcbb Resource (Irish Research Centre for	Organisation de recherche	Développeur de tech.	SLURRES Pilot	Eaux usées	ASTRIP & SSTRIP	Mise à l'échelle	Sulfate d'ammonium	Engrais

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 13 sur 20

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
	Resource Efficiency - Société à responsabilité limitée)								
Irlande	tcbb Resource (Irish Research Centre for Resource Efficiency - Company Limited)	Organisation de recherche	Développeur de tech.	SLURRES Pilot	Eaux usées	Stripping et Scrubbing	Phase de montée en puissance	Sulfate d'ammonium	Engrais
Italie	Acqua & Sole	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Digestat	Stripping	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Italie	Acqua & Sole	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Eaux usées traitées, eaux de lavage des déchets	Stripping	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Italie	Université d'ingénierie architecturale et environnementale	Université	Développeur de tech.	-	Déjections de buffle	Stripping	Laboratoire	Ammoniac gazeux	Production de protéines unicellulaires
Italie	Université d'ingénierie architecturale et environnementale	Université	Développeur de tech.	-	Digestat de fumier de buffle	Stripping	Laboratoire	Ammoniac gazeux	Production de protéines monocellulaires
Italie	Université de Rome Sapienza	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées synthétiques	Microbiologie électrochimique	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Italie	Université de Rome Sapienza	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées synthétiques	Électrolyse	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Italie	Université de Rome Sapienza	Université	Développeur de tech.	-	DIG	Électrolyse	Pilote	Sulfate d'ammonium	Engrais
Italie	Université de Rome Sapienza	Université	Développeur de tech.	-	Digestat	Microbiologie électrochimique	Pilote	Sulfate d'ammonium	-
Japon	Université d'Hiroshima	Université	Développeur de tech.	-	Solution synthétique	Échange d'ions et adsorption sur charbon actif	Laboratoire	-	-
Japon	Université d'Hiroshima	Université	Développeur de tech.	-	Fumier de poulet	Pyrolyse	Laboratoire	Gaz d'ammoniac	Porteur d'hydrogène
Nigéria	Université Adekunle Ajasin	Université	Développeur de tech.	-	URI	Échange d'ions	Pilote	Sulfate d'ammonium	Engrais
Norvège	N2 Applied	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Fumier	Plasma	Industriel	Fumier enrichi en azote	Engrais
Pays-Bas	Inno+	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	Pollo air scrubber	-	Scrubbing	Industriel	-	-
Pays-Bas	Inno+	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	Pollo air scrubber	Litière de volaille	Scrubbing	Industriel	-	-
Pays-Bas	Opure	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Digestat	Séparation par membranes	Industriel	Concentré de nitrate	Engrais
Pays-Bas	Merensteyn	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Digestat	Séparation par membranes	Industriel	Concentré de potassium	Engrais
Pays-Bas	Van Amstel	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Digestat	Séparation par membranes	Industriel	Concentré de potassium	Engrais

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 14 sur 20

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
Pays-Bas	Merensteyn	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	DIG	SEP -> FLOT -> RO (avec H2SO4) -> Concentré lq -> IOX	Industriel	Concentré NK	Engrais
Pays-Bas	Van Amstel	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	DIG	SEP -> conc. lq : FLOT -> conc. lq : RO (+ H2SO4) -> Concentré lq -> IOX	Industriel	Concentré NK	Engrais
Pays-Bas	Opure	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	DIG	SEP -> MBR -> NF	Industriel	Concentré NO3	Engrais
Pays-Bas	Nijhuis Saur Industries	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	AECO-NAR ou GE-NIUS/GENIAAL	Digestat, Boue	Centrifugation, Stripping et Scrubbing	Industriel	DAS (liquide), Concentré de potassium	Engrais
Pays-Bas	Nijhuis Saur Industries	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	AECO-NAR ou GE-NIUS/GENIAAL	DIG (MAN, boues) ou MAN	CENT -> FLOT -> STRIP + SCRUB ou	Industriel	DAS (lq) ou Concentré NK	Engrais
Pays-Bas	Natuchem	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	-	-	Industriel	DAS (solide)	Engrais
Pays-Bas	Natuchem	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	-	-	Industriel	DAS (solide)	Engrais
Pays-Bas	Van Iperen International BV	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	GreenSwitch Nitrate (processus ART & AIR)	Digestat (fumier et déchets organiques, etc.)	Séparation par membranes, Stripping et Scrubbing	Industriel	Solution de nitrate de potassium (GreenSwitch® Original HG)	Engrais
Pays-Bas	Van Iperen International BV	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	GreenSwitch Nitrate (processus ART & AIR)	DIG (MAN + biomasse + etc.)	SEP -> conc. lq : STRIP + SCRUB (+ KHCO3) -> conc. lq : nitrification -> CONC (RO ?)	Industriel	Solution KNO3 (GreenSwitch® Original HG)	Engrais
Pays-Bas	GMB BioEnergie	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Air (pour le traitement des odeurs)	Stripping et Scrubbing	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Pays-Bas	GMB BioEnergie	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	AIR (pour le traitement des odeurs)	Stripping & Scrubbing	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Pays-Bas	Bluetech	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux usées	Membrane hollow fiber	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Pays-Bas	Colsen	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	MBR-NAS®, AMFER	Eaux usées	Membrane tubulaire	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Pays-Bas	Bluetech	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Eaux usées	Membrane creuse HM	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Pays-Bas	Colsen	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	MBR-NAS®, AMFER	Eaux usées	MEMBF	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Pays-Bas	Groupe Byosis BV	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	ByoFlex®	Eaux usées, DIG	Stripping & Scrubbing	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 15 sur 20

