

Benjamin CRÉNO
École Nationale des Ponts et Chaussées
Département Ville Environnement Transport
2nd semestre 2014-2015



PROJET D'INGÉNIEUR EN LABORATOIRE

Étude comparative du métabolisme urbain des urines et fèces



Tuteur : Fabien ESCULIER

Table des matières

INTRODUCTION.....	3
1. ETUDE DES CYCLES CARBONE, AZOTE ET PHOSPHORE EN REGION PARISIENNE.....	4
1.1. PHOSPHORE	4
a) <i>Physiologie.....</i>	4
b) <i>Les réseaux</i>	5
c) <i>En station d'épuration</i>	5
d) <i>Les boues des stations d'épuration.....</i>	6
e) <i>Le secteur agricole et les agro-industries.....</i>	7
f) <i>Schéma du cycle du phosphore.....</i>	9
1.2. AZOTE	11
a) <i>Physiologie.....</i>	11
b) <i>Les réseaux</i>	11
c) <i>En station d'épuration</i>	12
d) <i>Le secteur agricole et les agro-industries</i>	12
e) <i>Schéma du cycle de l'azote.....</i>	16
1.3. CARBONE.....	18
a) <i>Mesurer le carbone</i>	18
b) <i>Physiologie.....</i>	18
c) <i>Réseaux et stations d'épuration.....</i>	19
d) <i>Schéma du cycle du carbone.....</i>	20
2. COMPARAISON AVEC UN PROJET ECOLOGIQUE A SNEEK AUX PAYS-BAS	22
2.1. PRESENTATION DU PROJET WATERSCHOON	22
a) <i>Contexte</i>	22
b) <i>Fonctionnement du site.....</i>	23
2.2. COMPARAISON DES CYCLES CARBONE, AZOTE ET PHOSPHORE ENTRE PARIS ET WATERSCHOON	26
a) <i>Les différences entre les systèmes d'assainissement</i>	26
b) <i>Comparaison des dépenses énergétiques</i>	27
CONCLUSION.....	30
BIBLIOGRAPHIE.....	31

INTRODUCTION

Carbone, azote et phosphore entrent en ville majoritairement sous forme de nourriture et en ressortent par l'urine et les excréments des eaux usées domestiques ainsi que sous la forme de déchets solides. Chaque année, un citoyen occidental produit par ses excréments, environ 230 MJ de matière oxydable 9 kg de carbone, 4,5 kg d'azote et 0,5 kg de phosphore.

Afin d'avoir une vision complète des cycles urbains du phosphore, de l'azote et du carbone, nous avons établi plusieurs bilans à l'échelle d'un habitant de l'agglomération parisienne : combien faut-il de ces éléments en amont afin de garantir sa subsistance et pouvons-nous ensuite parler de recyclage ? Le mot « assainissement » explique presque à lui seul l'état de fait actuel : nos déchets sont mélangés à l'eau municipale pour créer une eau dite usée qui constitue un déchet à composition complexe et nocif pour l'environnement, qu'il faut donc éliminer.

Face à ce constat, de nombreuses initiatives sont récemment apparues à travers le monde afin de réaliser un « assainissement écologique ». La majorité d'entre elles repose sur le même principe que pour la gestion des déchets solides : la séparation à la source des urines et des excréments, afin de faciliter leur valorisation. Or malgré son expertise reconnue dans l'assainissement, la France est presque totalement absente des travaux de recherche, d'innovation et de mise en œuvre de l'assainissement écologique.

Ces nouvelles techniques d'assainissement ont-elles alors un avenir en France ? Fabien Esculier, doctorant au LEESU (laboratoire eau environnement systèmes urbains) et à METIS (milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols), laboratoire de l'université Pierre et Marie Curie, est à l'origine du projet OCAPI, c'est-à-dire Optimisation des cycles Carbone, Azote et Phosphore en ville. Dans le cadre de sa thèse, il espère répondre à ces différentes interrogations et proposer des solutions concrètes.

Mon projet d'ingénieur en laboratoire (PIL) consistait à assister Fabien Esculier dans ce projet. L'objectif était de réaliser une analyse des flux de carbone, azote et phosphore, ainsi que les dépenses énergétiques associées, liés à la production d'excréments des habitants de l'agglomération parisienne. Ce bilan biogéochimique du fonctionnement de l'agglomération parisienne sera comparé au fonctionnement d'un éco-quartier ayant mis en œuvre des techniques alternatives.

Tout d'abord j'ai recherché des informations précises sur les cycles urbains de ces éléments afin de pouvoir en proposer une première représentation précise. Ces trois schémas n'ont pas vocation à rester immuables mais justement à évoluer constamment en fonction des nouvelles informations recueillies et du niveau de précision voulu. D'autre part, j'ai accompagné Fabien Esculier à Sneek, aux Pays-Bas, où nous avons rencontré Brendo Meulman, responsable d'un projet de quartier à « assainissement écologique ». Lors de cette visite, nous avons pu observer des toilettes à séparation et surtout un système d'assainissement valorisant les nutriments et l'énergie présents dans les eaux usées. À l'issue de cette visite, j'ai établi une comparaison avec le système d'assainissement français, en particulier celui de l'agglomération parisienne.

1. ÉTUDE DES CYCLES CARBONE, AZOTE ET PHOSPHORE EN RÉGION PARISIENNE

Afin de dresser les schémas des cycles du phosphore, de l'azote et du carbone, nous avons choisi une démarche similaire pour les trois. Les étapes de ces cycles sont assez proches et nous les avons divisé en trois études : l'aspect physiologique (consommation de nourriture et composition des excréments chez les habitants de la région parisienne), le secteur agro-alimentaire, et le système d'assainissement. Il a ensuite fallu boucler les cycles en vérifiant que les quantités de nutriment étaient suffisamment proches et conformes aux différentes études utilisées.

Nous avons choisi de commencer par le phosphore car il s'agit de l'élément le plus facile à suivre. En effet, il n'a pas de forme gazeuse, ce qui aide à suivre sa trace. De plus, il s'agit de l'élément le plus problématique en terme de stocks car le phosphore disponible se trouve en quantité limitée alors qu'il est absolument essentiel pour l'homme, les animaux et les plantes. Aujourd'hui nous exploitons des réserves, principalement au Sahara Occidental, afin de synthétiser les engrais. Mais ces réserves sont exploitées à un rythme trop important pour être soutenable. Cette ressource est pour l'instant majoritairement gaspillée car nous ne recyclons presque pas le phosphore utilisé sur les cultures puis présent dans notre nourriture et dans nos excréments.

Les cycles de l'azote et du carbone sont également importants à tracer car ils sont responsables de la pollution des milieux aquatiques et de la pollution atmosphérique (à cause des gaz à effet de serre). Leur utilisation puis leur traitement demandent également une quantité d'énergie importante, ce qui n'est pas une solution durable.

1.1. Phosphore

a) Physiologie

Afin de déterminer la valeur moyenne du phosphore présente dans les excréments, nous avons recoupé plusieurs sources. La quantité de phosphore présente dans le corps humain est à peu près constante une fois la taille adulte atteinte. Cela représente ainsi près de 1% de la masse corporelle (*Les médicaments*, P. Allain 2008). Ainsi, nous rejetons par nos urines et fèces presque autant de phosphore que nous en consommons¹.

Or les chiffres dans la littérature sont assez variés. En effet, la quantité de phosphore transitant par le corps humain dépend directement des habitudes alimentaires. Celles occidentales sont par exemple particulièrement riches en phosphore. L'étude qui nous a ainsi paru la plus juste est celle de l'AFSSA qui donne des chiffres précis, entre autres, sur la consommation de phosphore des Français entre 2006 et 2007. Nous avons ensuite choisi de faire une moyenne avec les études décrites par Friedler dans *Source Separation and Denitrification for Wastewater* qui se concentrent sur les quantités présentes dans les excréments, dans un cas plus général que la France. Ce chiffre est 17% plus élevé que celui de

¹ Parmi les autres sources de pertes de phosphore par le corps nous pouvons citer les menstruations (pour les femmes menstruées), les cheveux, la barbe ou autres pilosités quand elles sont rasées, les ongles, le sébum, les peaux mortes, le sperme, les sécrétions vaginales (ainsi que les pertes anormales : le mucus nasal, les vomissements, les saignements, etc.) Nous avons choisi ici de négliger ces pertes, qui représentent bien peu par rapport à la précision des mesures utilisées.

l'AFSSA, ce qui peut interroger sur les différences entre les conditions expérimentales et les populations analysées des études.

Dans un second temps, nous avons pris en compte les jeunes franciliens qui consomment moins de phosphore que les adultes (et qui en stockent donc en rejettent moins qu'ils n'en mangent). Pour ce faire, nous avons comptabilisé le nombre de personnes de moins de 18 ans en Île-de-France et avons utilisé la moyenne de la consommation de phosphore pour les 3-17 ans de l'étude AFSSA. Cela nous a permis de parvenir à un chiffre un peu plus faible mais plus précis : 0,50 kg/hab/an de phosphore ingéré et rejeté dans les excréments en région parisienne.

b) Les réseaux

Il existe à ce jour très peu de relevés et de données sur ce qu'il se passe réellement dans les réseaux permettant de relier les habitations aux stations d'épurations. Ainsi nous en sommes réduits à des conjectures concernant ce qui y rentre en amont et ce qui se perd en cours de route. Le SIAAP² nous permet néanmoins d'avoir des valeurs mesurées sur ce qui arrive au niveau des stations d'épuration, ce qui nous permet de vérifier la solidité de nos hypothèses.

Ainsi, cela nous a paru cohérent d'estimer les pertes dues aux réseaux (fuites et mauvais raccordements) à 5% de ce qui arrive en STEP, même s'il est envisageable que ce soit bien supérieur ou inférieur. Considérant les nouvelles réglementations sur l'interdiction progressive du phosphore dans les produits lessiviels, les rejets de phosphore dans les eaux usées sont désormais peu nombreux. Pour notre schéma nous avons donc calculé ces quantités et obtenu 0,08 kg/hab/an, soit environ 1/5^e de ce que rejette un parisien via ses excréments. Puisque 0,55 kg/hab/an parvient en STEP, nos hypothèses paraissent tout à fait plausibles.

Dans l'idéal, il nous faudrait également comparer ce chiffre avec les quantités de phosphore présentes dans les eaux grises. Mais avec la disparition du phosphore des produits lessiviels, la plupart des données sont devenues obsolètes. De plus, le phosphore présent dans les réseaux d'assainissement provient aussi des industries et des eaux de ruissellement en ville. Or pour l'instant le SIAAP ne nous a pas transmis les chiffres concernant les industriels branchés et il est très difficile d'estimer justement les quantités.

