

Rapport de stage

Pour le diplôme d'ingénieur de l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris

Année 2025-2026

Transition vers l'assainissement circulaire : Modélisation et pertinence spatiale des hubs de collecte d'urine en Suède

**Évaluation quantitative des gisements territoriaux et développement d'une
méthodologie globale de planification de la séparation à la source**

BONDKOWSKI-MALET Steven

IVP65

Février 2026 - Juillet 2026

Sous la direction de :

Simha Prithvi, Maître de stage

Chabernaud Quentin, Tuteur EIVP

Notice bibliographique

AUTEUR du mémoire	
NOM	BONDKOWSKI-MALET
Prénom	STEVEN
ORGANISME de stage	
NOM organisme	Université suédoise des sciences agricoles (SLU)
NOM, Prénom du maître de stage	SIMHA, Prithvi
NOM, Prénom du tuteur EIVP	CHABERNAUD, Quentin
ANALYSE	
TITRE du mémoire	Transition vers l'assainissement circulaire : Modélisation et pertinence spatiale des hubs de collecte d'urine en Suède
TITLE	Transition towards circular sanitation: Modeling and spatial relevance of urine collection hubs in Sweden
RÉSUMÉ (15 à 20 lignes)	Face aux impasses écologiques et infrastructurelles du modèle d'assainissement centralisé traditionnel (« tout-à-l'égout »), la transition vers un assainissement circulaire deviendrait une solution du génie urbain à investiguer. Ce système actuel, coûteux en énergie et destructeur de nutriments, pourrait trouver une alternative dans la séparation de l'urine à la source. Cependant, le déploiement diffus d'une telle infrastructure pose des défis logistiques. Ce rapport de fin d'études évalue la pertinence de cette transition à travers une approche territorialisée, en utilisant la Suède comme territoire d'étude. Une base de données a été constituée pour modéliser le potentiel de collecte urinaire selon trois axes : les évènements en plein air, les grandes arénas sportives/culturelles, et la croissance démographique projetée jusqu'en 2050. La spatialisation de ces données via un Système d'Information Géographique (SIG) démontre que la ressource n'est pas diffuse, mais concentrée au sein de « Macro-Hubs » urbains. L'identification de ces gisements massifs (volumes et masses de nutriments N-P-K) valide techniquement et logistiquement la pertinence de la collecte à la source. Aussi, la viabilité de l'assainissement circulaire repose sur un ciblage spatial stratégique, intégrant la collecte des flux métaboliques dès la planification des futurs aménagements urbains, en mettant en place une hybridation des réseaux, liant ainsi la praticité du « tout-à-l'égout » avec les bénéfices de la collecte d'urine.

ABSTRACT	Faced with the ecological and infrastructural dead ends of the traditional centralized sanitation model, the transition toward circular sanitation is emerging as an urban engineering solution worth investigating. This current system, energy-intensive and destructive to nutrients, could find an alternative in source-separated urine. However, the diffuse deployment of such an infrastructure poses logistical challenges. This document evaluates the relevance of this transition through a territorialized approach, using Sweden as a case study. A database was compiled to model urine collection potential across three areas : outdoor events, large sports/cultural arenas, and projected population growth up to 2050. The spatialization of these data via a Geographic Information System (GIS) demonstrates that the resource is not diffuse, but rather concentrated within urban « Macro-Hubs. » Identifying these massive deposits (in terms of urine volumes and N-P-K mass) technically and logistically validates the relevance of source separation. Furthermore, the viability of circular sanitation relies on strategic spatial targeting, integrating the collection of metabolic flows into the planning of future urban developments by establishing network hybridization, thus linking the convenience of the traditional sewer system with the benefits of urine collection.		
Mots-clés du thésaurus Archirès	Assainissement urbain, Économie circulaire, Ingénierie urbaine, Système d'information géographique (SIG), Gestion des déchets, Planification urbaine.		
Keyword thesaurus (anglais, 8 maxi)	Urban sanitation, Circular economy, Urban engineering, Geographic Information System (GIS), Waste management, Urban planning.		
Références			
	Nb de pages du mémoire	Annexes (nombre de p.)	Bibliogr. : nb de références
	40	11 (24 p.)	31

Remerciements

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements à mon maître de stage, Prithvi SIMHA, pour sa confiance, son encadrement et le temps qu'il m'a accordé tout au long de ce projet au sein de l'Université Suédoise des Sciences Agricoles (SLU), ainsi que pour l'opportunité d'être associé au projet de publication scientifique qui découlera de ces travaux.

Mes remerciements s'adressent également à Quentin CHABERNAUD, mon tuteur à l'École des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP), pour ses conseils, son encadrement mesuré, et sa capacité à m'accompagner dans mes réflexions sans formuler de réponse définitive.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude envers l'ensemble du groupe de chercheurs de SLU que j'ai pu côtoyer, pour leur accueil et pour m'avoir permis de réaliser ce projet qui s'est avéré passionnant à mes yeux.

Table des matières

Remerciements	1
Liste des illustrations.....	3
Liste des tableaux	3
Liste des équations	4
Glossaire.....	5
Introduction	6
SLU	9
1. L'assainissement séparatif, une réponse stratégique aux vulnérabilités du modèle traditionnel.....	10
1.1. Les impasses écologiques et infrastructurelles du « tout-à-l'égout ».....	10
1.2. La séparation à la source : changer de paradigme	12
1.3. La nécessité d'une approche territorialisée et stratégique	15
2. Modélisation et quantification : Création d'un outil d'aide à la décision	16
2.1. Sourcing et structuration de la donnée : L'étude de cas suédoise	17
2.2. Les trois axes de la modélisation stratégique.....	19
2.3. De la base de données à la cartographie	23
3. Analyse des gisements : La pertinence validée par les « hubs » urbains	24
3.1. Concentration événementielle et opportunités immédiates	24
3.2. Anticiper la ville de demain : La pertinence démographique	27
3.3. Synthèse : Caractérisation des Macro-Hubs	28
4. Perspectives et implications pour l'ingénierie urbaine de demain.....	30
4.1. Repenser la planification urbaine à travers la collecte ciblée	31
4.2. Viabilité de la filière et défis de structuration technologique	32
4.3. Bilan critique du modèle et reproductibilité	37
Conclusion.....	40
Bibliographie	41

Annexes

Annexe 1 : Quantité d'azote selon le sol et les plantations Stockholm	44
Annexe 2 : Quantité d'azote selon le sol et les plantations Göteborg	45
Annexe 3 : Quantité d'azote selon le sol et les plantations Malmö	46
Annexe 4 : Quantité d'azote selon le sol et les plantations Uppsala	47
Annexe 5 : Potentiel de fertilisation en 2050	48
Annexe 6 : CAPEX/OPEX du système hybride.....	49
Annexe 7 : Volumes d'urine annuels	51
Annexe 8 : Nombre d'événements annuels	56
Annexe 9 : Nombre de personnes recensées.....	58

Annexe 10 : Masse de nutriments N-P-K	60
Annexe 11 : Macro-Hubs	66

Liste des illustrations

Figure 1 : Répartition des eaux usées (Source : Adapté de « Separate management of anthropogenic nutrient flows (NoMix) », par T. A. Larsen et W. Gujer, 1996, <i>Water Science and Technology</i> . [1])	11
Figure 2 : Fonctionnement UDFT (Source : Eawag [10])	14
Figure 3 : Modèle développé (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)	16
Figure 4 : Nombre de personnes dans les événements extérieurs (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026).....	25
Figure 5 : Répartition des volumes (m ³) issus d'événements en extérieur (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)	25
Figure 6 : Volumes des grandes villes suédoises (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)	26
Figure 7 : Volume d'urine et masse d'azote par commune en 2050 comparé à 2026 en sommant les événements extérieurs, les stades et la croissance de la population (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026).....	28
Figure 8 : Volumes d'urine de la commune de Stockholm en 2030 comparé à 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)	30
Figure 9 : Schéma hybridation des réseaux d'assainissement (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)	32
Figure 10 : Comparaison des systèmes d'assainissement (Source : Adapté de « Evaluation of new alternatives in wastewater treatment plants based on dynamic modelling and life cycle assessment (DM-LCA) », par Bisinella de Faria, A. B., Spérandio, M., Ahmadi, A., & Tiruta-Barna, L. (2015). <i>Water Research</i> , [21]).....	33
Figure 11 : terres végétales dans Stockholm (Source : carte adaptée des données cadastrales de l'Agence suédoise de protection de l'environnement [26]).....	36

Liste des tableaux

Tableau 1 : Gain environnemental (Source : Adapté de « Nitrogen recovery from wastewater: Possibilities, competition with other resources, and adaptation pathways », par Beckinghausen, A., Odlare, M., Thorin, E., & Schwede, S. (2018). <i>Sustainability</i> . [2]).....	13
Tableau 2 : Variables de modélisation événements et stades (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)	18
Tableau 3 : Variables de modélisation projections démographiques communales (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)	19
Tableau 4 : Potentiel de collecte (scénario normal) d'ici à 2050 (Source : S. Bondkowski-malet, SLU 2026)	29

Liste des équations

Équation 1 : Volume annuel d'un évènement extérieur.	20
Équation 2 : Volume annuel d'une infrastructure fixe.	20
Équation 3 : Volume annuel des évènements culturels dans une infrastructure fixe.	21
Équation 4 : Volume annuel des évènements sportifs dans une infrastructure fixe.	21
Équation 5 : Volume annuel net d'une année comparée à une autre dans les bâtiments neufs d'une commune.	22
Équation 6 : Volume annuel d'une année dans les bâtiments neufs d'une commune.	22
Équation 7 : Volume annuel individuel des jours travaillés.	22
Équation 8 : Volume annuel individuel des jours non travaillés.	22

Glossaire

Génie urbain : Ingénierie transversale dédiée à la conception, l'aménagement et la gestion globale des infrastructures et réseaux de la ville (eau, assainissement, déchets, énergie, transports) dans le but d'optimiser le fonctionnement et la résilience des territoires.

Assainissement circulaire (ou séparatif) : Modèle de gestion des eaux usées consistant à séparer les différents flux à la source (urine, fèces, eaux grises) afin d'en faciliter le traitement spécifique et de valoriser les nutriments sous forme de ressources (ex: engrais).

CAPEX / OPEX : *Capital Expenditure* (Dépenses d'investissement, ex: construction d'un réseau) / *Operational Expenditure* (Dépenses d'exploitation, ex: énergie de pompage, maintenance).

Eutrophisation : Processus de dégradation des milieux aquatiques provoqué par un apport excessif en nutriments (notamment azote et phosphore), entraînant une prolifération d'algues et l'asphyxie de l'écosystème.

Hub (Macro-Hub) : Dans le cadre de cette étude, point de concentration géographique (stade, quartier dense, festival) où les volumes d'urine produits sont suffisamment massifs pour justifier la rentabilité logistique d'une collecte ciblée.

N-P-K : Acronyme désignant les trois éléments nutritifs majeurs en agronomie : Azote (N), Phosphore (P) et Potassium (K).

NoMix (Toilettes) : Typologie de toilettes conçues pour séparer mécaniquement l'urine des fèces dès la cuvette, sans nécessiter l'intervention de l'utilisateur.

SIG (Système d'Information Géographique) : Outil informatique permettant de stocker, d'analyser et de représenter des données spatialisées et géographiques.

STEP : Station d'Épuration des Eaux Usées. Infrastructure où les effluents urbains sont traités avant d'être rejetés dans le milieu naturel.