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
Pays-Bas	Byosis Group BV	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	ByoFlex®	Eaux usées, Digestat	Stripping et Scrubbing	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Pays-Bas	CircularValues	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	Farmcubes Quadro Nitrogen Recovery (QNR) et Farmcubes High Pressure Reverse Osmosis (HPRO)	-	RO, Stripping	Industriel	Sulfate d'ammonium, nitrate d'ammonium	Engrais
Pays-Bas	CircularValues	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	Farmcubes QNR et Farmcubes HPRO	Digestat	Osmose inverse, Stripping	Industriel	Sulfate d'ammonium, Nitrate d'ammonium	Engrais
Pays-Bas	Université de Wageningen	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées synthétiques	Électrochimie, électrodialyse	Laboratoire	AS, AN	Engrais
Pays-Bas	Université de Wageningen	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées synthétiques	Électrochimie, Électrodialyse	Laboratoire	Sulfate d'ammonium, Nitrate d'ammonium	Engrais
Pays-Bas	Lenntech	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	DIG, etc.	Bipolar membrane ELEC-DIA	Pilote	-	-
Pays-Bas	Lenntech	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Digestat, etc.	Membrane bipolaire, Électrodialyse	Pilote	-	-
Pays-Bas	Mezt	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Digestat	Membrane bipolaire, Stripping par VMD	Pilote	Concentré de potassium (?)	Engrais
Pays-Bas	Mezt	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	DIG	BiPolar ELEC-DIA + stripping VM	Pilote	NK (?)	Engrais
Pays-Bas	Société des eaux Evides	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux de lavage des déchets	EC -> EVA	Pilote	Phycocyanine	Pigment
Pays-Bas	Evides Water Company	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux usées	Électrodialyse inversée, Nanofiltration	Pilote	Phycocyanine	Pigment
Pays-Bas	RN Solutions	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Concentré de potassium (RO)	VMD	Pilote	Solution d'ammoniac	Engrais
Pays-Bas	RN Solutions	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	DIG (conc. RO)	VMD	Pilote	Solution NH3	Engrais
Pologne	Université des sciences de la vie et de l'environnement de Wrocław	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées	Nitritation, Microfiltration, Nanofiltration	Laboratoire	Solution de nitrite	Engrais ou inhibiteur de la formation de H2S dans les égouts
Pologne	Université de sciences de l'environnement et de la vie de Wrocław	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées	Nitritation, microfiltration, nanofiltration et échange d'ions	Laboratoire	Solution de nitrite	Engrais ou inhibiteur de la formation de H2S dans les égouts