Ainsi, nous avons encore de grandes incertitudes sur la quantité de phosphore rejoignant les réseaux (en-dehors des excréments humains) et la quantité perdue dans ces derniers lors du transport vers les stations d'épuration.

c) En station d'épuration

Le bilan annuel 2013 du SIAAP nous a permis d'obtenir des informations très précises sur le devenir des eaux usées des 8 900 000 habitants de la zone de collecte. Nous nous sommes néanmoins questionné sur la pertinence de ce chiffre. Grâce aux données INSEE nous pouvons l'affiner. Mais cela serait vraisemblablement négligeable face aux millions de touristes visitant Paris chaque année (et donc y vivant plusieurs jours) ainsi que les nombreuses personnes travaillant en région parisienne mais n'habitant pas sur la zone SIAAP.

² Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne.

Ainsi, pour l'instant, nous avons fait le choix de garder un ordre de grandeur mais pour obtenir une meilleure précision, il s'agit d'un point à creuser.

83% du phosphore est traité et se retrouve ainsi dans les boues. Le chiffre est étonnamment bien supérieur à la moyenne française d'après la publication *Global Biogeochemical Cycles* de K. Senthilkumar (efficacité de seulement 47,1%). Cela peut s'expliquer car cette étude avait des chiffres plus anciens puisqu'en 10 ans la quantité de phosphore admise dans les usines du SIAAP a diminué de plus de 25%. De plus, le SIAAP doit désormais traiter 80% du phosphore.

Le phosphore « traité » se retrouve dans les boues. Ces dernières ont des devenir variés : épandage, compostage, co-méthanisation, incinération, pyrolyse, cimenterie et enfouissement. Ainsi 50,4% des boues, donc 50,4% du phosphore en admettant que la composition de celles-ci soit homogène, sont utilisées dans le secteur agricole (compostage et épandage), et 49,6% sont incinérées et/ou enfouies, ce qui empêche *a priori* toute mobilisation future de cette ressource.

Enfin, les stations d'épuration du SIAAP ont choisi de ne pas traiter 17% du phosphore arrivant avec les eaux usées, comme les y autorisent les réglementations. Ainsi environ 0,1 kg de phosphore par habitant est rejeté dans le milieu naturel, c'est-à-dire dans la Seine, chaque année.

d) Les boues des stations d'épuration

En Île-de-France, sur la zone gérée par le SIAAP, une grande partie des boues produites à l'usine de Seine-Aval sont ensuite épandues sur des champs. Les autres stations d'épuration produisent des quantités plus faibles, ce qui empêche pour l'instant d'atteindre le seuil de rentabilité économique de cet épandage. Actuellement, les stations de Seine Amont et de Seine Grésillons préfèrent faire du compost avec une partie de leur boues. Les boues qui ne sont pas recyclées sont majoritairement incinérées (75%), envoyées en cimenterie pour servir de combustible (15%) et directement enterrées (10%) dans le cas de déchets dangereux. La récupération du phosphore dans les cendres est une technologie existante mais non appliquée par le SIAAP.

Production de boues 2013 du SIAAP	Total	Épandage	Compost	Co-méthanisation	Pyrolyse	Incinération	Cimenterie	ISDND ³
Quantité (en tonne de matière sèche)	126241	41472	22071	754	1633	44879	9145	6287
en %	100,0%	32,9%	17,5%	0,6%	1,3%	35,6%	7,2%	5,0%

Tableau 1 : Production 2013 des boues du SIAAP

En plus des boues, les stations d'épuration produisent des déchets de dégrillage, des graisses et des sables qui n'ont pas été intégrées dans l'analyse.

Concernant les boues de Seine-Aval, une partie également part en incinération et en cimenterie mais la majorité est vendue en tant qu'engrais ou compost. La différence entre ces deux types de boue provient de leur classification en tant que produits. Le compost (qui représente 17% des boues produites au niveau du SIAAP) est vendu à des entreprises

³ Installation de stockage de déchets non dangereux

partenaires comme un produit à part entière. Les boues qui servent à l'épandage dépendent d'une autre législation et sont ensuite convoyées, par des partenaires, directement à des agriculteurs dans un rayon de 200 kilomètres autour de la station de Seine-Aval.

Une étude de M.A. Bourdain et M. Valé *Valeur Fertilisante Phosphatée de produits organiques* nous permet d'obtenir des informations sur la quantité de phosphore réellement bio-disponible dans les boues. Le phosphore phytodisponible désigne la fraction du phosphore du sol susceptible d'être prélevée par les végétaux cultivés dans les conditions du champ. La valeur fertilisante du phosphore d'un intrant est une grandeur relative qui exprime la phytodisponibilité du phosphore de l'intrant testé par rapport à celle d'une forme de référence, le phosphore soluble dans l'eau et le citrate d'ammonium neutre (superphosphate et phosphate d'ammoniaque). Ainsi, nous obtenons le tableau ci-dessus.

Produits	traitements	VFP(%)
Phosphate minéral soluble dans l'eau		100
Boues de STEP	biologique (18)	92 ± 16
	physico-chimique (6)	88 ± 5
	digestion(16)	71 ± 20
	compostage (5)	73 ± 18
O.M. grises	compostage (2)	84
Biodéchets	compostage	54
Fumiers bovins (4)		76 ± 8
Litières porcs (5)	sur paille ou copeaux	99 ± 8
Lisiers porcs	refus de tamisage (2)	86 ± 2
	boues (2)	97 ± 5
Déjections volailles (2)		87 ± 15

Valeur Fertilisante Phosphatée à court terme (M Linères, C Morel, P Castillon - 2007)

Ainsi nous remarquons que le phosphore est mobilisable à 73% pour du compost et à 92% pour des boues biologiques. Le reste du phosphore reste donc stocké dans les sols agricoles.

e) Le secteur agricole et les agro-industries

Nous avons utilisé l'étude *Global Biogeochemical Cycles* de K. Senthilkumar de 2012 pour obtenir les grands flux de phosphore en France (moyenne effectuée sur les années 2002 à 2006) :

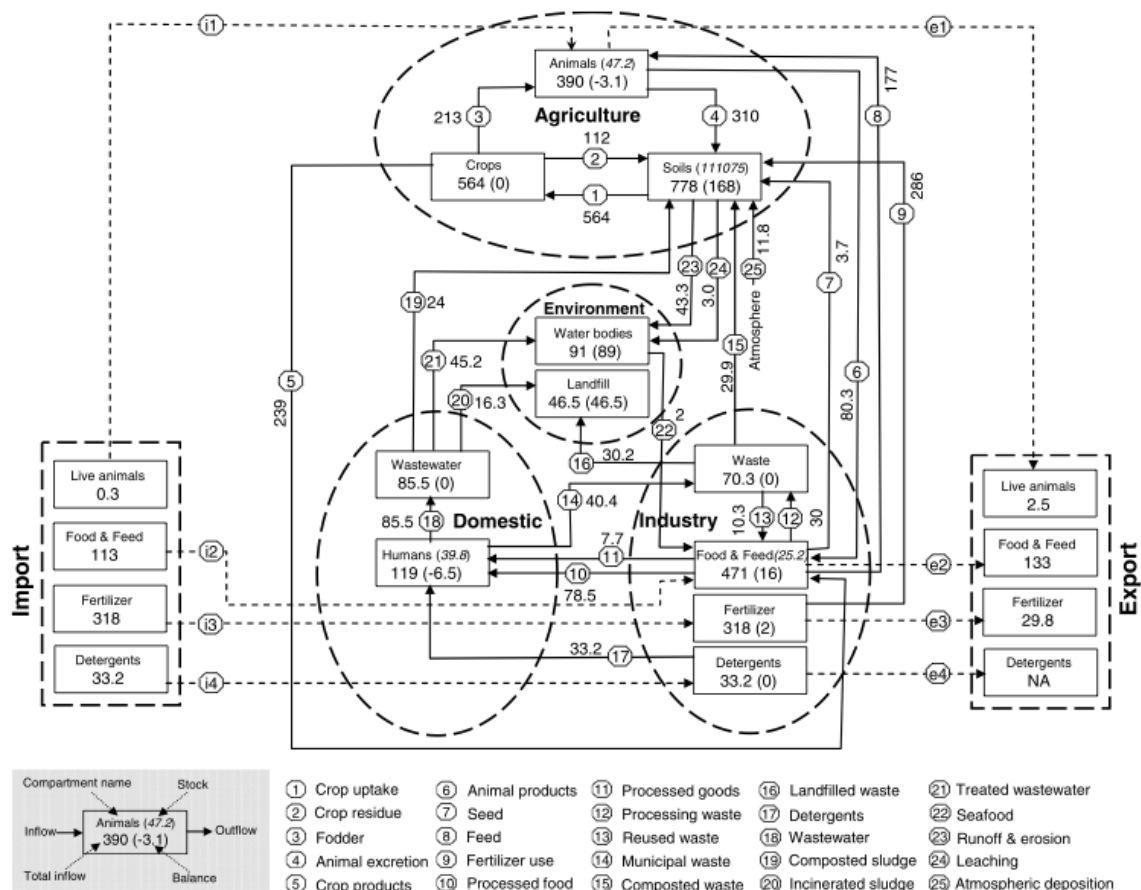


Figure 1. Conceptual design and quantification of P stocks, flows and balances in France. All values are expressed in kt P y^{-1} (except for stocks, expressed in kt P) averaged for the years 2002–2006. See the caption in the gray box to identify the values for stocks, flows and balances. The flow numbers i1–i4 and e1–e4 are import and export flows, respectively; NA = not available.

Cette étude paraissait très complète mais deux points ne nous permettaient pas de l'utiliser telle quelle. Tout d'abord, elle a été réalisée à l'échelle française et non à celle des habitants de la région parisienne. D'autre part, les données sont aujourd'hui un peu anciennes (récoltées entre 2002 et 2006), d'autant plus que les réglementations sur l'utilisation du phosphore ont évolué et qu'il y en a aujourd'hui beaucoup moins dans les détergents notamment.

Notre propre étude partant du cycle biologique d'un parisien, nous avons choisi d'accorder cette étude avec notre cycle par le biais de la quantité de phosphore ingérée (étude AFFSA), soit $0,50 \text{ kg/an}$. Nous avons également estimé que pour chaque kilogramme de nourriture consommée, $0,75 \text{ kg}$ de nourriture était jetée (ce choix de taux est expliquée dans le chapitre sur l'azote). Le chiffre avancé par l'étude de K. Senthilkumar est de $0,77 \text{ kg}$, ce qui corrobore notre choix.

Ainsi, en remontant depuis la consommation humaine d'Île-de-France, nous avons obtenu la quantité de phosphore dans la nourriture produite. À l'aide d'une règle de trois, nous avons calqué les proportions de phosphore nécessaire sous forme d'engrais fertilisants et nous avons obtenu un chiffre plus faible que pour cette étude : $3,31 \text{ kg/an}$ par rapport à $4,51 \text{ kg/an}$. Cette différence est assez marquée, ce qui souligne l'incertitude de notre étude sur les chiffres du secteur agroalimentaire. Cependant, en plus de cette règle de trois, nous avons fait sortir les exportations et les importations du cycle, ce qui a encore diminué les chiffres de l'étude (la

France est excédentaire du point de vue de la production de nourriture). Nous avons donc obtenu une quantité de 2,11 kg/an/hab de phosphore présent dans les engrais.