Introduction

L'assainissement urbain, tel qu'il a été conçu et mis en place au cours du XIX^e siècle, repose sur un modèle simple, facilitant au mieux les usages des citoyens, mais vulnérable face à l'expansion croissante des métropoles. Ce système, communément appelé « tout-à-l'égout », a pour particularité de centraliser les eaux usées afin d'en faciliter le transport. Historiquement, ce système linéaire d'évacuation par dilution (chasse d'eau évacuatrice) a constitué une avancée sanitaire, mettant fin aux eaux usées jetées par-dessus les fenêtres et éradiquant par la même occasion les grandes épidémies dans les métropoles occidentales. Il a ainsi ancré dans l'inconscient collectif et dans les pratiques de l'ingénierie civile la culture de la chasse d'eau. Les eaux usées ne sont plus une préoccupation pour le particulier tant cette technologie s'est érigée en besoin vital (accès à l'eau potable et aux sanitaires). Cependant, ce paradigme, qui consiste à utiliser de vastes quantités d'eau potable traitée pour transporter nos excréments hors de la ville, se heurte aujourd'hui aux limites physiques, énergétiques et écologiques dues à l'exode rural et l'accroissement de l'urbanisation.

D'une part, du point de vue des infrastructures, les stations d'épuration (STEP) font face à un mur capacitaire en matière de traitement. L'étalement urbain, la densification des centres-villes et l'imperméabilisation des sols soumettent ces installations à une saturation croissante. Pour éviter l'eutrophisation des milieux aquatiques (enrichissement en azote et en phosphore), qui favorise grandement le développement d'algues menant à la baisse de l'oxygénation de l'eau, les STEP doivent intégrer des processus toujours plus sophistiqués et énergivores pour traiter les eaux usées. L'abattement de la charge en azote, par exemple, nécessite une aération mécanique intensive des bassins biologiques, tandis que l'élimination du phosphore requiert l'injection de réactifs chimiques (sels de fer ou d'aluminium). Les stations d'épuration modernes sont ainsi devenues des usines de destruction de matière, consommant une énergie considérable pour dissiper des molécules qui ont été préalablement diluées dans de l'eau potable.

D'autre part, cette approche révèle un non-sens agronomique : elle traite comme un déchet toxique ce qui constitue, en réalité, une ressource pour l'agriculture. L'eutrophisation des rivières en est le meilleur exemple ; l'azote favorise le développement des algues. L'urine humaine, bien qu'elle ne représente qu'environ 1 % du volume total des eaux usées domestiques, contient à elle seule l'essentiel du pouvoir fertilisant de nos rejets : près de 80 % de l'azote (N), 50 % du phosphore (P) et plus de 60 % du potassium (K). [1] Actuellement, ce gisement naturel est systématiquement détruit ou perdu dans les boues d'épuration, pour éviter justement un impact trop marqué sur les écosystèmes. Dans le même temps, paradoxalement, l'agriculture mondiale dépend largement d'engrais pétrochimiques de synthèse pour garantir ses rendements. Or, la production de ces fertilisants est particulièrement difficile à long terme : la synthèse de l'azote (procédé Haber-Bosch) est extrêmement coûteuse en énergie fossile et fortement émettrice de gaz à effet de serre, tandis que l'approvisionnement en phosphore repose sur l'extraction de gisements miniers géopolitiquement concentrés [3], ce qui questionne la souveraineté de tout pays importateur. Sur le long terme, la production est vouée à une baisse drastique autant inéluctable que nécessaire.

Qui plus est, face au stress hydrique grandissant, accentué chaque année par le dérèglement climatique, la conceptualisation même des systèmes de traitement semble à revoir. Aussi, le concept de « ville circulaire » paraît s'imposer non plus comme une utopie souhaitable, mais comme un prérequis à la résilience des territoires.

C'est dans ce contexte de transition écologique que la séparation et la collecte de l'urine à la source apparaissent comme une alternative prometteuse. En isolant l'urine dès la cuvette ou l'urinoir (technologies *NoMix*), il devient possible de capter les nutriments sous une forme concentrée, réduisant la charge polluante envoyée vers les réseaux et les stations d'épuration, tout en produisant un engrais local et renouvelable. Cependant, si la pertinence théorique, agronomique et environnementale de cette approche est aujourd'hui largement documentée par la communauté scientifique, sa démocratisation se heurte à un défi logistique, réglementaire et urbanistique. Les villes actuelles sont soumises à un fort « verrouillage socio-technique » imposé par des décennies d'investissements dans des canalisations souterraines unitaires. Déployer un réseau séparatif diffus, c'est-à-dire tenter d'équiper chaque logement pavillonnaire ou chaque immeuble ancien, s'avère économiquement exorbitant et techniquement irréaliste à court ou moyen terme. Les coûts liés à la refonte de la plomberie interne des bâtiments et à la logistique de transport de volumes liquides annuleraient rapidement les bénéfices écologiques escomptés, transformant la technologie en un gouffre économique et environnemental.

Ce document propose donc de questionner ce constat d'impossibilité apparente en changeant d'échelle et de méthode. Il s'agit d'adopter une approche territorialisée et ciblée en exploitant la donnée géographique. Le travail présenté s'appuie sur une modélisation spatiale du potentiel de collecte en Suède, tout en développant une méthodologie de collecte et cartographie de la donnée applicable à d'autres territoires. Ce pays a été choisi en raison de la collaboration réalisée avec la startup Sanitation360, basée en Suède et en contact avec des acteurs locaux liés au sujet d'étude. De plus, la Suède, ayant adopté en 2017 un cadre réglementaire visant la neutralité carbone d'ici à 2045, devrait engager de nouvelles approches et méthodes de conception pour pallier ces barrières.

L'objectif central de ces travaux a été d'identifier, d'évaluer quantitativement et de cartographier la ressource urinaire selon trois axes d'opportunité distincts. Ces axes ont été sélectionnés car ils représentent des contextes où la massification de la collecte est envisageable et où les contraintes du génie civil traditionnel peuvent être contournées. Ils s'étendent du gisement le plus éphémère au plus pérenne :

- **Les événements en extérieur (festivals, grands rassemblements) :** qui nécessitent déjà des infrastructures sanitaires temporaires et offrent un terrain d'application immédiat, sans modification des réseaux fixes, en intégrant des prototypes de toilettes mobiles collectant l'urine.
- **Les grands stades et infrastructures sportives ou culturelles permanents :** qui accueillent des populations massives sur de courtes durées tout au long de l'année, offrant des gisements réguliers, prévisibles et géographiquement fixes, propices à des investissements sûrs.
- **Les futurs développements résidentiels :** justifiés par les projections de croissance démographique modélisées ici entre 2026 et 2050, permettant d'anticiper la conception des futurs éco-quartiers en supposant l'intégration des réseaux séparatifs.

En collectant, structurant et spatialisant cette volumétrie de données via des Systèmes d'Information Géographique (SIG), et plus particulièrement le logiciel ArcGIS Pro, cette étude vise à étayer une hypothèse de départ : l'urine ne serait pas répartie de manière homogène sur le territoire. Au contraire, elle se concentrerait au sein de « Macro-Hubs » urbains et événementiels, qui feraient office de centres de production où la densité humaine créerait des gisements conséquents. Cela rendrait la collecte non seulement viable mais aussi logistiquement pertinente. L'identification, la qualification en nutriments (N, P, K) et la cartographie de ces gisements soulèvent dès lors la réflexion suivante :

Face aux limites physiques et écologiques du modèle d'assainissement traditionnel, quelle est la pertinence d'une transition vers la collecte ciblée de l'urine pour les métropoles de demain ?

Pour répondre à cette interrogation, le présent rapport est structuré en quatre parties, allant du cadre conceptuel à l'application territoriale.

La première partie aura pour objectif de poser un socle théorique permettant de cadrer l'étude. Elle détaillera les impasses infrastructurelles et écologiques du modèle linéaire actuel et justifiera la nécessité d'un changement d'approche vers l'assainissement séparatif. La deuxième partie exposera les processus de recherche de l'information et de structuration des données suédoises. Elle précisera les hypothèses retenues pour la modélisation et détaillera la création des livrables géographiques (SIG). La troisième partie présentera les résultats du traitement des données rassemblées. À travers l'analyse des cartes modélisées sur le territoire suédois, elle détaillera la présence spatiale des « Macro-Hubs », soutenant la pertinence de la collecte. Enfin, la quatrième partie développera l'impact de cette approche sur la planification de la ville de demain, en évaluant la viabilité technico-économique de la filière logistique de traitement in situ et en se fondant notamment sur l'exemple d'Uppsala, pour finalement questionner la reproductibilité de ce modèle de ciblage spatial à l'échelle d'autres territoires.

SLU

Ce travail de fin d'études a été réalisé au sein de l'Université suédoise des sciences agricoles (SLU - Sveriges lantbruksuniversitet) à Uppsala, un institut de recherche en biogéochimie et l'éco-technologie sanitaire. Mes travaux se sont déroulés en partenariat direct avec Sanitation360, une start-up issue de la recherche universitaire de SLU, spécialisée dans le développement et l'industrialisation de procédés de déshydratation alcaline de l'urine in situ.

Cet écosystème d'accueil, combinant la rigueur académique de SLU à la dimension plus concrète de Sanitation360, a donc permis d'évaluer, lors de ces six mois, le gisement potentiel suédois d'urine.

SLU et Sanitation360 s'attachent à concevoir des systèmes complets permettant de déconnecter la gestion des flux anthropiques urbains des infrastructures linéaires traditionnelles, afin de recréer des boucles locales et d'apporter des réponses concrètes aux crises biogéochimiques mondiales. Les travaux relatifs à la valorisation de l'urine ont débuté à la fin des années 90 et se poursuivent encore aujourd'hui.

Intégré au sein de cette structure de recherche et d'innovation, j'ai évolué en autonomie (n'étant pas chimiste), mais surtout sous la supervision de Prithvi Simha, chercheur expert de la thématique. Ma mission consistait à dépasser les évaluations trop théoriques pour construire un cadre méthodologique d'identification des gisements idéalement répliquable à d'autres territoires.

La particularité de ce projet a ainsi été le caractère transversal du travail. Etant élève ingénieur en urbanisme, j'avais la charge de faire le lien entre les processus chimiques que les chercheurs avaient développés, et une identification, adaptation et planification de la donnée pour rendre concret ce qui jusqu'à présent demeurait relativement théorique.

Par ailleurs, dans un souci de restitution et présentation des données, j'ai proposé d'exploiter le logiciel ArcgisPro pour réaliser une série de livrables visuels complémentaires à l'analyse.

C'est pourquoi, durant ces six mois, j'ai eu la responsabilité de trouver, sourcer, évaluer, estimer, cartographier et analyser le potentiel de collecte d'urine au sein de différentes typologies d'espaces en Suède, allant des gisements éphémères des grands festivals aux projections résidentielles à l'horizon 2050. L'objectif final était d'utiliser ce cas d'étude national pour jeter les bases d'une méthodologie plus large de planification de la collecte d'urine. C'est précisément cette confrontation directe entre la dispersion géographique de la ressource et la nécessité d'une logistique de traitement concentrée qui a fait émerger la problématique de ce mémoire, axée sur la pertinence d'un ciblage stratégique par « Macro-Hubs ».

Aussi, ce document met en lumière le travail réalisé et ses limites.

1. L'assainissement séparatif, une réponse stratégique aux vulnérabilités du modèle traditionnel

Cette première partie vise à déconstruire les évidences du modèle d'assainissement centralisé. Avant d'envisager la modélisation cartographique du potentiel de collecte suédois et d'en tirer des conclusions opérationnelles, il est important de détailler pourquoi le « tout-à-l'égout », malgré ses avantages sanitaires ou sa praticité, atteint aujourd'hui des limites infrastructurelles, écologiques et économiques.