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 16 sur 20

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
République de Corée	Université nationale de Séoul	Université	Développeur de tech.	-	Eaux de lavage des déchets	HM	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
République de Corée	Université de Corée	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées synthétiques	Électrodialyse	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
République de Corée	Institut coréen de tech. avancée des sciences et de la tech. (KAIST)	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées synthétiques et d'élevage	Électrolyse	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
République de Corée	Université de sciences et de tech.	Université	Développeur de tech.	-	URI	Contacteur membranaire	Laboratoire	Sulfate d'ammonium, phosphate d'ammonium, nitrate d'ammonium	Engrais
République tchèque	MemBrain s.r.o.	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux usées	Filtration membranaire	Laboratoire	Ammonium	Engrais
République tchèque	MemBrain s.r.o.	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	Eaux usées	Membrane Biofiltration (MEMBF)	Laboratoire	Nitrate d'ammonium	Engrais
Royaume-Uni	CCm tech.s	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	DIG	-	-	Biochar	Engrais
Royaume-Uni	CCm tech.s	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Digestat	-	-	Biochar	Engrais
Royaume-Uni	Thermax Europe Limited	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	-	RO, NF, UF, Membrane tubulaire	Industriel	-	-
Royaume-Uni	Thermax Europe Limited	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	-	-	RO, NF, UF MEMBF	Industriel	-	-
Royaume-Uni	Organics Group	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux usées	Scrubbing	Industriel	Sels d'ammonium, Solution d'ammoniac	-
Royaume-Uni	Organics Group	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux usées	ASTRIP SCRUB	Industriel	Sels de NH4, solution NH3	-
Royaume-Uni	Université de Leeds	Université	Développeur de tech.	-	Solution synthétique	Charbon actif	Laboratoire	Hydrocharbon à base de chêne	-
Royaume-Uni	Université de Leeds	Université	Développeur de tech.	-	Solution synthétique	Charbon actif	Laboratoire	NH4 ou NO3	Engrais
Royaume-Uni	Université de Cranfield	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées	Échange d'ions	Pilote	Solution d'ammoniac, Sels d'azote	Produits chimiques, engrais
Royaume-Uni	Université de Cranfield	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées	Échange d'ions	Pilote	Solution NH3, sel d'azote	Produits chimiques, engrais
Royaume-Uni	Agua DB	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	NTPlus	Eaux souterraines	Échange d'ions	Preuve de concept	Solution de nitrate de potassium	Engrais
Royaume-Uni	Agua DB	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	NTPlus	Eaux souterraines	Échange d'ions	Preuve de concept	Solution KNO3	Engrais
Slovénie	Université de Maribor	Université	Développeur de tech.	-	Eaux de lavage des déchets	Échange d'ions	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	N/A

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 17 sur 20

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
Slovénie	Université de Maribor	Université	Développeur de tech.	Na-zeolite	Eaux usées domestiques	Échange d'ions avec zéolite	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	-
Suède	EasyMining	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	CleanMAP, Aqua2™N	Eaux usées	Adsorption chimique	Industriel	MAP, Sulfate d'ammonium	Engrais
Suède	EasyMining	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	CleanMAP, Aqua2™N	Eaux usées	Adsorption chimique (non spécifiée)	Industriel	MAP, sulfate d'ammonium	Engrais
Suède	EkoBalans	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	eco:N	Eaux usées	Stripping et Scrubbing	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Suède	EkoBalans	Entreprise privée	Utilisateur de tech.	eco:N	Eaux usées	Stripping & Scrubbing	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Suède	Université suédoise des sciences agricoles	Université	Développeur de tech.	-	Urine	Échange d'ions, Évaporation, Biochar / Cendres	Laboratoire	Biochars / Cendres chargés en NH4	Conditionneur de sol / Engrais
Suède	Université de Mälardalen	Université	Développeur de tech.	-	Solution synthétique	Biochar	Laboratoire	Biochars chargés en NH4-N	Conditionneur de sol / Engrais
Suède	Mälardalen Högskola	Université	Développeur de tech.	-	Solution synthétique	Char	Laboratoire	Biochars chargés en NH4-N	Conditionneur de sol / Engrais
Suède	Université de Mälardalen	Université	Développeur de tech.	-	DIG	Combustion, pyrolyse et gazéification, stripping	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Suède	Université de Mälardalen	Université	Développeur de tech.	-	Digestat	Combustion, Pyrolyse et Gazéification & Stripping	Laboratoire	Sulfate d'ammonium	Engrais
Suède	Université suédoise des sciences agricoles	Université	Développeur de tech.	-	URI	Échange d'ions, EVA, charbon actif/charbon de bois	Laboratoire et pilote	CHAR/ASH chargés en NH4	Conditionneur de sol / Engrais
Suisse	Membratec	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	DIG	Contacteur membranaire	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Suisse	Membratec	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Digestat	Contacteur membranaire	Industriel	Sulfate d'ammonium	Engrais
Suisse	Institut fédéral suisse des sciences et tech.s aquatiques	Organisation de recherche	Développeur de tech.	-	URI	EVA	Laboratoire et pilote	Sulfate d'ammonium	-
Suisse	Institut fédéral suisse des sciences et tech.s de l'eau (EAWAG)	Organisation de recherche	Développeur de tech.	-	Urine	Évaporation	Laboratoire et Pilote	Sulfate d'ammonium	Engrais
USA	Linde	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	-	Stripping	Industriel	-	-
USA	Indusco Environmental Services Inc.	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	-	SCRUB	Industriel	-	-
USA	Organics USA	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	-	THERM-STRIP	Industriel	-	-
USA	Perma Pure LLC	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	AS Series Ammonia Scrubber	-	SCRUB	Industriel	MAP	-