En travaillant toujours en proportion égale avec l'étude de K. Senthilkumar, nous obtenons que 0,35 kg/an de phosphore est perdu en ruissellement et 1,28 kg/an est stocké dans les sols (ce qui ne l'empêche pas forcément d'être mobilisable). Ainsi, seul 26% du phosphore mis sur les champs, via les engrais et les boues de stations d'épuration, est ensuite retrouvé dans la nourriture. Le reste n'est pas forcément perdu mais le ratio est quand même faible, surtout pour un élément chimique aussi important que le phosphore.

Nous avons également repris l'estimation de l'étude de K. Senthilkumar à propos du dépôt atmosphérique de phosphore et sommes arrivés à 0,09 kgP/hab/an. Ce phosphore transporté par les vents se dépose sur la surface terrestre.

Enfin, nous avons calculé la proportion de phosphore présent dans les produits de la mer consommés en région parisienne grâce à notre étude du cycle de l'azote : 8,8% du phosphore de la nourriture est issu de la mer. Nous avons donc légèrement adapté notre cycle pour prendre en compte cette origine du phosphore.

f) Schéma du cycle du phosphore

Le schéma final a pour but d'explicitier l'origine et le devenir du phosphore présent dans les excréments humains en région parisienne (zone du SIAAP comprenant 8 900 000 habitants).

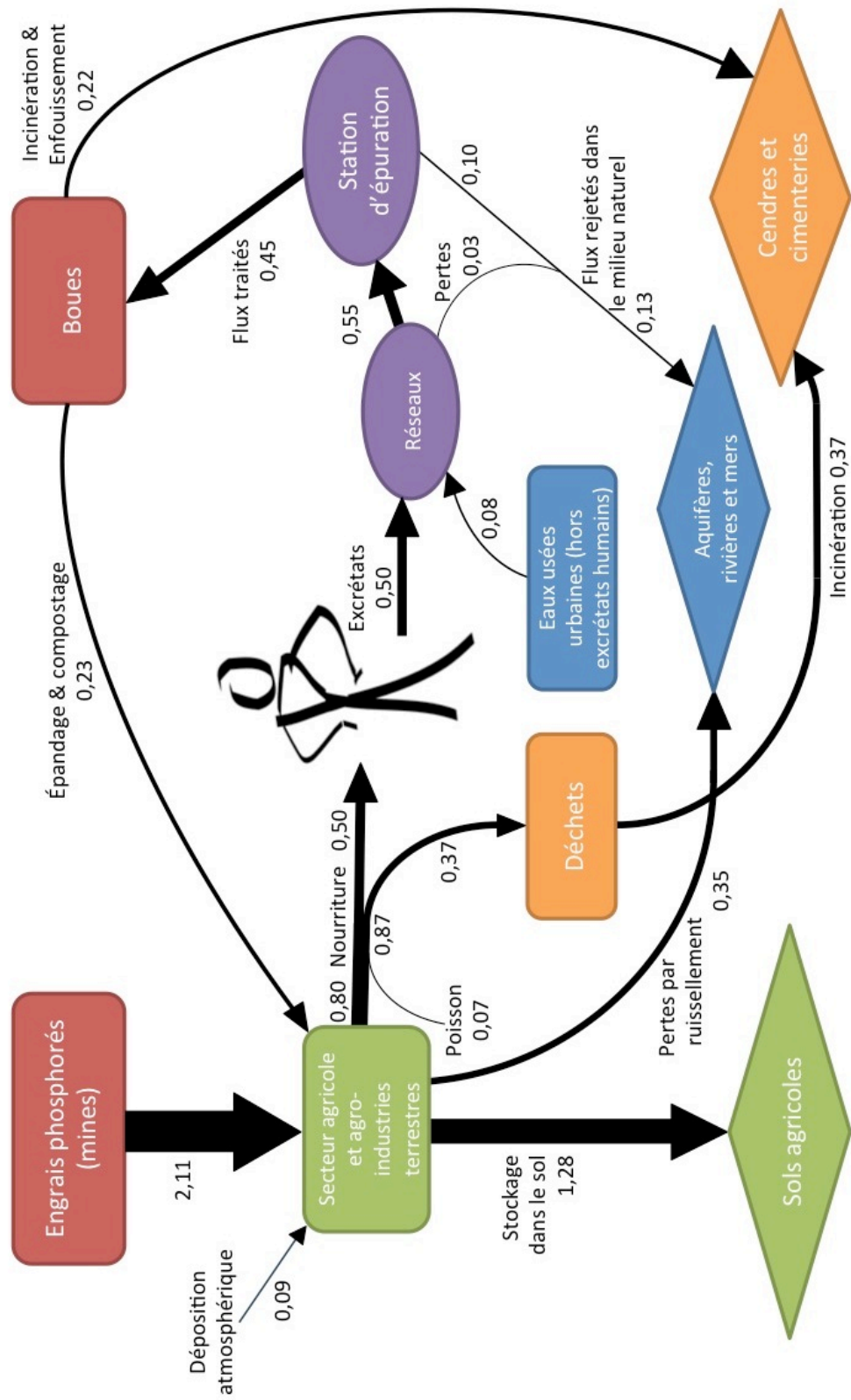
Bien entendu, le schéma actuel est simplifié : il ne prend pas en compte les différentes formes chimiques et moléculaires du phosphore, il néglige et simplifie certains flux et il regroupe certaines étapes du cycle. Ainsi quels sont les points encore à creuser ?

Certains chiffres, notamment ceux du SIAAP, ne sont pas donnés en fonction du nombre d'habitants. Nous avons nous-mêmes fait la conversion pour rendre le schéma plus intelligible. Ainsi nous avons estimé que le SIAAP gère les excréments de 8 900 000 personnes. Mais nous n'avons pas encore pris en compte les touristes, qui n'habitent pas sur la zone mais affluent à Paris par millions. Nous n'avons également pas pris en compte les habitants « hors zone » venant tous les jours travailler dans celle-ci. Enfin, lors des vacances et congés, des habitants quittent la zone. Nous savons par exemple grâce aux chiffres du SIAAP qu'en été moins de phosphore est traité, ce qui veut dire que le solde entre les habitants partis en vacances et les touristes est positif.

Certains déchets urbains sont, et devraient, être recyclés. Nous n'avons pas encore recherché les chiffres et avons donc estimé que cela ne représentait presque rien actuellement. Une étude plus approfondie de la question permettrait de mieux détailler la partie amont du cycle. En tout cas il s'agit d'une piste d'amélioration du cycle très intéressante *a priori*.

La quantité d'engrais phosphorés n'est pas très précisément déterminée. L'étude est complexe car il ne s'agit pas de calculer la quantité utilisées dans la zone SIAAP (quasiment nulle puisqu'il s'agit d'une région densément peuplée) mais dans les régions productrices de nourriture, qui ne sont pas toutes françaises évidemment. Nous pourrions croiser l'étude de K. Senthilkumar avec d'autres plus récentes et établir un chiffre par rapport à la quantité d'engrais phosphorés utilisés en France, en estimant que l'utilisation de ce type d'engrais est la même dans les pays desquels nous importons de la nourriture.

Cycle du Phosphore pour un Parisien (en kgP/an/hab)



1.2. Azote

a) Physiologie

De la même manière que pour l'étude du cycle du phosphore, nous avons recoupé plusieurs études physiologiques sur l'azote afin de déterminer une quantité moyenne ingérée et rejetée. Encore une fois, nous avons fait l'approximation acceptable d'estimer que ces deux quantités étaient équivalentes. Ainsi nous avons obtenu une valeur moyenne de 4,5 kg/an/hab d'azote consommé et rejeté dans les réseaux d'assainissement. L'étude d'AFSSA ne donne que la consommation des protéines et nous avons donc choisi la valeur de 0,15 kg d'azote pour 1 kg de protides, le SIAAP ayant retenu 0,16 dans ses études. Il est intéressant de constater que le chiffre de Friedler est 4% plus faible que celui calculé grâce aux chiffres de l'AFSSA alors que pour le phosphore il était 17% plus élevé.

Comme dans le cas du phosphore, nous avons pris en compte les jeunes franciliens qui consomment moins d'azote que les adultes. Pour ce faire, nous avons comptabilisé le nombre de personnes de moins de 18 ans en Île-de-France et avons utilisé la moyenne de la consommation de protides pour les 3-17 ans de l'étude AFFSA. Cela nous a permis de parvenir à un chiffre un peu plus précis.

b) Les réseaux

Comme pour l'étude du phosphore, nous sommes réduits à des conjectures concernant ce qui y rentre en amont et ce qui se perd pendant le transport vers les stations d'épuration. Nous avons en plus choisi d'ajouter certaines entrées et sorties complexifiant les flux. En effet, l'azote peut prendre plusieurs formes gazeuses, principalement du diazote (N_2), de l'ammoniac (NH_3) ou du protoxyde d'azote (N_2O), sans qu'il n'y ait aucune mesure sur les pertes de ce type au sein des réseaux.

Afin de limiter les mauvaises odeurs et la formation de sulfure d'hydrogène (H_2S), gaz déclaré toxique par l'Union Européenne depuis 2010, du nutriox ($Ca(NO_3)_2$) est déversé dans les réseaux et à l'entrée des stations d'épuration (nous avons représenté l'ajout de nutriox dans les réseaux). Cela correspond à 0,4 kg/an/hab d'azote, entièrement converti en azote gazeux, majoritairement en diazote. De plus, la consommation en eau potable pour les autres usages que la boisson (douche, vaisselle, etc.) est d'environ 120 l/hab/jour d'après l'Eau de Paris (nous avons pour l'instant choisi ce chiffre sur l'ensemble de la zone), ce qui nous donne un rejet de 0,3 kg/hab/an d'azote dans les réseaux sous forme de nitrates (NO_3^-). Ainsi environ 0,7 kg/an/hab d'azote sort des réseaux sous forme gazeuse.

Les nitrates n'arrivent quasiment pas en station d'épuration. Ils sont dénitrifiés et finalement réduits sous forme gazeuse. Au contraire, l'ammonium/ammoniac (NH_3) ne passe a priori presque pas sous forme gazeuse N_2 et se retrouve donc en station d'épuration. Ainsi, nous avons pu différencier certains flux d'azote en fonction de la forme des composés azotés.