1.1. Les impasses écologiques et infrastructurelles du « tout-à-l'égout »

1.1.1. Dilution des pollutions et coût énergétique du traitement en station d'épuration

Le système de drainage urbain actuel repose sur un principe d'évacuation par dilution. Dans ce schéma linéaire, les eaux vannes (fèces et urine) sont systématiquement mélangées aux eaux grises (douches, lavabos, lave-linge) et, dans la majorité des centres urbains anciens dotés de réseaux unitaires, aux eaux pluviales par la suite. Ce mélange crée un paradoxe de proportions. En effet, l'urine ne représente qu'environ 1 % du volume total des eaux usées domestiques générées quotidiennement par un individu. Cela s'explique par les larges volumes d'eau utilisés par un européen (150 litres par jour) [\[4\]](#) alors que le volume d'urine quotidien ne dépasse pas 1,5 litres. Pourtant, cette infime fraction volumétrique concentre la quasi-totalité de la charge dite polluante : elle contient près de 80 % de l'azote (N), 50 % du phosphore (P) et plus de 60 % du potassium (K) présents dans les eaux usées.

En diluant cette charge initiale très concentrée dans des centaines de litres d'eau potable, le système contraint les STEP à traiter des volumes hydrauliques colossaux pour atteindre les normes de rejet fixées par les directives environnementales. Comme précisé en introduction, les procédés de traitement de l'azote reposent sur une aération mécanique intensive des bassins. La fourniture d'oxygène aux bactéries représente souvent à elle seule plus de 50 % de la consommation énergétique totale d'une STEP. [\[5\]](#)

Quant au phosphore, son élimination requiert généralement des traitements physico-chimiques, impliquant l'ajout constant de réactifs flocculants (tels que les sels de fer ou d'aluminium) pour concentrer sous forme d'amas les particules en forçant leur précipitation. Cette réaction génère d'importants volumes de boues d'épuration dont l'évacuation, l'incinération ou l'épandage s'avèrent de plus en plus complexes et onéreux face au durcissement des réglementations sanitaires. Ainsi, le modèle actuel consacre une quantité non négligeable d'énergie à la destruction de ces molécules.

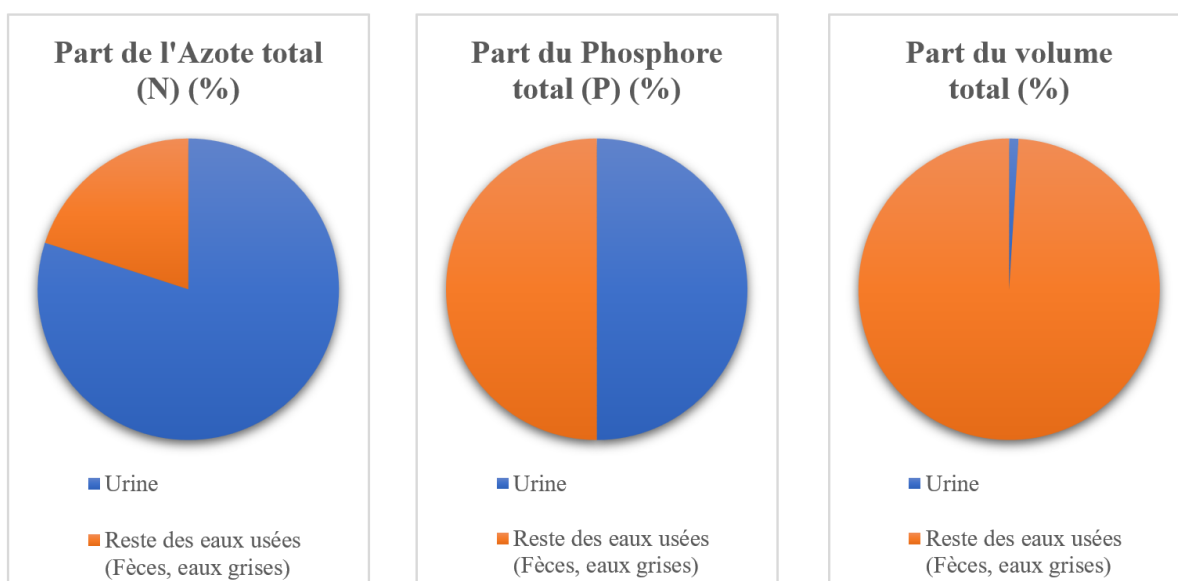


Figure 1 : Répartition des eaux usées (Source : Adapté de « Separate management of anthropogenic nutrient flows (NoMix) », par T. A. Larsen et W. Gujer, 1996, *Water Science and Technology*. [1])

Outre les nutriments, la gestion centralisée se heurte également au défi des micropolluants. L'urine humaine concentre en effet environ 60 à 70 % des résidus pharmaceutiques (hormones, antibiotiques, bêtabloquants) excrétés par la population [6], alors qu'elle ne représente toujours qu'un centième du volume hydraulique des égouts. Dans une STEP classique, ces molécules hautement diluées parviennent à échapper au traitement biologique et finissent par contaminer les milieux aquatiques.

Intercepter l'urine à la source permet donc de capturer cette charge de molécules toxiques sous une forme concentrée avant toute dilution. Les procédés de traitement *in situ*, notamment la déshydratation alcaline combinée à un maintien prolongé à pH élevé (>12), induisent des mécanismes d'hydrolyse alcaline performants qui dégradent une part significative des principes actifs des médicaments et inactivent totalement les agents pathogènes. [7] Pour les molécules les plus persistantes, le traitement de faibles volumes d'urine peu diluée permet de traiter par ozonation ou adsorption sur charbon actif une eau qui en temps normal, diluée, ne serait pas traitée efficacement en STEP.

1.1.2. La pression démographique et les limites d'extension des réseaux traditionnels

Au-delà du traitement énergivore, le réseau physique lui-même se heurte à des limites de capacité. L'urbanisation croissante, l'étalement des banlieues et la densification des métropoles exercent une pression sur des infrastructures de collecte souvent vétustes. Alors, les débits augmentent nécessairement en raison de l'afflux de nouveaux métropolitains. Cela implique une marge de traitement en STEP lors des heures de pointe plus faible.

Aussi, face à cette saturation prochaine, les municipalités se voient dans l'obligation d'enclencher des travaux colossaux de mise à niveau. L'extension des réseaux souterrains ou la création de nouveaux bassins de traitement centralisés requièrent des investissements en capital (CAPEX) faramineux (chiffrés en dizaine de millions d'euros), impliquant de lourds travaux

de génie civil en milieu urbain parfois dense. De surcroît, lors d'épisodes de précipitations intenses, l'incapacité des réseaux unitaires à absorber les pics de débit entraîne l'utilisation des déversoirs d'orage (un bassin de trop-plein des réseaux d'assainissement unitaires). Ces dispositifs de sécurité relâchent alors un mélange d'eaux pluviales et d'eaux usées non traitées directement dans les cours d'eau. Bien que largement diluées, elles peuvent provoquer des chocs de pollution (pics d'ammoniac toxiques pour la faune piscicole) dans les milieux marins.

Dans ce contexte d'obsolescence structurelle programmée, la séparation de l'urine à la source apparaît non seulement comme une démarche écologique, mais avant tout comme une mesure préventive face à l'accroissement des villes. En collectant la charge azotée et phosphorée en amont du réseau, on soulage la demande biologique en oxygène (DBO5/DCO : indicateurs pour mesurer les besoins en oxygène d'organismes marins et oxyder les matières oxydables) des stations. Les eaux vannes ne sont plus aussi concentrées ce qui induit un bénéfice énergétique et moins de risques écologiques suite au traitement. Cette stratégie permet aussi de prolonger la durée de vie des infrastructures existantes en les préservant d'une charge supplémentaire. De même, les coûts d'exploitation étant recentrés sur le traitement in situ, le modèle économique reste stable ou rentable.

1.2. La séparation à la source : changer de paradigme

1.2.1. L'urine comme ressource agronomique : le premier pas vers la souveraineté

Le passage d'une gestion curative de déchets, c'est-à-dire la vision de l'urine comme un indésirable à traiter, à une gestion proactive de ressources, l'urine comme une denrée, exige un changement de paradigme. Sur le plan de la composition, l'urine humaine, riche en azote (majoritairement sous forme d'urée), en phosphore et en potassium, possède un ratio stœchiométrique N-P-K remarquablement adapté aux besoins d'absorption des cultures agricoles. Cela signifie que ces composés se présentent dans des proportions idéales pour favoriser leur réaction chimique, avec des pertes minimales. Par exemple, il est possible de faire de l'engrais fort en azote (25-5-10) [8], l'urine possédant environ ces proportions. Cet engrais favorise la croissance du feuillage qui peut pour certaines cultures se développer ensuite en légumes.

Cette caractéristique prend tout son sens à la lumière des crises que subit actuellement le secteur agricole mondial, lourdement dépendant des engrais de synthèse. La production industrielle d'azote repose sur le procédé *Haber-Bosch*, qui capte l'azote atmosphérique en utilisant d'immenses quantités de gaz naturel. Ce procédé est extrêmement énergivore et fortement émetteur de gaz à effet de serre [2], liant la sécurité alimentaire au coût des énergies fossiles. Une majorité de pays, France et Suède inclus, importent leur gaz naturel. Cela questionne alors l'indépendance des états, et la dépendance de la production agricole aux vendeurs étrangers. Le phosphore de synthèse, quant à lui, est confronté à la raréfaction des ressources. Il est extrait de roches phosphatées dont les gisements de qualité sont très concentrés (principalement au Maroc et en Chine) [3] et de plus en plus contaminés par des métaux lourds.

L'assainissement circulaire par la collecte de l'urine propose de réduire cette dépendance en faisant évoluer la vision des excréta pour les faire entrer dans la liste des ressources exploitables. La valorisation des urines vise donc à substituer une part de ces engrais importés, par un engrais biosourcé, local, renouvelable et disponible au cœur même des villes.

Tableau 1 : Gain environnemental (Source : Adapté de « Nitrogen recovery from wastewater: Possibilities, competition with other resources, and adaptation pathways », par Beckinghausen, A., Odlare, M., Thorin, E., & Schwede, S. (2018). *Sustainability*.[\[2\]](#))

Indicateur d'impact (par kg de N produit)	Production industrielle (Procédé Haber-Bosch)	Récupération et Traitement in situ (Urine séparée à la source)	Gain / Réduction environnementale
Consommation d'Énergie primaire	35 à 45 MJ (Principalement gaz naturel)	10 à 15 MJ (Électricité pour processus locaux : distillation/stripping)	65 % à 75 % d'économie d'énergie
Empreinte Carbone (Émissions de CO ₂ équivalent)	2,2 à 3,5 kg CO ₂ eq	0,5 à 1,2 kg CO ₂ eq (Selon le mix électrique et les fuites de N ₂ O)	60 % à 80 % de réduction de gaz à effet de serre
Ressource de base	Énergie fossile (Méthane CH ₄) + Air	Déchet anthropique local (Urine)	Substitution d'une ressource fossile par une économie circulaire
Évitement d'impacts secondaires	Aucun	Évite l'énergie d'épuration en STEP (40 MJ/kg N éliminés)	Cumul de gains (Double dividende : engrais + économie en station)

1.2.2. Panorama des technologies de séparation : de l'éphémère au pérenne

Pour que cette ressource métabolique soit exploitable à grande échelle, la recherche et développement en ingénierie sanitaire a mis au point plusieurs types de technologies de séparation à la source. La diversité de ces équipements permet aujourd'hui d'adresser toutes les typologies de gisements retenus :

Les dispositifs éphémères (évènementiel) : Les toilettes portables à séparation mixtes ou les urinoirs mobiles développés par Sanitation360, sont utilisables lors de festivals pour une collecte massive et concentrée dans le temps. Ces dispositifs sont efficaces sur le plan logistique, car ils ne nécessitent aucun raccordement aux infrastructures souterraines et transforment des événements éphémères en véritables « usines » à engrais, d'autant que le business autour de la location de toilettes portables est très bien développé en Suède comme en France. Le seul dispositif est donc le remplacement du type d'installation.