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 18 sur 20

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
USA	Branch Environmental Corporation	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Eaux usées industrielles	STRIP & SCRUB & SSTRIP	Industriel	Sels de NH ₄ , NH ₃	Engrais
USA	PureGreen	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	GreenSwitch	DIG (MAN + biomasse + etc.), biogaz	SEP -> conc. lq : STRIP + SCRUB (+ KHCO ₃) -> conc. lq : nitrification -> CONC (RO ?)	Industriel	Solution KNO ₃	Engrais
USA	Sedron tech.s	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	Varcor	Eaux usées	SSTRIP	Industriel	Solution NH ₄	Engrais
USA	Ductor	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	Non communiqué	Litière de poulet	Non communiqué	Industriel	Solution NH ₄	Engrais
USA	Monroe Environmental	Entreprise privée	Fournisseur de tech.	-	Lixiviats de décharge, DIG	Stripping	Industriel	Solution NH ₄	Engrais
USA	Université d'État du Nouveau-Mexique	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées municipales	Électrochimie	Laboratoire	AS	Engrais
USA	Université d'État du Nouveau-Mexique	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées municipales	Électrochimie	Laboratoire	AS	Engrais
USA	Université Stanford	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées synthétiques	Électrochimie	Laboratoire	AS	Engrais
USA	Université d'État du Nouveau-Mexique	Université	Développeur de tech.	StARR	Algues mixotrophes	Thermique (HTL) et électrochimie	Laboratoire	AS, STRU	Engrais
USA	Université Johns Hopkins	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées industrielles	IEXZEO	Laboratoire	Solution NH ₄	-
USA	Université d'État de l'Arizona	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées industrielles	FO	Laboratoire	Solution NH ₄	Engrais
USA	Université du Colorado Boulder	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées municipales	Électrochimie, électrodialyse	Laboratoire	Solution NH ₄	Engrais
USA	Université Columbia	Université	Développeur de tech.	-	Eaux usées synthétiques	Distillation membranaire isotherme (IMD)	Laboratoire	Solution NH ₄	Engrais
USA	Université d'État de l'Iowa	Université	Développeur de tech.	-	URI - Synthétique	Concentration progressive par congélation (PFC)	Laboratoire	Solution NH ₄	Engrais
USA	Université d'État de Pennsylvanie	Université	Développeur de tech.	-	BIOW - Déchets alimentaires	Thermique	Laboratoire	Solution NH ₄ et NO ₃	-
USA	Université de Notre Dame	Université	Développeur de tech.	-	Urée	Électrochimie	Laboratoire	Solution NH ₄ ou NO ₃	Engrais
USA	Université d'État de l'Arizona	Université	Développeur de tech.	-	URI	MSEP - RO, NF, MF	Laboratoire	Urée et ammoniacale	-
USA	Université de Californie Davis	Université	Développeur de tech.	-	DIG - Déchets alimentaires et eaux usées (centrate)	Stripping thermique sous vide (VTSTRIP)	Pilote	AS	Engrais
USA	Université de Californie, Berkeley	Université	Développeur de tech.	-	URI	Échange d'ions	Pilote	AS	Engrais
Vietnam	Université de Ho Chi Minh Ville	Université	Développeur de tech.	-	Peau de thon	Hydrolyse	Laboratoire	Hydrolysate de collagène	Dans les produits alimentaires et les aliments fonctionnels
Vietnam	Université Nong Lam	Université	Développeur de tech.	-	Peau de thon	Hydrolyse et ultrafiltration	Laboratoire	Hydrolysate de collagène	Dans les produits alimentaires et les aliments fonctionnels

Pays de l'organisation	Nom de l'organisation	Type d'organisation	Catégorie d'organisation*	Nom commercial de la tech.	Matière première (substrat)	Type de tech.	Niveau de maturité technologique	Produit final	Utilisation du produit
Vietnam	Université de l'Industrie alimentaire	Université	Développeur de tech.	-	Sous-produits de poisson-chat	Hydrolyse	Laboratoire	Hydrolysats de protéines de poisson (FPH)	Antioxydants dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique

RESRECOVERY

PARTIE 3 : VALORISATION DE L'AZOTE DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 20 sur 20