Cela nous a paru également cohérent d'estimer les pertes dues aux réseaux (fuites et mauvais raccordements) à 5% de ce qui arrive en STEP (soit 0,2 kg/an/hab), même s'il est envisageable que ce soit en réalité supérieur. Ainsi, par différence, nous obtenons un apport de 0,6 kg/an/hab d'azote dû aux industries et aux autres eaux usées urbaines (eaux grises et déversements divers dans les égouts), soit 14,6 t/jour dans la zone du SIAAP.

c) En station d'épuration

Le bilan annuel 2013 du SIAAP nous a permis d'obtenir des informations très précises sur le devenir des eaux usées des 8 900 000 habitants de la zone d'exploitation (presque toute l'Ile-de-France). 62% de l'azote seulement est traité et se retrouve ainsi sous forme gazeuse (N_2 ou N_2O) ou dans les boues. Contrairement au phosphore nous ne pouvons pas dire que tout l'azote traité part dans les boues. Nous avons donc utilisé les taux de présence de l'azote dans les boues et déterminé par différence la quantité d'azote émise sous forme gazeuse. Ainsi 2,8 kg/hab/an part sous forme gazeuse contre 0,2 kg/hab/an dans les boues. Ces dernières sont donc très pauvres en azote. Enfin 1,9 kg/hab/an est encore rejeté dans le milieu naturel, malgré la législation qui demande un taux minimum de 70%. Mais ce taux ne doit être respecté qu'en-dehors des jours de débordement. Le SIAAP explique être au-dessus de ce seuil en-dehors de ces journées de débordement, lors notamment d'orages et de pluies intenses qui obligent les opérateurs à ouvrir les vannes et déverser dans les rivières directement, sans traitements.

L'azote contenu dans les boues suit la même « trajectoire » que le phosphore (voire partie 1.1) : 0,1 kg/an/hab part en incinération, donc ensuite sous forme gazeuse dans l'atmosphère, et 0,1 kg/an/hab est épandu sur les champs, ce qui est finalement très faible par rapport au 10,5 kg/an/hab d'apport sous forme d'engrais azotés.

Une autre problématique a été soulevée à propos des émissions de gaz. Le rejet de N_2 n'est pas spécialement gênant puisqu'il s'agit du gaz le plus répandu dans l'atmosphère. En revanche, peu d'études se sont penchées sur la quantité exacte d'azote quittant les stations d'épuration sous forme de protoxyde d'azote (N_2O). Or il s'agit d'un gaz à effet de serre avec un potentiel de réchauffement global à cent ans 298 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone CO_2 (sur une base massique, d'après le GIEC⁴). Actuellement, certaines études estiment qu'à peu près 3% des gaz azotés émis par les stations d'épuration et les réseaux est constitué de protoxyde d'azote.

d) Le secteur agricole et les agro-industries

L'azote que nous retrouvons dans la nourriture possède deux origines distinctes : les engrais azotés, la plupart du temps chimiques, et la fixation atmosphérique naturelle majoritairement opérée par les plantes légumineuses⁵. Pour cette partie du cycle, nous avons utilisé l'étude *La cascade de l'azote* de G. Billen qui détaille l'empreinte azote du Francilien moyen en 2006.

Nous avons donc repris les chiffres de cette étude, sans distinguer, par souci de clarté, d'où venait la nourriture. En effet, l'agriculture du bassin versant de la Seine est principalement dominée par les grandes cultures, avec peu d'élevage et un recours très limité à la fertilisation organique, qu'elle soit d'origine végétale ou animale. Ainsi les engrais azotés, chimiquement produits grâce au procédé d'Haber-Bosch, assurent l'essentiel des besoins des plantes cultivées.

⁴ Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Chiffre issu de l'étude de Forster, P. et al., 2007: *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*.

⁵ Plantes notamment capables de fixer l'azote atmosphérique grâce à des bactéries en symbiose avec les racines des plantes (exemples : soja, lentilles, cacahuètes, haricots).

Ce procédé, très énergivore, sert à synthétiser de l'ammoniac (NH_3) par hydrogénation du diazote gazeux atmosphérique (N_2) par le dihydrogène gazeux (H_2) en présence d'un catalyseur. Au XXI^e siècle, la production d'ammoniac synthétique consommerait de 3 à 5 % de la production mondiale de gaz naturel, soit entre 1 et 2% environ de la production mondiale d'énergie⁶. Effectivement, pour parvenir à effectuer les étapes du procédé de façon économique, il faut que le système de production fonctionne à des pressions de l'ordre de 200 atmosphères et à des températures variant de 500 à 600 °C.

La majeure partie de la production agricole du bassin de la Seine, très importante, est exportée. Seule 10% de la production est consommée sur place. En revanche, le faible développement de l'élevage demande de l'importation, ce qui réduit considérablement le caractère exportateur en azote du bassin de la Seine (G. Billen a établi un rendement moyen de conversion des protéines végétales en protéines animales de 6,25).

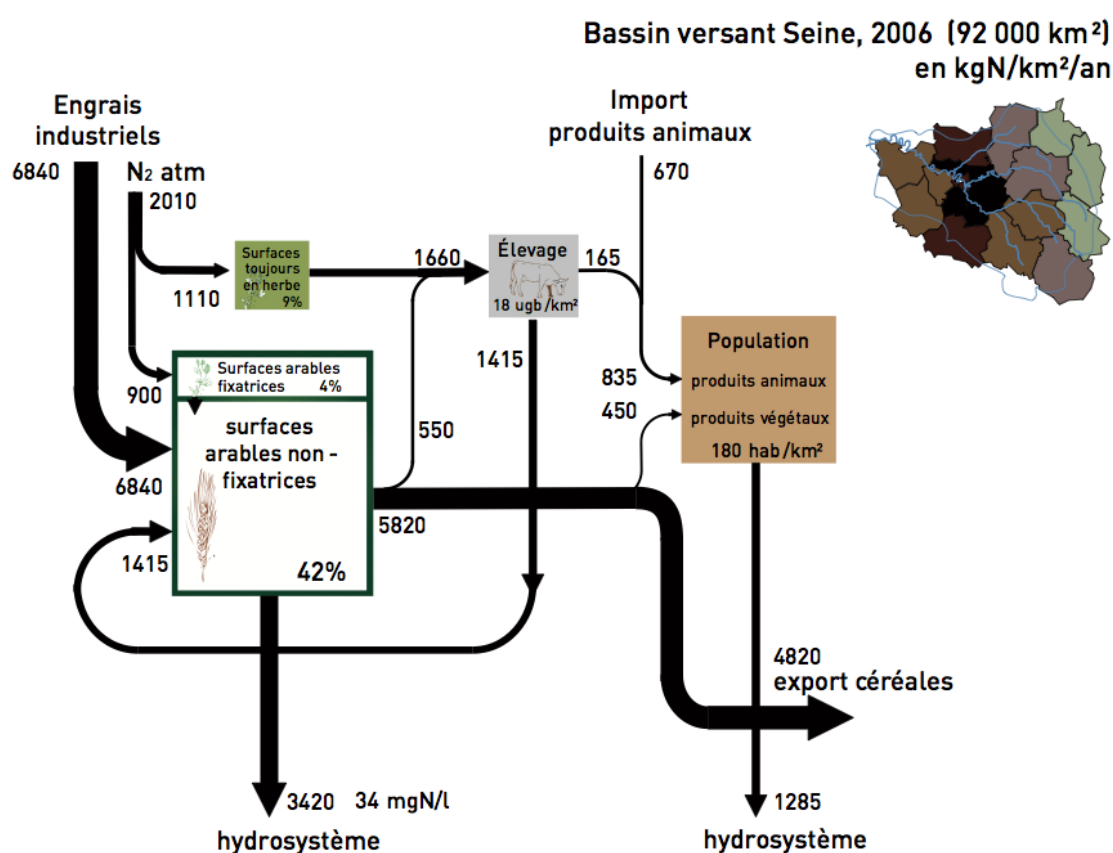


Figure 2 : Fonctionnement biogéochimique de 2006 du système agraire du bassin de la Seine (en kgN/km²/an)

⁶ Chiffres issus de *Enriching the Earth : Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*, de Vaclav Smil, 2001.

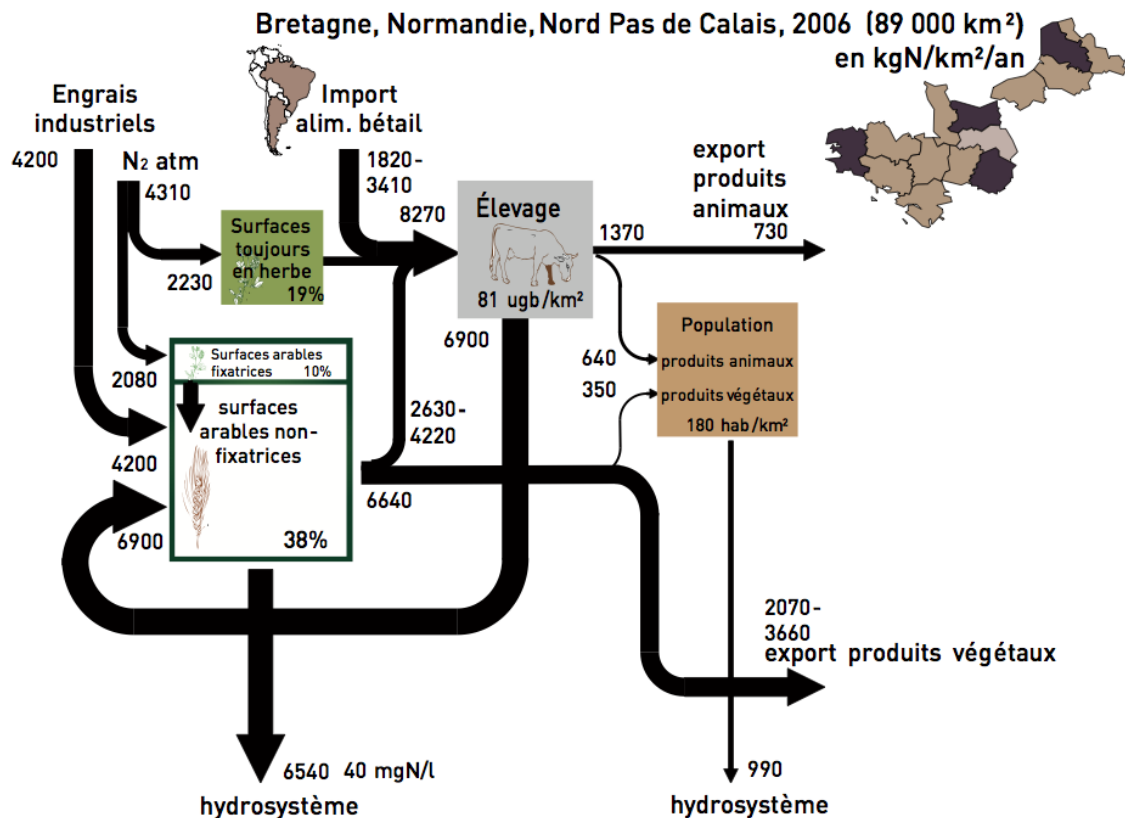


Figure 3 : Fonctionnement biogéochimique de 2006 du système agricole (en kgN/km²/an)

Schémas issus de *La cascade de l'azote* de G. Billen, 2011

La plus grande partie des besoins franciliens en protéines animales est issue de la Bretagne, de la Normandie et du Nord-Pas-de-Calais. Ainsi, l'alimentation du bétail dans ces régions représente le flux d'azote le plus important du système, notamment via des importations de soja sud-américain. Il a donc fallu également calculer la quantité d'azote fixé par les légumineuses, dont le soja fait partie, au Brésil et en Argentine.