Les dispositifs fixes à forte fréquentation (arénas/stades) : Les urinoirs économes en eau, déjà démocratisés par endroit pour des raisons d'économie d'eau potable, constituent le premier atout pour ces infrastructures. À cela s'ajoutent les toilettes à séparation de nouvelle génération (Urine-Diverting Flush Toilets - UDFT). [\[9\]](#) Les modèles les plus récents s'appuient sur l'effet

Coanda (la tendance d'un fluide à suivre une surface convexe en raison de la tension superficielle) pour diriger « invisiblement » l'urine vers un orifice distinct, tout en évacuant les fèces classiquement.

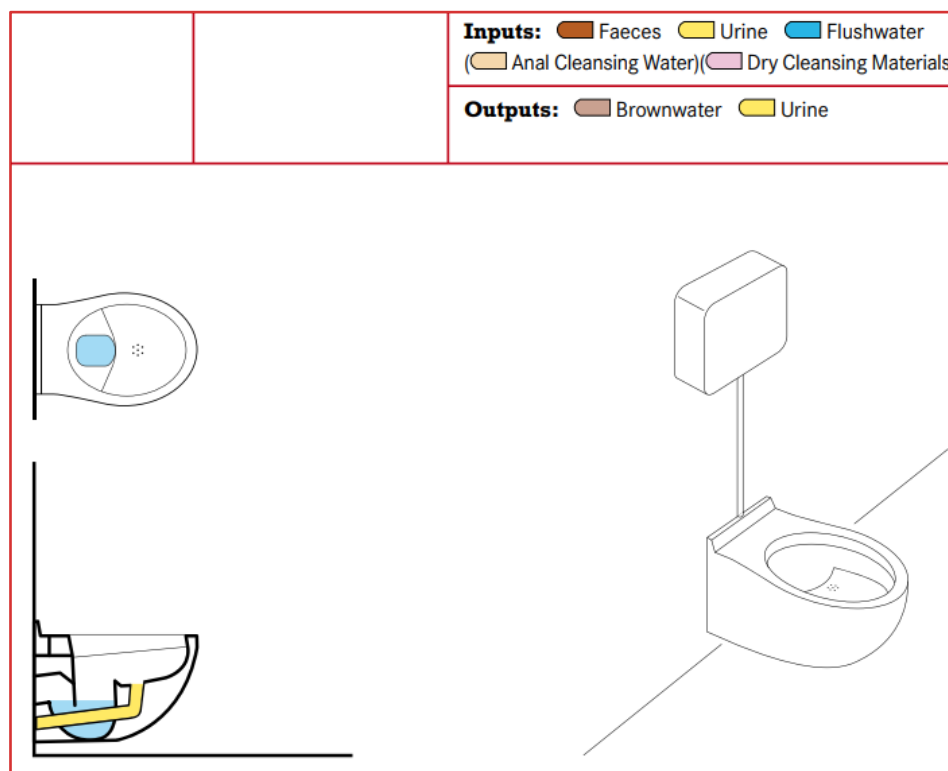


Figure 2 : Fonctionnement UDFT (Source : Eawag [\[10\]](#))

Les infrastructures résidentielles (logements et futurs éco-quartiers) : Dans la construction neuve, l'intégration de réseaux séparatifs devient possible. Ces systèmes peuvent être gravitaires ou fonctionner par aspiration sous vide, cela dépendra des immeubles et de leur fonction. L'urine pure ou très faiblement diluée est alors acheminée vers des cuves de stockage en sous-sol de l'immeuble, en attente d'une collecte par pompage ou d'un traitement de déshydratation in situ.

En 2026, les solutions pour différentes catégories des milieux sociétaux existent. À Paris, par exemple, la ZAC Saint-Vincent-de-Paul (14^e arrondissement) illustre la possibilité à l'échelle d'un quartier d'intégrer cette technologie dans les nouveaux logements. Conçu comme le premier éco-quartier « zéro carbone, zéro déchet, zéro rejet » de la capitale, ce projet de 600 logements et équipements publics intègre un réseau de collecte séparative de l'urine. [\[11\]](#) Grâce à l'installation de toilettes à séparation de flux (UDFT) réparties dans les nouveaux bâtiments, l'urine pure y est directement déviée et acheminée vers des cuves de stockage en sous-sol. L'ambition va ici jusqu'au bout du métabolisme urbain : plutôt que d'être traitée comme un déchet, cette ressource sera valorisée localement et transformée en engrais biologique directement utilisé pour fertiliser les espaces verts et les plantations de la Ville de Paris. Ce projet démontre concrètement qu'en adaptant la gouvernance et le secteur de la construction, le modèle de l'assainissement circulaire peut s'ancrer au cœur des métropoles denses comme Paris.

De surcroît, les pays scandinaves déploient des modèles intégrés fonctionnant par aspiration sous vide, particulièrement adaptés aux quartiers à forte densité. L'exemple le plus abouti est aujourd'hui l'éco-quartier d'Oceanhamnen à Helsingborg (Suède), qui a mis en place le système

industriel « Tre rör ut » (trois conduites). Cette infrastructure repose sur une séparation des flux dès le logement : les eaux noires sont aspirées par des toilettes à vide (ne consommant que 0,6 à 1 litre d'eau par chasse), les eaux grises sont isolées, et un broyeur d'évier collecte les déchets organiques. L'ensemble de ces flux est acheminé vers RecoLab, une usine de traitement de quartier. Le système permet de récupérer jusqu'à 90 % de l'azote (N) et 85 % du phosphore (P) présents dans les effluents, [12] tout en réduisant la consommation d'eau potable des ménages de près de 50 %. Cette technologie couplée permet également de produire du biogaz localement grâce à la méthanisation des eaux noires et des déchets organiques.

1.3. La nécessité d'une approche territorialisée et stratégique

1.3.1. Les défis de l'acceptabilité sociale et réglementaire

Bien que techniquement fiable et écologiquement indiscutable, la valorisation de l'urine se heurte toutefois à l'appréciation personnelle des citoyens. L'acceptabilité sociale est un frein majeur : la gestion des excréta humains touche à l'intime et peut susciter une aversion sociétale. Le succès du déploiement des toilettes à séparation dépend donc de l'ergonomie des équipements. Ils doivent être perçus comme équivalents aux standards actuels et n'induire aucune contrainte de posture, d'entretien ou d'odeur supplémentaire pour l'utilisateur, afin qu'il ait le sentiment que l'équipement est parfaitement adapté à ses habitudes.

Sur le plan réglementaire, l'épandage de l'urine humaine sur des cultures vivrières fait face à plusieurs normes sanitaires préventives. Afin de garantir l'innocuité du produit face aux pathogènes ou aux résidus médicamenteux, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) impose des protocoles de sécurisation stricts. [13] Ces protocoles reposent généralement sur un stockage prolongé (plusieurs mois), période durant laquelle l'hydrolyse de l'urée transforme l'urine en une solution d'ammoniacale à haut pH, un milieu naturellement hostile qui inactive les bactéries et les virus. L'évolution du cadre juridique européen vers la création de critères clairs de « sortie du statut de déchet » est une condition essentielle pour transformer l'urine hygiénisée en un produit fertilisant commercialisable.

1.3.2. Pourquoi le modèle « diffus » n'est pas viable : l'obligation de cibler les gisements

C'est précisément à l'intersection de ces contraintes techniques, sociales et économiques qu'intervient la vision pragmatique de la planification, afin d'imaginer un modèle réaliste. Décréter le remplacement instantané de l'ensemble du parc de toilettes d'une ville et percer les voiries pour doubler les réseaux d'évacuation souterrains relèverait d'une utopie financièrement coûteuse et logistiquement conséquente.

De plus, le modèle d'une collecte « diffuse » s'effondre face au bilan carbone de la logistique de transport. Si des camions de pompage doivent sillonner un tissu pavillonnaire étalé pour récolter quelques litres d'urine maison par maison, à l'image de la collecte porte-à-porte des déchets domestiques, l'énergie dépensée et les gaz à effet de serre émis par le transport surpasseront les bénéfices écologiques liés à la récupération des nutriments. De même, s'il est tentant de réduire le nombre de passages de camions collecteurs en augmentant le volume des cuves individuelles, le problème n'est que doublement déplacé. D'une part, qu'un camion

collecte 50 m³ sur 100 maisons tous les trois mois ou qu'il collecte 50 m³ sur 1 000 maisons tous les dix jours, l'émission reste sensiblement la même, celle d'un camion-citerne de 50 m³. Et l'augmentation des cuves nécessiterait des travaux de terrassement d'autant plus élevés. Dans le futur, ces installations seront peut-être viables (flotte de camions électriques), mais pour le moment, le logement particulier ne semble pas être le gisement prioritaire (rendement volume/émissions discutable).

Par conséquent, pour créer de la viabilité environnementale, la transition vers l'assainissement séparatif ne peut se faire à vue : elle doit être ciblée et territorialisée. Il est nécessaire de sortir d'une approche « au fil de l'eau » pour adopter une stratégie de ciblage par l'identification de gisements ou « Hubs ». C'est là où la concentration humaine est la plus dense, où les infrastructures sont à construire ou dédiées à de l'évènementiel, que la collecte devient volumineuse, facile, et que le ratio coût/bénéfice s'inverse en faveur de la circularité.

Aussi, c'est ce besoin de ciblage et d'identification qui nous a menés à nous emparer de ces problématiques à travers la recherche, la tabulation et la cartographie des points potentiel de collecte d'urine en Suède, pour en dégager spatialement les gisements à prioriser.

2. Modélisation et quantification : Création d'un outil d'aide à la décision

Cette deuxième partie détaille la méthodologie mise en œuvre pour construire une base de données regroupant les événements majeurs, les stades ou salles de concerts ainsi que les volumes d'urines potentiels venant des croissances démographiques. Ce modèle a directement été appliqué à la Suède pour en tester la validité et dégager les Hubs suédois.

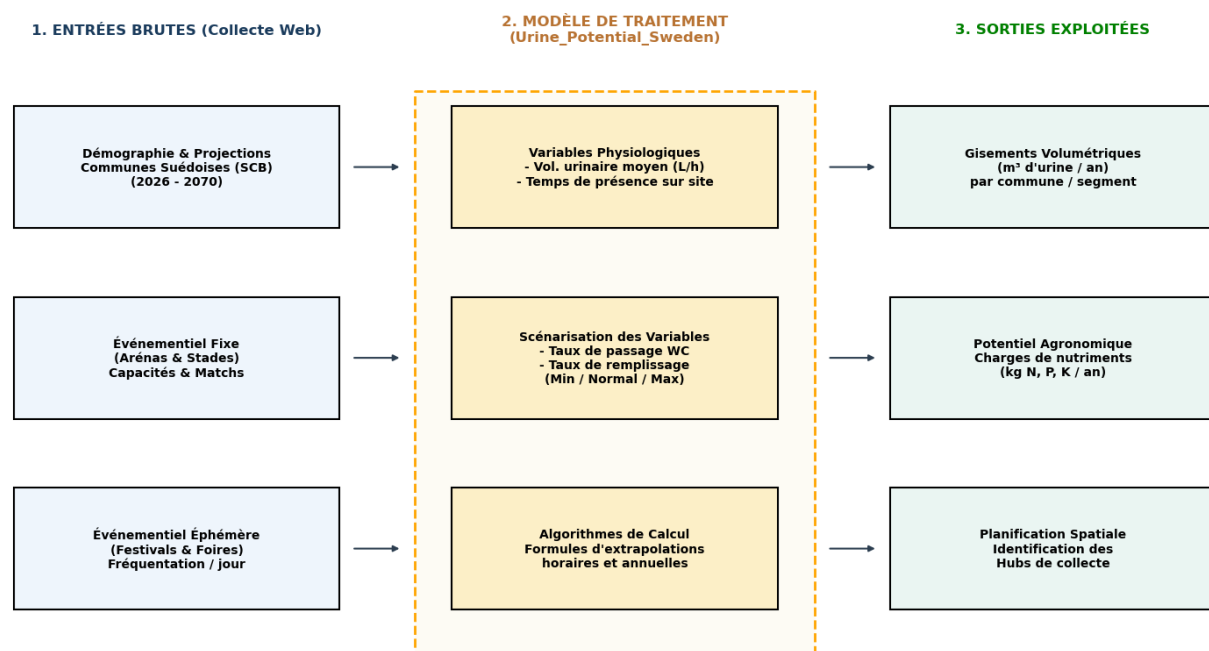


Figure 3 : Modèle développé (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026, réalisé à l'aide d'un prompt demandant un code python à une IA pour créer le schéma dans Jupyter Notebook)

2.1. Sourcing et structuration de la donnée : L'étude de cas suédoise

2.1.1. Méthodologie d'agrégation et de croisement des données

Plutôt que d'évaluer à l'échelle du pays le nombre d'évènements ou les chiffres de fréquentation des stades suédois, ce qui n'aurait pas permis de faire ressortir les points de concentration, la méthode adoptée a été une approche plus locale, en tentant de rassembler les évènements majeurs dans chacune des 290 communes suédoises. L'objectif premier était d'identifier et de recenser de manière exhaustive les lieux de convergence générant des rassemblements de population massifs, en incluant les stades présents majoritairement dans les grandes villes. Cette donnée a ensuite été complétée par l'intégration des projections démographiques communales dans le but d'élargir l'analyse aux prochaines décennies.

La construction du fichier central a nécessité un travail de recherche internet, de croisement de donnée, de sourcing et de nettoyage de bases de données publiques. Ce croisement a porté sur plus de 100 évènements en extérieur de plus de 5 000 personnes et environ 35 stades, répartis sur les 290 municipalités suédoises. Les suppositions ont porté sur les variables suivantes :

- **Les capacités d'accueil infrastructurelles** : Sourcing des données relatives aux jauges maximales sportives et culturelles (souvent distinctes) des arénas et stades suédois.
- **La fréquentation réelle et événementielle** : Recensement du nombre de participants par jour ou par an, en distinguant la nature des évènements (la dynamique d'un festival de musique en plein air sur trois jours diffère de celle d'un match de hockey en salle de quelques heures).
- **La dynamique démographique territoriale** : Intégration des données prospectives officielles du bureau des statistiques suédois (SCB) [\[14\]](#), déclinées par commune, avec des projections de croissance ou de décroissance aux horizons stratégiques de 2026, 2030 et 2050.

Cette architecture de données permet de cartographier la ressource non seulement dans l'espace, mais également dans le temps.

2.1.2. Définition des hypothèses de modélisation biométriques et comportementales

La particularité de la modélisation a consisté à convertir une « présence humaine » en litres d'urine collectables, de manière à ce que le modèle soit réaliste. Pour ce faire, des hypothèses biométriques et comportementales ont été standardisées dans l'algorithme de calcul. Sur le plan physiologique, la base retenue pour la production d'urine a été lissée à un débit moyen de 0,09375 L/heure par individu (correspondant à un volume standard de 1,5 L/jour pour un adulte en supposant que la durée d'éveil est de 16 heures. [\[15\]](#)

Cependant, il faut également anticiper l'écart entre la valeur théorique et pratique, d'autant que les comportements individuels sont difficiles à prévoir. En effet, le volume total excrété n'est pas toujours égal au volume effectivement collectable. Ce dernier dépend du temps de présence réel sur le site, lui-même dépendant du type d'évènement ou des infrastructures à disposition. Pour intégrer ces incertitudes dans les calculs des volumes d'urine, des coefficients de

pondération déclinés en trois scénarios de sensibilité (Minimum, Normal, et Maximum) ont été appliqués aux équations :

- Le taux de passage aux toilettes : Il est erroné de supposer que l'intégralité d'une jauge passe aux sanitaires. Un individu présent lors d'un évènement sportif ne se rendra pas nécessairement aux toilettes. Pour les arénas, par exemple, le modèle retient une proportion médiane de passage de l'ordre de 75 %.
- Le taux de remplissage des infrastructures : Les stades et salles de concert opèrent rarement à guichets fermés tout au long de l'année, impliquant un taux de remplissage de 90% pour les petits stades (< 10 000) et 80% pour les plus grands (> 10 000). Cela a été appliqué pour tempérer les jauges maximales théoriques.

Tableau 2 : Variables de modélisation événements et stades (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

Variable de modélisation	Scénario MIN	Scénario NORMAL	Scénario MAX	Remarques
Débit urinaire de base	0,09375 L/h	0,09375 L/h	0,09375 L/h	Constante physiologique (1,5 L/jour pour 16h)
Durée de présence moyenne	2 à 4 h	4 h (Arénas) 3 à 10 h (Plein air)	Jusqu'à 10 h	Dépend de la typologie (Matches/Concerts vs Festivals sur plusieurs jours)
Proportion de passage aux toilettes	60 % à 65 %	75 % (Arénas) 50 % à 90 % (Plein air)	85 % à 100 %	Ajusté selon le type d'évènement (ex: 90% pour les festivals longs type)
Taux de remplissage des infrastructures (Arénas)	70 %	80 % à 90 %	100 %	Modère la jauge maximale théorique pour refléter la réalité des billetteries

Il convient toutefois d'apporter une précision importante quant à cette modélisation. En effet, elle ne vise pas à dimensionner des conduites, mais plutôt à évaluer un potentiel de collecte afin d'identifier les stades où la collecte serait la plus prolifique. C'est pourquoi, ces calculs déterminent des volumes totaux annuels sans évaluer la répartition temporelle de ceux-ci. Or, pour des infrastructures spécifiques comme les stades, l'excrétion humaine ne suit pas une loi linéaire mais une dynamique de pointe extrême. Lors d'un match de hockey ou d'un concert, une grande partie des flux sont générés sur des fenêtres temporelles ultra-restreintes de 15 à 20 minutes, correspondant aux mi-temps ou aux entractes. Si le modèle développé dans la base de données élaborée reste viable pour évaluer la volumétrie annuelle de la ressource, le dimensionnement des colonnes de chute, des collecteurs gravitaires ou tout autre conduite, si tant est que la technologie soit installée, devront obligatoirement être recalculés.

Enfin, concernant les projections démographiques, l'hypothèse retenue a été de faire varier la valeur du nombre d'heures de présences au domicile. Sur une journée de 16 heures éveillées, en supposant que l'urine est collectée exclusivement lors de la journée, il faut alors différencier la présence au domicile de celle au travail. Aussi, il convient d'ajouter une variable de jours ouvrés pour adapter au mieux le modèle à la réalité d'une année civile.

Tableau 3 : Variables de modélisation projections démographiques communales (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

Variable de modélisation	Scénario MIN	Scénario NORMAL	Scénario MAX	Remarques
Présence à domicile (Jours ouvrés)	6 h	7 h	8 h	Les scénarios supposent que le résident n'urine pas en dehors de son lieu de travail et chez lui lors des jours ouvrés
Présence à domicile (Jours non-ouvrés)	12 h	14 h	16 h	Les scénarios supposent que le résident urine peu ou pas en dehors de chez lui lors des jours non-ouvrés

2.2. Les trois axes de la modélisation stratégique

Pour structurer l'analyse et refléter les réalités des données, la base de données a été scindée en trois feuilles de calcul distinctes, chacune correspondant à une typologie de gisement.

2.2.1. Les événements en extérieur : quantification d'une ressource éphémère mais récurrente

Le premier axe de modélisation cible les rassemblements en plein air. Ces événements (festivals musicaux majeurs, célébrations traditionnelles type Valborg à Uppsala) représentent le potentiel le plus accessible en matière de collecte d'urine. C'est pourquoi la première partie de ce travail a exclusivement été consacrée à l'identification de ces rassemblements extérieurs.

Leur force réside dans leur caractère éphémère : ils nécessitent, de par leur localisation hors infrastructure, le déploiement d'une logistique sanitaire temporaire (toilettes portables). Seulement, les eaux vannes stockées dans les cuves des toilettes sont, une fois l'évènement terminé, pompées et transportées par des camions vers les STEP. La substitution de ces équipements polluants par des cabines à séparation d'urine (ou des urinoirs secs de grande capacité) est opérationnellement aisée, car elle ne requiert aucune autorisation de voirie ni modification du génie civil existant.

Par ailleurs, les prototypes de concentration d'urine développés par SLU montrent que l'urine, une fois déshydratée à 90%, ne représente plus qu'un dixième du volume initial. C'est pourquoi, un événement qui auparavant produisait l'équivalent de dix camions-citernes ne nécessiterait plus qu'un seul de ces engins pour évacuer l'urine concentrée.

De ce fait, le début du projet s'est concentré sur la modélisation du volume de ces événements, pour la plupart annuels, afin d'évaluer la masse de N-P-K, les gains économiques et l'avantage environnemental de la substitution avec des toilettes permettant la collecte.

A l'aide de recherches et de compilation de données relatives aux évènements dans les différentes communes suédoises, les calculs des volumes ont été réalisés suivant cette équation :

$$V_i = N_j \cdot n \cdot \alpha_i \cdot t \cdot \Phi$$

Équation 1 : Volume annuel d'un évènement extérieur.

Où :

- N_j : Nombre de personnes présentes par jour à l'évènement (/j).
- n : durée de l'évènement (j)
- i : Type de scénario (MIN, NORMAL, MAX).
- α_i : Proportion de participants utilisant les sanitaires du scénario i (%).
- t : Durée de présence de l'utilisateur sur l'évènement (h).
- Φ : Débit urinaire horaire moyen (L/h), fixé à 0,09375 L/h.

Cette méthode de calcul intègre donc toutes les variables détaillées précédemment pour réaliser les trois scénarios MIN, NORMAL et MAX des volumes totaux sur l'ensemble de la durée d'un évènement.

2.2.2. Les arénas et stades : des gisements localisés permanents

Le deuxième axe change d'échelle temporelle pour se concentrer sur les infrastructures fixes. La collecte de donnée est réalisée différemment. La majeure partie des stades suédois sont dédiés au sport, tout en accueillant régulièrement des concerts ou autre évènements extra sportifs. Contrairement à la collecte de plein air, le passage au séparatif dans une aréna nécessite un aménagement pérenne (installation d'urinoirs faibles en eau, de toilettes *NoMix* et surtout le dimensionnement de cuves de stockage en sous-sol).

La pertinence d'un tel investissement repose sur la régularité du flux. La modélisation a donc consisté à calculer la fréquence d'utilisation annuelle en croisant les calendriers des usages culturels et sportifs. Cependant, ces calendriers ne sont pas toujours publics. Il faut alors recenser l'information auprès des plateformes de ventes de billets (certaines proposent des billets saison garantissant un nombre d'évènement) ou d'autres sites traitant des rassemblements dans les stades (revue de presse, site du club).

Par ailleurs, étant donné qu'un stade accueille entre 20 et 70 matchs et concerts par an, le nombre de spectateurs est évalué à partir des jauges maximales culturelles et sportives de chaque stade, pondérée ensuite par les coefficients de remplissage.