En approximant que l'essentiel de la consommation francilienne de produits végétaux est issue d'agrosystèmes similaires à celui du bassin de la Seine et que l'essentiel de la consommation de produits animaux provient d'agrosystèmes du type Bretagne-Normandie-Nord-Pas-de-Calais, l'équipe de G. Billen a pu obtenir un schéma présentant l'empreinte azotée du Francilien moyen. À noter, le territoire de l'agglomération parisienne présente un bilan net d'exportation en azote.

utilisé comme engrais se retrouve surtout dans les aquifères et les rivières sous forme de nitrates.

Mais contrairement au cycle du phosphore, afin de retrouver les chiffres sur la physiologie humaine et la quantité d'azote ingérée par le Francilien moyen, nous avons conclu que la majeure différence entre la nourriture amenée vendue en Île-de-France et la consommation moyenne partait en tant que déchets. Cela nous a donné un chiffre assez élevé : 3,5 kgN/hab/an d'azote part en déchetterie, soit 43,8% de la nourriture. Cela correspond à 0,78 de déchets pour 1 kgN/hab/an de nourriture, ce qui explique notre choix d'un taux de 0,75 pour le phosphore. Ce qui part en déchets est ensuite incinéré et l'azote présent dans les déchets se retrouve alors sous une forme gazeuse.

e) Schéma du cycle de l'azote

Le schéma du cycle de l'azote est plus complexe que celui du phosphore car l'azote peut prendre beaucoup de formes chimiques, dont des gazeuses. Ainsi nous avons vu qu'il s'agit d'un cycle difficile à « boucler » puisque la majeure partie de l'azote utilisé en agriculture se perd dans les milieux aquatiques et dans l'air, sous des formes parfois nocives comme le N_2O .

Plusieurs points nous semblent importants vis-à-vis de ce cycle. Tout d'abord les pertes par ruissellement sont très importantes et représentent des dangers pour l'environnement. Cette eutrophisation des milieux aquatiques a déjà soulevé des questions et des réponses commencent à être données pour éviter le lessivage des sols. Mais c'est étonnant de voir qu'au total les pertes par ruissellement sont plus importantes que la quantité d'azote présente dans les engrais azotés.

De plus, comme pour le phosphore, les pertes liées au gaspillage alimentaire représentent une grande quantité d'azote. Le recyclage serait bien plus vertueux d'un point de vue environnemental (baisse des gaz à effets de serre) et énergétique (baisse de la quantité d'énergie nécessaire pour brûler les déchets et produire des engrais azotés).

Enfin, les stations d'épuration rejettent encore dans les milieux aquatiques 39% de l'azote admis en entrée, ce qui est plutôt dangereux pour ces milieux, surtout en ville.

De manière générale, l'azote, contrairement au phosphore, n'est pas encore vu comme une ressource. Abondamment présent dans l'atmosphère, nous préférons dépenser beaucoup d'énergie pour créer des engrais et obtenir l'azote nécessaire à l'agriculture, tout en dépensant tout autant d'énergie en station d'épuration pour faire disparaître cet azote.

Flux de l'azote (N₂, NH₃, N₂O) en milliers de tonnes/an :

- Procédé Haber-Bosch : 13,7
- Fixation atmosphérique biologique : 13,2
- Engrais azotés chimiques : 13,2
- Secteur agricole et agro-industries terrestres : 4,9
- Azote gazeux (N₂, NH₃ & N₂O) : 4,9
- Incinération : 3,5
- Déchets urbains : 3,5
- Azote gazeux (N₂, NH₃ & N₂O) : 3,6
- Boues : 0,1
- Épandage & compostage : 0,1
- Incinération : 0,1
- Station d'épuration : 2,8
- Flux traités : 0,2
- Réseaux : 4,9
- Eaux usées urbaines : 0,6
- Excréments : 4,5
- Pertes : 0,2
- Flux rejetés dans le milieu naturel : 2,1
- Aquifères, rivières et mers : 14,8

Flux de phosphore (P) en milliers de tonnes/an :

- Nutrix Ca(NO₃)₂ : 0,4
- Eau potable : 0,4
- Pertes par ruissellement : 14,8

1.3. Carbone

a) Mesurer le carbone

L'élément carbone est le composant essentiel des composés organiques mais nous le retrouvons aussi sous forme gazeuse, notamment en dioxyde de carbone (CO_2). La quantité de carbone n'est cependant pas toujours mesurée, ce qui complique l'étude du cycle. Ainsi, nous débuterons cette partie en détaillant les différentes unités de mesure portant sur le carbone.

La demande chimique en oxygène (DCO) est la consommation en dioxygène par les oxydants chimiques forts pour oxyder les substances organiques et minérales de l'eau. Elle permet notamment d'évaluer la charge polluante des eaux usées. En effet, le dioxygène gazeux dissous étant indispensable à une vie aquatique animale, une demande en dioxygène trop importante dans une eau de rivière serait nuisible à cette vie animale.

La demande biochimique en oxygène (DBO) est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les matières organiques par voie biologique, c'est-à-dire par oxydation des matières organiques biodégradables par des bactéries. Elle permet entre autre d'évaluer la fraction biodégradable de la charge polluante carbonée des eaux usées. Elle est en général calculée au bout de 5 jours à 20 °C dans le noir et on parle alors de DBO_5 .

La quantité de carbone organique totale est communément notée COT et correspond à ce que nous cherchons à calculer pour former un cycle. La majorité du carbone des eaux usées se trouve sous forme organique et c'est donc sous cette forme que nous le traçons.

Ces deux mesures ne sont donc pas directement reliées à la quantité de carbone mais en fonction des milieux, certains rapports ont été établis, permettant de retrouver la quantité de carbone. Nous avons notamment utilisé les rapports suivants, au moins valables dans les eaux usées, donnés par une étude de l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne)⁷ :

	$\text{DBO}_5 / \text{COT}$	$\text{DBO}_5 / \text{DCO}$	DCO / COT
Rapports EPFL	1,0 – 1,6	0,7	1,9

Tableau 2 : Rapports entre DBO_5 , DCO et COT d'après une étude de l'EPFL

b) Physiologie

Comme pour le phosphore et l'azote, nous avons compilé plusieurs études afin d'établir une moyenne cohérente des quantités de carbone présentes dans les excréments. Nous sommes ainsi arrivés aux chiffres de 8,7 kgC/hab/an dans les excréments et un total de 20,1 dans les eaux usées qui correspond aux chiffres du SIAAP.

Mais contrairement à ce que nous avons pu faire précédemment, la quantité de carbone ingérée sous forme de nourriture n'est absolument pas égale à celle présente dans les excréments. La majeure partie de ce carbone ingéré est utilisée pour libérer de l'énergie et le carbone repart donc sous forme de dioxyde de carbone via la respiration.

⁷ Méthodes analytiques pour influents / effluents de bioréacteurs ou de stations d'épuration, laboratoire de biotechnologie environnementale, JP Kradolfer, M Deront et N Adler, 2013

Grâce aux valeurs de DCO et de DBO₅ des excréments et au ratio de 14,9 kJ/gDCO⁸ dans la matière organique présente dans les eaux usées, nous avons établi un ratio de 26,6 MJ/kgC, *a priori* applicable à la nourriture. L'étude AFSSA donne le chiffre de 2162 kcal/pers/jour pour les apports énergétiques totaux, soit 3302 MJ/pers/an, ce qui nous permet d'estimer à 124 kg/pers/an la consommation de carbone via la nourriture. Puisque presque 9 kg partent dans les excréments, les 114 kg restants sont expulsés du corps humain par la respiration.

Ainsi les excréments ne contiennent que 7% du carbone ingéré sous forme de nourriture, le reste part sous forme de CO₂, ce qui nous fait relativiser sur l'importance du devenir du carbone dans les systèmes d'assainissement.

c) Réseaux et stations d'épuration

Une grande partie du carbone présent dans les réseaux d'assainissement ne provient pas des excréments comme nous l'avons vu. Or il est difficile de précisément calculer cette quantité. À Paris, l'utilisation du réseau d'eau non potable pour le nettoyage des routes et des lieux publics est en plus particulièrement importante. Une partie de la matière organique, principal vecteur du carbone, rejoint ainsi les réseaux d'eaux usées mais une partie du carbone part sous forme gazeuse également (depuis les réseaux ou même avant, directement depuis l'extérieur). Pour l'instant nous avons donc choisi de ne pas développer cette étape du cycle car beaucoup de points restent à creuser.

Pour calculer la part de carbone qui part sous forme gazeuse en réseau, c'est *a minima* le carbone utilisé pour la dénitrification de l'azote contenu dans l'eau potable et le nutrix.

Concernant les stations d'épuration, les chiffres du SIAAP nous ont encore une fois permis de réaliser un cycle assez précis. Pour la quantité de carbone, ces chiffres étaient tous en DCO, en DBO₅ et en MO (matière organique). Comme le rapport DCO/COT était le plus satisfaisant (les chiffres théoriques et ceux calculés étaient proches), nous avons utilisé les données DCO converties en COT. Nous avons ainsi obtenu que 24,4 kg/pers/an de carbone était recueilli par le SIAAP, 3,2 kg était rejeté dans le milieu, et 21,5 kg était « éliminé ». Sous ce terme nous retrouvons le carbone des boues, le carbone du biogaz et celui qui a rejoint l'atmosphère sous forme de gaz (dioxyde de carbone CO₂, monoxyde de carbone CO⁹ et méthane CH₄¹⁰).

L'étude des boues du SIAAP nous a permis, notamment grâce au ratio azote carbone (N/C) de celles épandues, d'obtenir la quantité de carbone présent dans les boues : 4,0 kg/pers/an. En effet, pour ce faire, nous avons d'abord calculé la quantité de carbone présente dans les boues épandues (1,3 kg/pers/an) puis utilisé la répartition de l'utilisation des boues (32,9% en 2013 furent épandues) pour trouver la quantité totale dans les boues produites. Ainsi, de la même manière que pour le phosphore et l'azote, 2 kg retournent sur les champs en tant qu'engrais via de l'épandage ou du compost et 2 kg sont traités comme des déchets, donc majoritairement brûlés et retournent donc dans l'atmosphère sous forme de gaz.

⁸ La part d'énergie récupérable pour le métabolisme des cellules est de 2860 kJ/mol (D. Pol, INTRESP)

⁹ Le monoxyde de carbone CO est un gaz hautement toxique pour l'être humain

¹⁰ Le méthane CH₄ est un gaz à effet de serre près de dix fois plus polluants que le dioxyde de carbone. Il s'agit cependant d'un hydrocarbure qui peut être utilisé à des fins énergétiques.

Une particularité du carbone en station d'épuration est qu'il est tout de même considéré dans une certaine mesure comme un produit et non un déchet. En effet, les stations du SIAAP produisent du biogaz (notamment du méthane) grâce à la méthanisation de la matière organique. Tout ce biogaz est aujourd'hui directement consommé sur place pour faire fonctionner les stations. Ainsi 2,8 kg/pers/an de carbone est utilisé de cette manière.

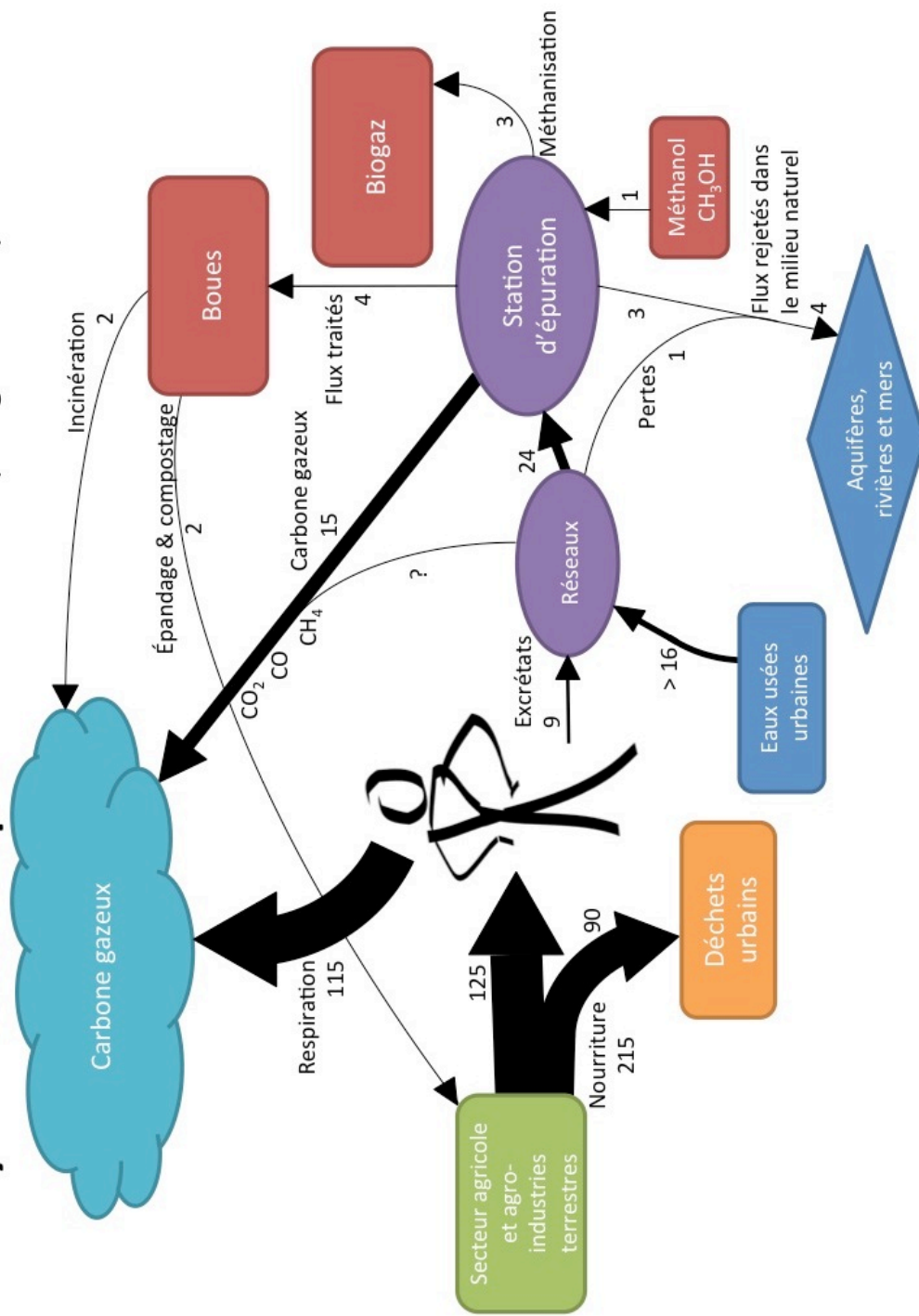
De plus, du méthanol (CH_3OH) est ajoutée aux eaux usées du SIAAP pour leur fournir une source de carbone afin d'alimenter les bactéries dénitrifiantes, qui transforment les nitrates en diazote N_2 . Cet ajout de méthanol reste cependant très faible puisqu'il ne s'agit que de 1 kg/pers/an de carbone, mais il vient s'ajouter au 24 kg admis en entrée de station d'épuration.

d) Schéma du cycle du carbone

Nous n'avons pas encore étudié la partie amont du cycle du carbone, c'est-à-dire tout ce qui est agriculture et les industries agroalimentaires. Cependant, les quantités de carbone mises en jeu sont certainement bien plus importantes que celles présentes dans les systèmes d'assainissement. Effectivement, le carbone est très présent dans les sols, les végétaux et les animaux. Cependant, une partie du carbone que nous apportons sur les champs est probablement perdue à cause du lessivage. Il s'agit d'une étude plus délicate que celle du phosphore et de l'azote car le carbone est plus difficile à suivre à la trace (à cause notamment des différentes façons de le quantifier). De plus, la préoccupation actuelle se focalise beaucoup plus sur le dioxyde de carbone CO_2 en tant que gaz à effet de serre.

Contrairement aux cycles du phosphore et de l'azote, les échelles ne sont pas les mêmes : 0,55kg/pers/an de phosphore et 4,9 kg/pers/an d'azote sont admis en entrée de station d'épuration contre 24 kg/pers/an de carbone. Les problématiques environnementales sont également différentes puisqu'aujourd'hui seul le rejet de CO_2 apparaît comme un problème.

Cycle du Carbone pour un Parisien (en kgC/an/hab)



2. COMPARAISON AVEC UN PROJET ÉCOLOGIQUE À SNEEK AUX PAYS-BAS

2.1. Présentation du projet Waterschoon

a) Contexte

Noorderhoek, est un quartier de Sneek, ville au Nord des Pays-Bas. Certaines maisons étaient dans un mauvais état et plutôt inadaptées aux personnes âgées. Ainsi, un projet de quartier écologique a été mené par STOWA¹¹ et Desah, une entreprise néerlandaise spécialiste de l'innovation écologique, dans le but d'équiper des nouveaux bâtiments avec un système d'assainissement autonome.

Actuellement, le projet pilote concerne 62 logements, tous reliés à ce nouveau système d'assainissement décentralisé. Le but est de déployer sur une période d'environ dix ans la construction de 232 logements dans Noorderhoek, en démolissant 282 maisons au total. Ainsi 79 personnes vivent en ce moment dans ces nouvelles habitations (il y a notamment une maison de retraite avec des petits appartements individuels).



Toutes ces futures habitations seront reliées au nouveau système d'assainissement qui recycle certains éléments, comme le phosphore sous forme de struvite¹², et produit de la chaleur à partir des eaux grises et noires. Ainsi des toilettes à chasse sous vide et des broyeurs de cuisine pour les déchets organiques ont été ou seront placés dans les logements. Les eaux usées et les déchets organiques sont déchargés dans le réseau de traitement pour eaux noires tandis que les eaux grises (eaux usées domestiques) sont traitées à part.

En résumé, le système d'assainissement novateur Clean Water est composé des éléments suivants:

- La purge complète des eaux noires et des eaux grises par des circuits séparés ;
- Le traitement des déchets organiques ;
- La production de biogaz à partir des eaux noires et des déchets organiques ;
- La récupération de la chaleur des eaux grises ;
- L'utilisation de l'énergie libérée sous forme de chaleur dans les maisons ;
- La production d'un type d'engrais (struvite).

¹¹ Fondation néerlandaise de recherche appliquée sur l'eau.

¹² La struvite est un minéral phosphaté. Or le phosphore est plus facile à récupérer dans les stations d'épuration sous cette forme. La struvite peut ensuite servir d'engrais et de fertilisant.

b) Fonctionnement du site

Comme nous pouvons l'observer sur les schémas ci-dessous, le système d'assainissement est composé de deux circuits séparés, au départ du moins. Les eaux noires¹³, ici issues des toilettes et des déchets organiques broyés de l'évier, sont évacuées via un système sous vide, puis traitées dans deux réacteurs différents, le réacteur UASB puis le réacteur OLAND, avant que le phosphore, mais aussi une petite partie de l'azote et de la matière organique, soient précipités sous forme de struvite. L'eau « nettoyée » rejoint alors le système de traitement des eaux grises¹⁴, plus simples car les eaux y ont des concentrations plus faibles en matière organique, phosphore et azote.

Le système de traitement des eaux noires, grâce au réacteur UASB, produit également du biogaz utilisé pour chauffer les logements. De même, la chaleur issue des eaux grises est réutilisée dans les réseaux de chauffage. Afin d'explicitier le système, nous présentons deux schémas issus du rapport d'étude de STOWA et Desah sur Waterschoon :