D'où, le volume total annuel d'urine collecté au sein d'une infrastructure fixe est modélisé selon l'équation suivante :

$$V_{\{i,tot\}} = V_{\{i,c\}} + V_{\{i,s\}}$$

Équation 2 : Volume annuel d'une infrastructure fixe.

Où :

- i : Type de scénario (MIN, NORMAL, MAX).
- $V_{\{i,tot\}}$: Volume total annuel du scénario i (L).
- $V_{\{i,c\}}$: Volume des événements culturels du scénario i (L).
- $V_{\{i,s\}}$: Volume des événements sportifs du scénario i (L).

$$V_{\{i,c\}} = C_c \cdot N_c \cdot \tau_i \cdot \alpha_i \cdot t \cdot \Phi$$

Équation 3 : Volume annuel des événements culturels dans une infrastructure fixe.

$$V_{\{i,s\}} = C_s \cdot N_s \cdot \tau_i \cdot \alpha_i \cdot t \cdot \Phi$$

Équation 4 : Volume annuel des événements sportifs dans une infrastructure fixe.

Où :

- C_c : Capacité maximale de la salle pour les événements culturels (places).
- C_s : Capacité maximale de la salle pour les événements sportifs (places).
- N_c : Nombre d'événements culturels par an.
- N_s : Nombre d'événements sportifs par an.
- i : Type de scénario (MIN, NORMAL, MAX).
- τ_i : Taux de remplissage moyen de l'infrastructure (%).
- α_i : Proportion de participants utilisant les sanitaires du scénario i (%).
- t : Durée de présence de l'utilisateur sur le site (h).
- Φ : Débit urinaire horaire moyen (L/h), fixé à 0,09375 L/h.

Sur le plan de la physique des réseaux, une nuance technologique doit être apportée quant à la pureté du flux calculé par cette formule. L'équation détermine le volume d'urine pure produite. Si ce ratio est strictement exact pour les urinoirs secs (qui fonctionnent presque sans eau par gravité, les toilettes à séparation de type UDFT aux sanitaires féminins ou mixtes requièrent l'apport d'une micro-chasse d'eau pour rincer la paroi frontale de la cuvette. Bien que les technologies récentes minimisent cet apport (environ 0,1 à 0,3 litre par déclenchement contre 6 litres pour une chasse conventionnelle), ce volume de rinçage induit un facteur de dilution inévitable. Ces volumes calculés sont ceux strictement estimés par rapport aux nombres de spectateurs, sans tenir compte des facteurs liés à la consommation de boisson alcoolisées ou à la dilution, ceux-ci n'influençant pas ou peu les teneurs en N-P-K.

2.2.3. Croissance démographique (2026-2050) : l'anticipation résidentielle

Le troisième axe relève directement de la projection des futurs aménagements du territoire. L'objectif est d'évaluer le volume généré par des habitants vivant dans des logements neufs ou réhabilités possédant des toilettes à séparation de type UDFT. De ce fait, pour estimer ces volumes, la méthodologie consiste à exploiter les bases de données SCB en calculant les différentiels de population d'une année à l'autre des 290 communes suédoises. En constatant l'écart démographique (positif ou négatif) et en appliquant certaines variables, on obtient le volume de chaque commune, sur différentes années, sans intervenir sur les logements existants.

Pour affiner ces volumes, le modèle différencie le temps passé à domicile selon la nature de la journée afin de coller au plus près des rythmes de vie urbains : les jours ouvrés ont été pondérés (modélisés à 7 heures de présence active à domicile en scénario normal pour tenir compte du temps d'excrétion passé hors du logement, sur le lieu de travail ou à l'école) face aux jours non-ouvrés (modélisés à 14 heures en scénario normal). En projetant ces volumes individuels sur les courbes d'évolution démographique communale jusqu'en 2050, l'objectif est d'identifier spatialement les futures zones de tensions qui nécessiteront prochainement une mise à niveau des STEP locales. Ainsi, le volume annuel net d'urine, d'une année comparée à une autre, dans les bâtiments neufs d'une commune est modélisé selon l'équation suivante :

$$V_{\{i,f-p\}} = V_{\{i,f\}} - V_{\{i,p\}}$$

Équation 5 : Volume annuel net d'une année comparée à une autre dans les bâtiments neufs d'une commune.

Où :

- i : Type de scénario (MIN, NORMAL, MAX).
- f : Année la plus lointaine.
- p : Année la moins lointaine.
- $V_{\{i,f-p\}}$: Volume net annuel de la commune l'année f comparée à l'année p (L).
- $V_{\{i,f\}}$: Volume annuel de la commune l'année f (L)
- $V_{\{i,p\}}$: Volume annuel de la commune l'année p (L)

$$V_{\{i,x\}} = N_x \cdot (V_{\{i,t\}} + V_{\{i,r\}})$$

Équation 6 : Volume annuel d'une année dans les bâtiments neufs d'une commune.

Où :

- i : Type de scénario (MIN, NORMAL, MAX).
- x : Année d'étude (2026, 2030, 2050).
- $V_{\{i,x\}}$: Volume annuel de la commune l'année x (L).
- N_x : Population de la commune à l'année x .
- $V_{\{i,t\}}$: Volume annuel individuel des jours travaillés (L).
- $V_{\{i,r\}}$: Volume annuel individuel des jours non travaillés (L).

$$V_{\{i,t\}} = N_t \cdot t_{\{i,t\}} \cdot \Phi$$

Équation 7 : Volume annuel individuel des jours travaillés.

$$V_{\{i,r\}} = N_r \cdot t_{\{i,r\}} \cdot \Phi$$

Équation 8 : Volume annuel individuel des jours non travaillés.

Où :

- i : Type de scénario (MIN, NORMAL, MAX).
- N_t : Nombre de jours travaillés par an.
- N_r : Nombre de jours non travaillés par an.
- $t_{\{i,t\}}$: Temps passé à la maison un jour travaillé dans le scénario i (h).
- $t_{\{i,r\}}$: Temps passé à la maison un jour non travaillé dans le scénario i (h).
- Φ : Débit urinaire horaire moyen (L/h), fixé à 0,09375 L/h.

Il s'agit donc de cartographier les communes en pleine croissance démographique de demain où l'afflux de population saturera les réseaux existants, justifiant économiquement le déploiement de réseaux séparatifs gravitaires dédiés plutôt que la construction d'infrastructures neuves de raccordement.

2.3. De la base de données à la cartographie

2.3.1. Le Système d'Information Géographique (SIG) comme révélateur de pertinence

L'objectif de ce projet mené avec SLU est d'être en mesure, à travers une méthodologie construite selon plusieurs outils, d'identifier le potentiel de collecte d'urine d'un territoire donné et plus particulièrement d'en dégager les densités les plus élevées. La base de données exposée en amont a pour but de rassembler les informations nécessaires au déroulement de l'étude, dans l'optique de répondre au questionnement relatif à la pertinence de l'assainissement circulaire. Toutefois, la base de données à elle seule ne consiste qu'en un ensemble de valeurs éparées liées uniquement par une équation. La méthodologie doit être agrémentée d'un outil d'analyse pour traiter l'entièreté des volumes d'urine établis.

Alors qu'une analyse statistique aurait potentiellement révélé des tendances, notamment en corrélant le nombre d'événements annuels dans une commune avec les volumes calculés, nous avons opté pour une approche moins mathématique, la cartographie des communes.

En effet, le traitement spatial de la donnée présentait plusieurs avantages qui ont orienté le choix dans cette direction. En premier lieu, l'argument le plus pragmatique reste celui de l'investissement. Or, la rentabilité d'une filière de collecte de l'urine dépend exclusivement de la minimisation de la distance de transport entre le point d'excrétion et le point de traitement ou de valorisation agricole. Aussi, en cartographiant spatialement, il est possible d'estimer les distances évitées (en ajoutant une couche de données des STEP), tout comme les distances restantes (acheminement vers les zones agricoles). De même, en déterminant l'ampleur des trajets, l'estimation des émissions GES est réalisable. Enfin, en supposant que cette démarche d'assainissement présente effectivement un potentiel non-négligeable, les premiers acteurs de cette approche seront les élus des municipalités, ainsi que les promoteurs privés.

D'où, pour faciliter la lecture des données et la rendre accessible au plus grand nombre, l'analyse spatiale (SIG) a été privilégiée. Cela permet à toute personne intéressée de s'emparer du sujet. De fait, il semble plus aisé d'identifier visuellement un hub matérialisé sur la carte du territoire par des points proportionnels ou une palette de couleurs graduées, plutôt que de se représenter soi-même une valeur sur une courbe dépourvue d'ancrage géographique.

Dès lors, une fois la base de données convertie au format exploité par le logiciel, les cartes ont pu être réalisées via le logiciel ArcGIS pro. Ce dernier est particulièrement adapté car il offre déjà une ressource Géo data conséquente à travers l'interface Living Atlas, auquel les événements dans les communes peuvent être joints géographiquement.

2.3.2. Grandeurs caractéristiques : Volumes et nutriments

Afin de compléter l'analyse spatiale, la modélisation a converti la présence humaine en trois types de grandeurs caractéristiques :

- La fréquence des événements (nombre de jours) : cet indicateur permet d'avoir une idée de la fréquence à laquelle la collecte sera effectuée.
- La volumétrie (m³) : cet indicateur permettra de dimensionner les cuves de stockage, et, combiné à la fréquence des événements, d'optimiser la rotation des camions de pompage.
- Les nutriments (en kilogrammes de N, P, K) : cet indicateur traduit les ratios de conversion stœchiométrique appliqués aux volumes d'urine pour révéler la masse solide d'azote, de phosphore et de potassium extractible. Cela ouvre la possibilité à l'estimation financière et la surface cultivable à partir de ces masses.

L'application de cette chaîne de traitement de la donnée a permis de générer une série de cartographies propres à une thématique et ainsi mettre en évidence les hubs présents sur le territoire suédois.

3. Analyse des gisements : La pertinence validée par les « hubs » urbains

L'objectif de cette troisième partie est d'exploiter les cartographies générées par le SIG pour entamer une réponse au regard de la pertinence de la transition vers la séparation à la source à l'échelle d'un territoire.

3.1. Concentration événementielle et opportunités immédiates

Dans une logique de conduite du changement, le point d'entrée du projet semble être matérialisé par les événements en extérieur nécessitant des toilettes portables. Déjà présentes sur les festivités, les toilettes portables collectant l'urine sont la technologie la plus accessible pour initier une filière locale de collecte d'urine.

3.1.1. Analyse spatiale des festivals et rassemblements (Gisements éphémères)

L'analyse des rassemblements en plein air révèle des gisements majoritairement concentrés dans les villes. Les cartographies thématiques liées au nombre de jours d'événements et à la fréquentation globale mettent en évidence des pôles de collecte spécifiques et parfois inattendus.

Au-delà de la domination logique des grandes métropoles, le maillage événementiel suédois fait émerger des hubs de forte intensité dans des communes de taille moyenne (voir les cartes relatives aux taux de fréquentation en [Annexe 9](#)). Par exemple, des villes comme Sölvesborg, Vimmerby ou Rättvik se détachent sur les cartes en concentrant un nombre significatif de participants sur de courtes périodes, alors qu'elles se classent respectivement 137^{ème}, 155^{ème} et 203^{ème} des villes les plus peuplées. [16] À l'échelle locale, la cartographie de la ville d'Uppsala illustre cette dynamique de pic : des rassemblements majeurs comme les célébrations traditionnelles du festival de Valborg, le Reggae Festival ou les événements autour de l'IFU Arena génèrent des volumes d'urine conséquents sur de très courtes durées. Selon les événements modélisés, ces gisements éphémères se situent dans des tranches allant de 1 à 1500 m³, le tout produit sur une fenêtre temporelle réduite (quelques jours). Cette concentration temporelle et spatiale courte atteste d'un avantage sérieux : elle permet d'optimiser les tournées de pompage des camions, rendant l'opération de collecte plus efficace économiquement et écologiquement. Au total, c'est entre 4 500 m³ et 5 800 m³, répartis sur plus de 120 événements qui ont été identifiés, soit une moyenne de 41 m³ par événement.