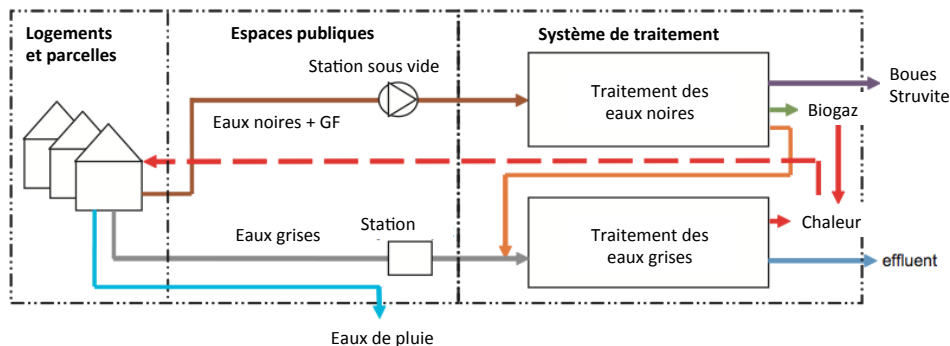


Schéma de fonctionnement du système d'assainissement de Waterschoon

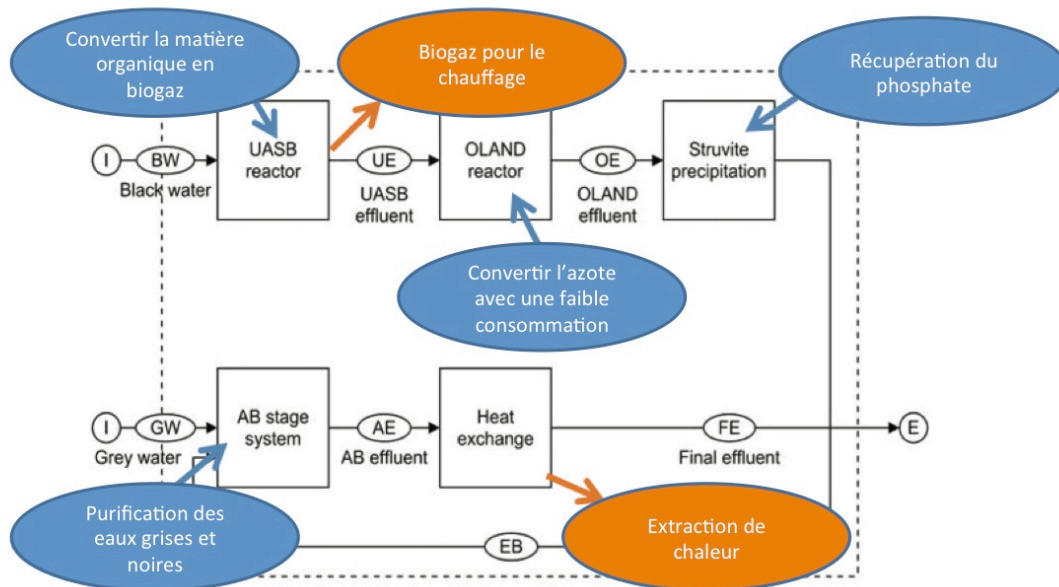
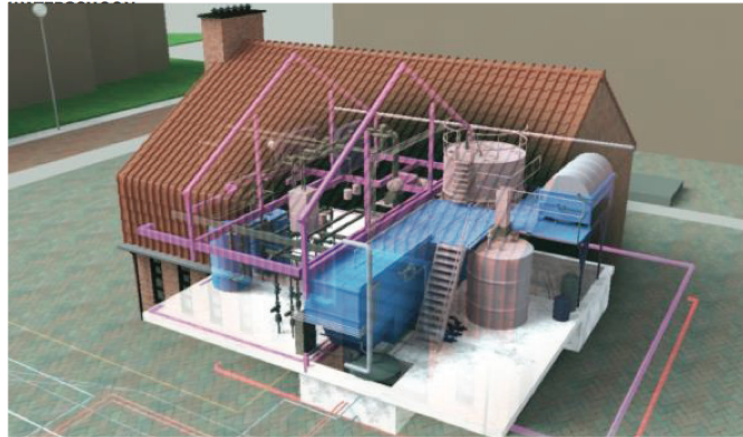


Schéma présentant les rôles de chacun des réacteurs et opérateurs du système d'assainissement

¹³ Les eaux noires sont les eaux usées issues des toilettes et dans le cas de Waterschoon également issues des broyeurs d'éviers.

¹⁴ On parle d'eaux grises pour les autres eaux usées de la maison, souvent moins polluées, par exemple des eaux résultant du lavage de la vaisselle, des mains, des bains ou des douches.

L'ensemble du système d'assainissement est placé dans un bâtiment de la taille d'une petite maison, comme nous pouvons le voir sur la photo. Actuellement le système gère donc l'assainissement de 79 personnes. Cependant, il a été conçu pour être pleinement efficace et rentable à 1200 personnes.



Cette petite station d'épuration est ainsi placée au sein même du quartier de Noorderhoek mais nous avons pu constater que cela ne présentait aucune gêne sonore, visuelle ou olfactive pour les habitants. Au contraire, comme il y avait un panneau expliquant le fonctionnement du système d'assainissement devant le bâtiment, cette proximité avec les habitants est probablement un bon moyen de les sensibiliser aux gestions alternatives et écologiques des eaux usées.



Fonctionnement du réacteur UASB

La digestion anaérobique¹⁵ est un processus biologique au cours duquel, dans des conditions anaérobiques, la matière organique est convertie en biogaz, qui est de 60 à 70 % du méthane CH_4 . Or les eaux noires contiennent de l'azote et du phosphore en plus des composés organiques. Ceux-ci sont alors convertis en phosphate et en ammonium dissous. Une partie de ceci précipite avec le calcium, le magnésium et le fer rajoutés. L'efficacité du processus de fermentation est en partie liée au temps, à la température, à l'acidité et aux concentrations et la composition des eaux noires. Par exemple, à basse température le processus est plus lent et si de plus grands réacteurs sont utilisés, le temps de fermentation doit également être allongé.

Fonctionnement du réacteur OLAND

L'azote est éliminé par le processus OLAND, à base de disques biologiques. Ce processus biologique enlève des concentrations élevées d'ammonium dans des flux avec des faibles concentrations de matière organique. Une combinaison de bactéries aérobies¹⁶ et anaérobies permet de convertir le nitrate d'ammonium (ou ammonitrate), engrais azoté, en azote gazeux inoffensif (N_2), directement évacué dans l'air.



¹⁵ On appelle milieu anaérobie un milieu où il n'y a pas présence de dioxygène (O_2) et d'autres oxydants.

¹⁶ Le terme aérobie s'applique à un organisme vivant qui a besoin de dioxygène pour vivre ou fonctionner.



Fonctionnement du réacteur à struvite

En ajoutant du sel de magnésium est créée de la struvite (composé de magnésium, d'ammonium et de phosphate), qui précipite sous la forme de cristaux. Il est également possible de prendre du potassium, ce qui donne un engrais tout aussi approprié.

Purification des eaux grises

Les eaux grises (et le reste des eaux noires) sont purifiées en deux étapes grâce à un procédé biologique aérobie. La première étape, d'une forme colloïdale, piège les matières dissoutes et flottantes et donne une boue à floccs. La deuxième étape, grâce à l'ajout de dioxygène, capture la matière organique résiduelle et l'ammonium pour le transformer en nitrates principalement.



2.2. Comparaison des cycles carbone, azote et phosphore entre Paris et Waterschoon

a) Les différences entre les systèmes d'assainissement

Paramètres	Unités	Waterschoon (79)	Waterschoon (1200)	Région parisienne
<i>En entrée</i>				
DCO	kg/an/hab	63,8	63,8	45,7
Ntot	kg/an/hab	5,6	5,6	4,9
Ptot	kg/an/hab	0,91	0,92	0,55
<i>En sortie dans l'eau</i>				
DCO	kg/an/hab	1,8	1,8	5,4
Ntot	kg/an/hab	0,22	0,22	1,9
Ptot	kg/an/hab	0,44	0,04	0,1
<i>Capacité épuratoire</i>				
DCO	%	97,2	97,2	88,2
Ntot	%	96,1	96,1	61,2
Ptot	%	51,6	95,7	81,8
<i>En sortie (boues et struvite)</i>				
P présent dans la struvite	kg/an/hab	0,47	0,88	0,45
Quantité de boues (matière brute)	kg/an/hab	4,2	9,2	14,2

Tableau 3 : Comparaison entre les systèmes d'assainissement de Waterschoon et du SIAAP pour le carbone, l'azote, le phosphore et la production de biogaz

Les données sur le système d'assainissement de Waterschoon ont été relevées par STOWA et nous les avons donc comparées avec les chiffres du SIAAP en région parisienne. Le quartier de Noorderhoek est pour l'instant habité par 79 personnes. Le projet a vocation à accueillir plusieurs centaines d'habitants (232 logements). Cependant l'entreprise Desah avait conçu le système d'assainissement pour fonctionner à une plus grande échelle. Ils estiment ainsi qu'il serait optimisé pour 1200 personnes. Le bilan de l'opération présente donc à la fois les chiffres actuels (le système fonctionne en sous-régime et n'est pas aussi efficace) et les chiffres optimaux (optimisations détaillées plus bas) que Desah pense pouvoir atteindre.

Ainsi, nous remarquons, en ramenant au nombre d'habitants, nous obtenons des chiffres assez différents en entrée entre Waterschoon et la région parisienne. Dans l'ensemble, les quantités sont plus élevées. Ceci est probablement dû à des questions d'échelle et à des différences culturelles. En effet, la quantité de phosphore par habitant en entrée de système est près de deux fois plus élevée à Waterschoon qu'en région parisienne. Ceci est probablement dû à l'utilisation de produits lessiviels phosphorés aux Pays-Bas, plus importante qu'en France, bien que soumise à une législation. De plus, il est possible que la consommation puis l'utilisation de l'eau ne soit pas tout à fait la même à Sneek qu'en région parisienne. Nous savons par exemple que les habitations sont équipées à Waterschoon de broyeurs dans l'évier.

Ainsi le système d'assainissement gère une plus grande quantité de matière organique, d'azote et de phosphore, présents dans les aliments.

Concernant l'efficacité des deux systèmes d'assainissement, nous remarquons qu'elle est particulièrement bonne pour le carbone et l'azote : respectivement 2,8% et 3,9% seulement sont rejetés dans le milieu naturel à Waterschoon (techniquement ces rejets se font dans le réseau d'assainissement de Sneek) contre 11,9% et 38,8% en région parisienne. Cette différence est conséquente et est déjà réalisée à Waterschoon (le nombre d'habitants ne joue pas sur l'efficacité du traitement du carbone et de l'azote). En revanche, le phosphore est actuellement peu traité puisque 48,4% du phosphore entrant dans la station d'épuration de Waterschoon n'est pas traité, contre 18,2% en région parisienne. À fonctionnement optimal, la station de Waterschoon devrait atteindre un traitement à 95,6%. Ces 95,6%, et actuellement 51,6%, se retrouvent intégralement dans la struvite.

60 à 70% du carbone présent dans les eaux noires est converti en biogaz, essentiellement du méthane, afin d'être consommé. Le reste se retrouve dans la struvite et les boues. Le phosphore traité se retrouve presque intégralement dans la struvite. Quant à l'azote, à part une petite partie que nous retrouvons dans la struvite et les boues, il est évacué sous forme de gaz N_2 . Ainsi, cela explique que la quantité de boues et de struvite soit plus faible à Waterschoon qu'en région parisienne où les boues sont constituées majoritairement de matières organiques (il y a dix fois plus de carbone que de phosphore dans les boues du SIAAP). La quantité de phosphore dans la struvite est pour l'instant similaire à ce que nous retrouvons dans les boues du SIAAP mais si la station de Waterschoon fonctionnait de façon optimale, il y en aurait deux fois plus, ce qui augmenterait aussi la quantité de struvite. Sachant que la struvite est ensuite utilisée intégralement comme engrais, alors que seulement 50% des boues du SIAAP sont épandues ou compostées, le bilan est positif pour le phosphore.

b) Comparaison des dépenses énergétiques

Énergie consommée (kWh/an/hab)	Waterschoon (79)	Waterschoon (1200)	Région parisienne
Production de biogaz	133	148	53
Électricité utilisée	781 (primaire)	52 (primaire)	56 (finale)
Fioul	0	0	2
Gaz naturel	0	0	9

Tableau 4 : Comparaison de l'énergie dépensée par les stations d'épuration du SIAAP et celle de Waterschoon

La production de biogaz est près trois fois supérieure dans la station d'épuration de Waterschoon que dans celles du SIAAP en région parisienne. Cela montre que nous pourrions utiliser beaucoup plus de carbone présent dans les eaux usées pour produire de l'énergie.