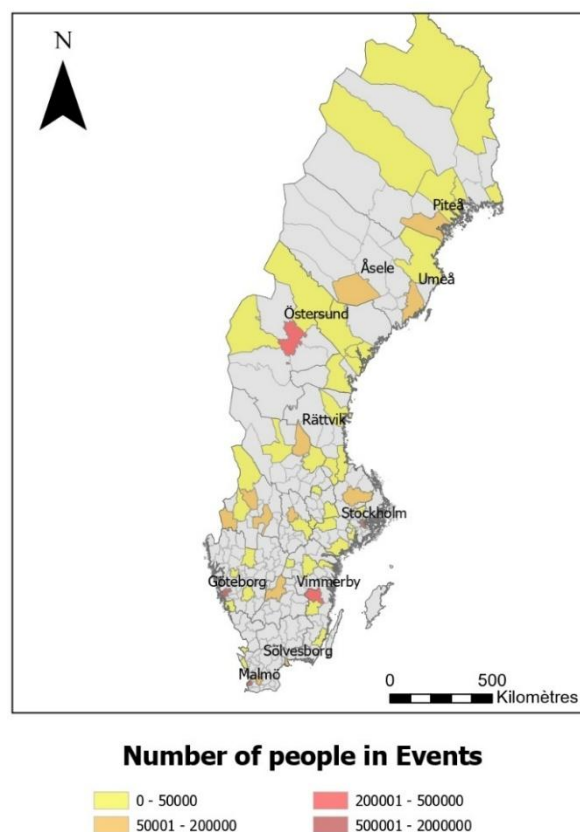


Figure 4 : Nombre de personnes dans les événements extérieurs (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

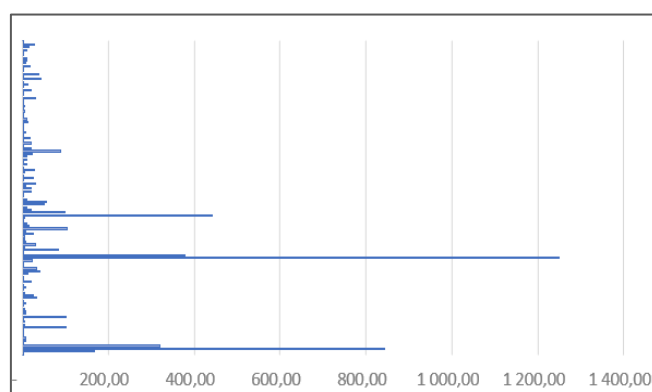


Figure 5 : Répartition des volumes (m³) issus d'événements en extérieur (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

Toutefois, il convient de préciser que la répartition des volumes diffère largement de ce que la moyenne évoquerait (Figure 5). La majorité des événements ne concentre en réalité qu'une dizaine de m³. Ce résultat n'est pas négligeable mais doit être considéré pour éviter l'écueil dû à la moyenne élevée.

3.1.2. Le rôle stratégique des grandes arénas : rentabiliser les infrastructures pérennes

Si les évènements en plein air constituent des opportunités éphémères, les stades constituent des points de collecte qualifiés de pérennes. Les cartographies recensant les infrastructures sportives et culturelles confirment une hyper-concentration de la ressource au sein des trois grandes aires métropolitaines suédoises : Stockholm, Göteborg et Malmö.

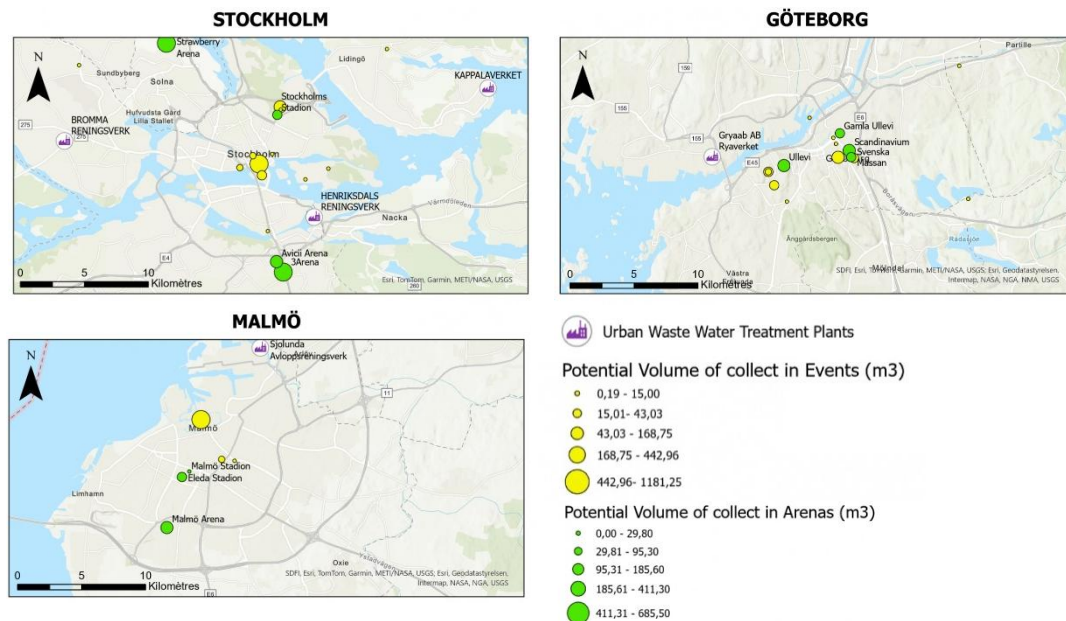


Figure 6 : Volumes des grandes villes suédoises (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

L'analyse spatiale de ces agglomérations révèle des densités d'infrastructures. Sur le territoire de Stockholm, la modélisation identifie un hub regroupant dans un rayon très restreint la Strawberry Arena, le Stockholms Stadion, l'Avicii Arena et la Stockholmsmässan (Foire internationale). De même, le pôle urbain de Göteborg concentre, dans un périmètre quasi piétonnier, Gamla Ullevi, le stade Ullevi, le Scandinavium et la Svenska Mässan. Au sud, Malmö présente une synergie d'infrastructures comparable avec la Malmö Arena, le Malmö Isstadion et l'Eleda Stadion.

Ces sites accueillent des centaines de milliers de visiteurs annuels. Les volumes d'urine cumulés générés s'échelonnent entre 3 000 et 6 500 m³ selon le scénario adopté, sur un ensemble de 1 300 évènements environ. Sachant qu'il y a 35 stades, on obtient une moyenne de 37 évènements annuels par stade (la répartition du nombre de jours d'évènements est illustrée en [Annexe 5](#)), totalisant 4 m³ d'urine chacun. Cela signifie que tous les 10 jours, dans chacun des stades, une cuve de 4 m³ d'urine pure est remplie.

Cependant, comme pour les évènements extérieurs, les gros volumes sont générés par les grandes enceintes. Les sept premières représentent près de la moitié du volume annuel, accusant toutes d'au moins 200 m³ par an. Ces stades comptabilisent une moyenne de 45 évènements produisant chacun 8 m³. Dans ce cas, les cuves de 4 m³ sont pleines en seulement 4 jours.

En somme, ces stades et plus particulièrement les grandes enceintes représentent des points d'ancrage géographiques à fort potentiel, situés dans les principales villes suédoises.

3.2. Anticiper la ville de demain : La pertinence démographique

Si l'évènementiel permet d'amorcer la transition, la durabilité à long terme de l'assainissement circulaire repose sur sa capacité à s'intégrer dans le logement résidentiel de demain. En raison du temps de présence quotidien des individus à leur domicile, les volumes d'urine produits par l'habitat surpassent de très loin les gisements évènementiels.

3.2.1. Identification des zones de tension future (Croissance 2026-2050)

L'étude de la croissance de la population aux horizons 2030 et 2050 fournit un outil permettant d'imaginer comment orienter la planification urbaine de demain. Les projections démographiques suédoises spatialisées démontrent que la croissance n'est pas homogène. Le territoire national se fracture entre de vastes zones en déclin démographique (où les volumes d'urine stagnent voire diminuent, dans le nord et l'intérieur du pays) et des zones en hyper-croissance situées sur les littoraux et autour des capitales régionales.

L'analyse de l'évolution des volumes d'urine entre 2026 et 2050, poussée jusqu'à 2070, identifie l'axe Stockholm-Uppsala, ainsi que les régions côtières de Göteborg et Malmö, comme des zones de très forte tension (voir les cartographies des volumes projetés en [Annexe 7](#)). Les données cartographiques du modèle confirment la croissance volumétrique à l'horizon 2050 et 2070. D'après le scénario normal, les augmentations attendues sont les suivantes :

- Stockholm : 24 000 à 32 000 m³ d'ici 2050 et 37 000 à 49 000 m³ d'ici 2070
- Göteborg : 21 000 à 28 000 m³ d'ici 2050 et 32 000 à 42 000 m³ d'ici 2070
- Malmö : 16 000 à 21 000 m³ d'ici 2050 et 23 000 à 31 000 m³ d'ici 2070
- Uppsala : 14 000 à 18 000 m³ d'ici 2050 et 21 000 à 27 000 m³ d'ici 2070

C'est précisément dans ces zones de densification que les stations d'épuration (STEP) existantes risquent d'être saturées.

La métropole d'Uppsala a d'ailleurs récemment engagé de lourds travaux pour augmenter les jauges de traitement de sa STEP. Ce cas illustre parfaitement le défi d'ingénierie. Selon les projections démographiques communales (Befolkningsprognos), la ville prévoit de franchir le cap des 300 000 habitants d'ici 2050 [\[17\]](#), nécessitant la construction de 1 000 à 2 000 logements neufs par an. Cette hyper-croissance est formellement encadrée par l'accord d'infrastructure « Uppsalapaketen », liant l'État suédois et la municipalité, qui conditionne la création de 33 000 logements concentrés dans le nouveau pôle urbain de Södra staden et Bergsbrunna. Sur la base d'un ratio de planification strict de 2,1 habitants par logement, cette zone d'aménagement accueillera à terme environ 70 000 nouveaux résidents. Si cette population est raccordée à un réseau unitaire traditionnel, la charge polluante supplémentaire (particulièrement en azote) saturera inévitablement les capacités de la station d'épuration existante (Kungsängsverket).

La cartographie, accompagnée de la volumétrie, a pour conséquence d'être en capacité de cibler les zones critiques, où la pérennité des infrastructures de traitement existantes est incertaine.

3.2.2. La géographie des nutriments : corrélation urbaine et agronomique

La dernière partie de la méthodologie se concentre sur l'estimation, à partir des volumes déterminés, des masses récupérables d'Azote (N), de Phosphore (P) et de Potassium (K) en kilogrammes aux horizons 2050.