En revanche, la consommation en électricité est aujourd'hui très importante à Waterschoon. Avec une charge de 79 personnes, celle ci est plus de dix fois supérieure à celle de la situation optimale. Cette forte consommation d'électricité se fait pour le traitement de l'eau (781 kWh/an/hab). Elle est en grande partie due à la charge inférieure sur le système. Ainsi, la dépense électrique, à peu près constante pour faire fonctionner la station, est ramenée à moins de personnes que dans le cas optimal.

D'autre part, dans le cas de l'agglomération parisienne, la dépense énergétique se décompose en électricité, fioul et gaz naturel. Au total, cela représente 67 kWh/an/hab, c'est-à-dire dix fois plus faible que la dépense énergétique de Waterschoon actuellement mais 22% plus importante que celle de Waterschoon dans le cas optimal.

Nous présentons ensuite les différents postes de dépenses et recettes énergétiques du système de Waterschoon, comparé à celui d'un cas optimal et au cas de référence, qui correspond à une station d'une taille à peu près équivalente mais fonctionnant de façon classique aux Pays-Bas.

Dépenses énergétiques (kWh/an/hab)	Waterschoon (79)	Waterschoon (1200)	Référence
Pompage eau potable	-35	-35	-58
Chauffage de l'eau pour le traitement	-277	-50	-6
Diésel	0	0	-3
Production de chaleur	477	477	0
Electricité pour la production de chaleur	-264	-264	0
Production de biogaz	133	148	6
Électricité utilisée	-781	-52	-75
Production d'électricité	0	0	61
Transport des eaux usées	-92	-40	-13
Énergie totale primaire	-838	184	-88

Tableau 5 : Comparaison des dépenses et recettes énergétiques entre Waterschoon actuel, Waterschoon optimisé et la situation de référence aux Pays-Bas

Nous voyons ainsi que la performance énergétique du système actuel pourrait être considérablement améliorée. Premièrement, comme nous l'avons expliqué précédemment, il est possible de réduire la consommation d'électricité du système de traitement en le mettant en œuvre pour plus d'habitants. Cela devrait donc être atteint, parallèlement à l'utilisation d'un meilleur contrôle d'après Desah.

Deuxièmement, le système d'énergie peut être encore optimisée afin de mieux faire face à la chaleur produite. Ainsi une meilleure isolation des réacteurs chauds et une meilleure récupération de la chaleur efficace dans le processus sont actuellement étudiées. En troisième lieu, l'énergie de l'évacuation des eaux usées sous vide doit encore être optimisée.

Pour l'instant, la station d'épuration de Waterschoon est largement déficitaire, surtout à cause de la dépense en électricité. Mais même en tournant à 1200 personnes, l'énergie totale primaire resterait négative (-57 kWh/an/hab), quoique légèrement meilleure que dans le cas de référence. Desah table donc sur une meilleure gestion du système de production de chaleur pour diminuer la dépense pour le chauffage de l'eau, sur une production de biogaz un peu supérieure et sur une division par deux de l'énergie utilisée pour faire fonctionner le transport des eaux usées. Ainsi, dans les conditions de pleine charge du système, c'est-à-dire à 1200 personnes, en capitalisant sur toutes les optimisations ci-dessus, le système de Waterschoon est susceptible d'entraîner un rendement énergétique net de 184 kWh/an/hab.

Mais grâce à de nouvelles situations, Desah considère que de nouvelles optimisations peuvent encore être trouvées. Le biogaz pourrait par exemple être utilisé comme gaz de cuisson tandis

que la chaleur de l'eau grise pourrait être utilisée pour le chauffage du système de traitement. En effet, la pompe à chaleur demande 264 kWh/an/hab pour fonctionner mais la récupération de la chaleur des eaux grises offre près de 477 kWh/an/hab.

Actuellement, Desah ne sait pas réellement utiliser cette chaleur disponible puisqu'elle doit être redistribuée dans les habitations voisines avant de refroidir ou être consommée sur place par la station d'épuration. De plus, les habitants de Noorderhoek n'ont pas besoin de chaleur toute l'année et à tout moment. Ce bilan est donc à considérer avec attention car même si dans le cas optimal la station d'épuration de Waterschoon semble bénéficiaire, l'utilisation de la chaleur n'est pas encore tout à fait au point.

CONCLUSION

Dresser les schémas des cycles du phosphore, de l'azote et du carbone en ville ne s'est pas révélé aisé parce qu'il était parfois difficile de trouver des chiffres cohérents. Certaines études divergeaient, d'autant plus que d'un pays à l'autre, ce ne sont pas les mêmes façons de gérer l'assainissement. Ainsi ces schémas ont vocation à évoluer et à devenir encore plus précis. Afin de parvenir à des cycles complets nous avons fait des approximations et avons volontairement choisi de ne pas creuser démesurément certains points pour l'instant. Mais les résultats obtenus nous ont permis de mieux visualiser ces cycles et les façons de les optimiser, mettant notamment en avant les étapes qui gagneraient à évoluer.

Nous avons ainsi remarqué pour les cycles du phosphore et de l'azote (et c'est certainement aussi le cas pour celui du carbone), qu'il y avait de grandes pertes au niveau des champs et des élevages. Une très grande partie des nutriments partent dans les milieux aquatiques ou sont stockés dans les sols. Cette problématique n'est pas évidente à résoudre mais il existe déjà de nombreuses initiatives sur la sauvegarde de la qualité des sols, afin notamment d'éviter les lessivages. D'autre part, les agro-industries et notre façon de consommer sont à l'origine de beaucoup de déchets. Or ceux-ci sont encore trop peu valorisés alors qu'ils sont pour la plupart riches en nutriments. Concernant le système d'assainissement de région parisienne, le mélange et la dilution de toutes les eaux usées ne permettent pas une valorisation facile du carbone, de l'azote et du phosphore. De plus, il est très consommateur en énergie. Enfin, la valorisation des boues de station d'épuration est déjà mise en œuvre en France mais elle gagnerait à être intensifiée pour notamment éviter de perdre du phosphore dans les cendres d'incinération.

La comparaison avec un système d'assainissement autonome et écologiquement responsable aux Pays-Bas nous a permis de mieux évaluer les impacts et les limites d'un tel changement. Ainsi, la solution Waterschoon ne se révèle pas encore vraiment performante. Si elle l'est à peu près d'un point de vue environnemental, elle n'est pas encore énergétiquement au point. Or une solution responsable doit permettre de concilier les impératifs environnementaux mais aussi énergétiques et financiers. Bien entendu le quartier de Noorderhoek n'est qu'un prototype. Mais il nous a permis d'identifier quelques problématiques concrètes de mise en place de solutions.

BIBLIOGRAPHIE

E. Adler, *Assainir en circuit court : utopie ou réalité ?* Environnement & Technique, 2008

D. Alba, *Du réseau d'eau non potable à l'optimisation de la ressource en eau*, Atelier parisien d'urbanisme, 2014

P. Allain, *Les médicaments*, 2008

R. Arno, *Peak phosphorus and the eutrophication of surface waters : a symptom of disconnected agricultural and sanitation policies*, EcoSanRes Programme Stockholm Environment Institute, 2011

R. Arno, *Phosphorus cycle and sanitation: Possible ecosan applications in Ile- de-France*, Stockholm Environment Institute, ASTEE Seminar, 2014

S. Barles, *Urban metabolism of Paris and its region*, Laboratoire Théorie des Mutations Urbaines, Yale University 2009

G. Billen, M. Silvestre, S. Barles, JM. Mouchet, J. Garnier, F. Curie, P. Boët, *Le Bassin de la Seine, découvrir les fonctions et les services rendus par le Système Seine*, Agence de l'eau Seine-Normandie, 2009

G. Billen, J. Garnier, *Eutrophisation des cours d'eau du bassin de la Seine, comprendre comment l'activité de l'homme entraîne la prolifération des végétaux aquatiques*, Agence de l'eau Seine-Normandie, 2009

G. Billen, J. Garnier, V. Thieu, P. Passy, P. Rioussel, M. Silvestre, S. Théry, G. Vilain, C. Billy, *La cascade de l'azote dans le bassin de la Seine, comprendre les processus pour inverser les tendances*, Agence de l'eau Seine-Normandie, 2011

MA. Bourdain, M. Valé, *Valeur Fertilisante Phosphatée de produits organiques*, SAS-Laboratoire, 2010

Degrémont, SUEZ Environnement, *Memento des techniques de l'eau*, 2005

P. Forster, V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007

R. de Graaf, A.J. van Hell, *Nieuwe Sanitatie Noorderhoek, Sneek, Deelonderzoeken*, STOWA, 2014

JP. Kradolfer, M. Deront et N. Adler, *Méthodes analytiques pour influents / effluents de bioréacteurs ou de stations d'épuration*, laboratoire de biotechnologie environnementale de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2013

L. Lafay, J.L. Volatier et al., *Étude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires 2 (INCA 2) (2006-2007)*, Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA), 2009

T. Larsen, W. Gujer, *Separate management of anthropogenic nutrient solutions (human urine)*, *Water Science and Technology* 34(3-4): 87-94, 1996

Magid, J., A.M. Eilersen, S. Wrisberg, et M. Henze, *Possibilities and Barriers for Recirculation of Nutrients and Organic Matter from Urban to Rural Areas: A Technical Theoretical Framework Applied to the Medium-Sized Town Hillerød, Denmark*, *Ecological Engineering* 28, no 1, 2006

I. Savini, A. Tibi, *Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier, Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques, Synthèse du rapport d'expertise*, INRA, DEPE, 2014

SIAAP Direction Santé et Environnement, *Note sur les capacités épuratoires du SIAAP*, 2009

SIAAP, *Historique des flux de pollution reçus par le SIAAP, Rapport de synthèse*, Service Études et Méthodes de la DDP et DES, 2009

SIAAP, *Bilan de la campagne d'épandage 2012 des boues de Seine Aval*, 2013

K. Senthilkumar, A. Mollier, M. Delmas, T. Nesme, *Conceptual design and quantification of phosphorus flows and balances at the country scale: The case of France*, 2012

K. Senthilkumar, A. Mollier, M. Delmas, S. Pellerin, T. Nesme, *Phosphorus recovery and recycling from waste: An appraisal based on a French case study*, 2014

JP. Tabuchi, *L'assainissement de l'agglomération parisienne*, Agence de l'eau Seine-Normandie, 2008

Vaclav Smil, *Enriching the Earth : Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*, 2001

R. Villarroel Walker, M.B. Beck, J.W. Hall, R.J. Dawson, O. Heidrich, *The energy-water-food nexus: Strategic analysis of technologies for transforming the urban metabolism*, 2014