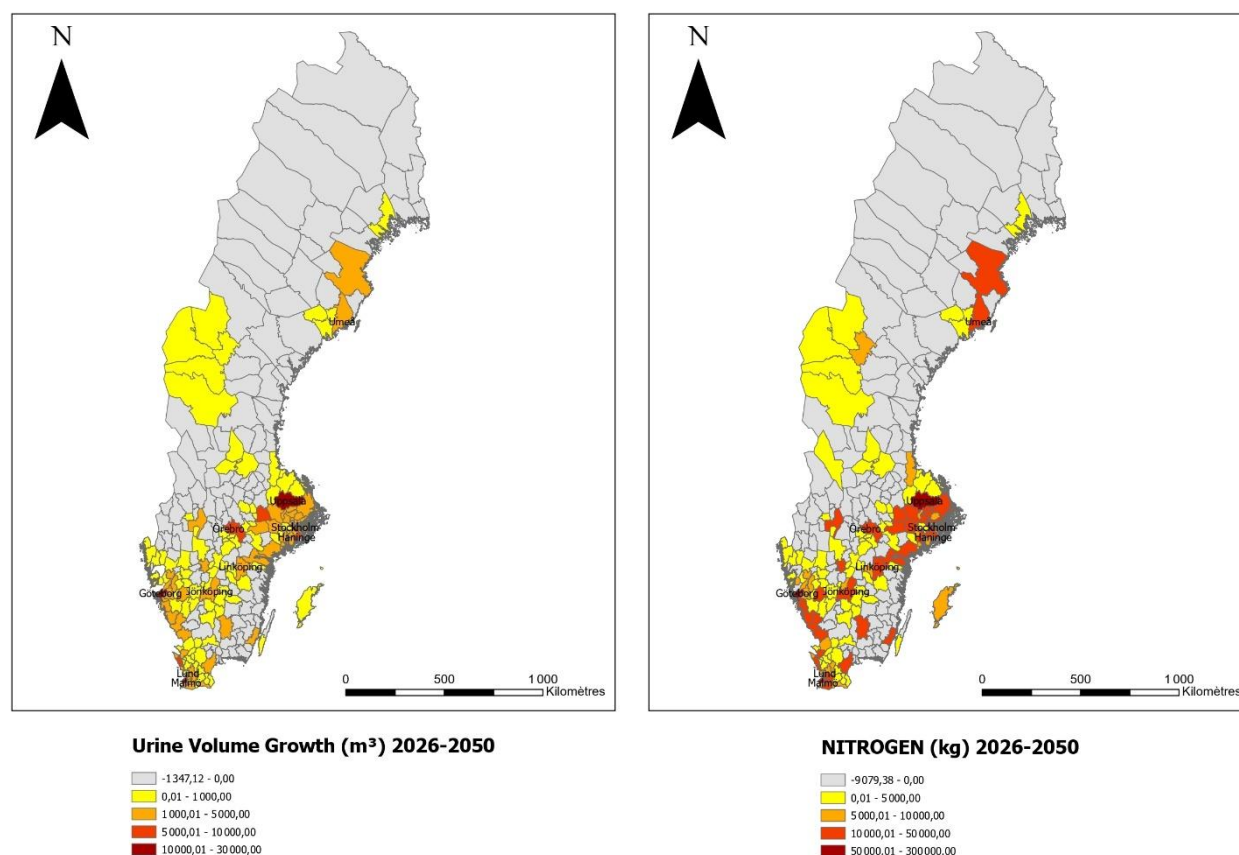


Figure 7 : Volume d'urine et masse d'azote par commune en 2050 comparé à 2026 en sommant les événements extérieurs, les stades et la croissance de la population (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

Les zones colorées en rouge et orange vif sur les cartes des nutriments (Figure 7) suivent les tendances démographiques. L'intégralité des cartographies prospectives pour les nutriments (N-P-K) aux horizons 2050 est regroupée en [Annexe 10](#). Les zones urbaines de Stockholm, Göteborg, Malmö, Uppsala ou encore Linköping montrent des masses de croissance significative. À titre d'exemple, le modèle projette une croissance de la ressource en azote atteignant près de 197 600 kg pour la municipalité de Stockholm et 151 600 kg pour Göteborg sur la seule période 2026-2050 (en scénario normal). Les gisements de nutriments découlant directement du volume d'urine, les hubs sont concentrés aux mêmes endroits.

3.3. Synthèse : Caractérisation des Macro-Hubs

3.3.1. Mise en évidence des points de convergence optimaux

La superposition analytique des trois strates modélisées au cours de cette étude (gisements événementiels éphémères, arénas fixes, et zones de forte croissance résidentielle) permet de

dégager une conclusion géographique. La Suède ne présente pas un potentiel de collecte diffus et inexploitable, mais s'articule autour de trois ou quatre super-structures, définies ici comme des Macro-Hubs de niveau métropolitain : le grand Stockholm, le pôle Göteborg, l'axe Malmö/Lund et la couronne d'Uppsala. Des cartographies du potentiel cumulé des Macro-hubs sont présentes en [Annexe 11](#). Ces pôles concentrent simultanément les plus grands stades du pays, les festivals majeurs, et la quasi-totalité de la croissance de l'habitat neuf.

Tableau 4 : Potentiel de collecte (scénario normal) d'ici à 2050 (Source : S. Bondkowski-malet, SLU 2026)

Ville / Macro-Hub	Gisement Évènementiel Plein air (m ³ /an)	Gisement Infrastructures fixes / Arénas (m ³ /an)	Gisement Résidentiel Domestique en 2050 (m ³ /an)	Potentiel de Collecte Cumulé 2050 (m ³ /an)
Stockholm	1 400 m ³	1 200 m ³	28 300m ³	30 900 m³
Göteborg	850 m ³	1 000 m ³	24 400 m ³	26 250 m³
Malmö	1 300 m ³	300 m ³	18 400 m ³	20 000 m³
Uppsala	110 m ³	40 m ³	16 000 m ³	16 160 m³

Le terme Macro-Hub est ici employé selon deux critères :

- Un volume élevé comparé au volume total.
- Une superficie basse comparée à la superficie totale du territoire étudié.

En ce sens, ces quatre communes réunies totalisent un volume supérieur à 93 000 m³ pour une superficie (hors plans d'eau) d'environ 3 000 km², tandis que l'ensemble de la Suède, d'après la méthode de calcul d'ici à 2050, comptabiliserait environ 254 000 m³ pour une superficie de 410 000 km². Cela implique que plus d'un tiers de l'urine est localisé dans 0,7 % du territoire suédois. De même, en prenant les ratios des zones urbanisées, c'est-à-dire en ne tenant compte que des territoires artificialisés, la superficie des quatre villes chute à 813 km², et sachant que 3 % du territoire suédois est urbanisé (SCB) [\[18\]](#), on obtient un ratio de 6,6 % du territoire urbanisé qui concentre un tiers du potentiel d'urine.

D'où, selon les critères et les ratios, ces communes sont considérées comme étant des Macro-Hubs à cibler en priorité.

3.3.2. La cartographie comme preuve de pertinence systémique

La création du SIG, et plus largement la cartographie du potentiel d'urine de ce territoire, agit non seulement en identificateur visuel des zones denses, mais aussi en argument d'analyse favorisant la collecte séparative dans ces macro-hubs plutôt qu'ailleurs. Les cartes démontrent par l'absurde que tenter de collecter l'urine dans les vastes zones rurales ou dans les communes du nord en décroissance démographique, serait un non-sens écologique en plus d'être un gouffre

financier : le coût économique et le coût carbone du transport par camion annuleraient instantanément les bénéfices.

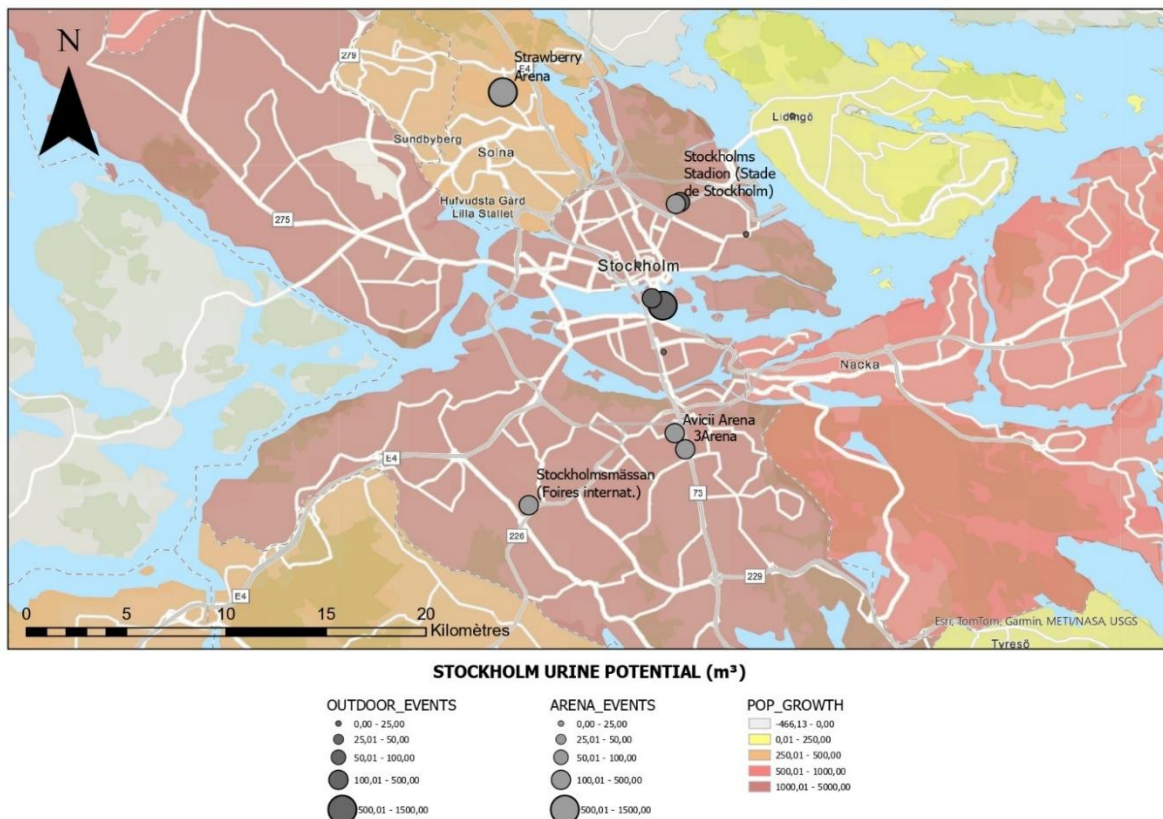


Figure 8 : Volumes d'urine de la commune de Stockholm en 2030 comparé à 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

En revanche, au sein des Macro-Hubs identifiés, la proximité (souvent quelques kilomètres) entre des centaines de milliers de donneurs d'urine (concentrés dans des stades ou des logements neufs) et les axes logistiques (routes, infrastructures de stockage et collecte) justifie pleinement l'effort de transition. Comme le montre la carte de Stockholm (Figure 8) d'ici à 2030, dans un avenir très proche, le potentiel serait déjà à près de 6 000 m³ d'urine par an, augmentant ensuite significativement jusqu'à 30 000 m³ en 2050. L'analyse cartographique permet ainsi de valider la pertinence de l'assainissement séparatif ciblé, non plus comme un idéal théorique qui devrait impérativement être implanté par soucis écologique, mais plutôt comme une solution liant réduction des coûts financiers et diminution des émissions de GES.

4. Perspectives et implications pour l'ingénierie urbaine de demain

L'analyse cartographique suédoise a montré que la ressource urinaire se concentre avec une forte intensité au sein de macro-hubs identifiables. Aussi, une ultime question doit être adressée : comment traduire cette pertinence géographique, en une stratégie de planification urbaine viable à long terme ? Il faut alors se pencher sur les possibilités d'intégration dans l'urbanisme réglementaire, identifier les contraintes du traitement in situ, tout en déterminant le gain economico-environnemental résultant.

4.1. Repenser la planification urbaine à travers la collecte ciblée

4.1.1. Intégrer l'assainissement circulaire dès la conception des projets d'aménagement

La viabilité économique de la séparation à la source repose quasi exclusivement sur l'optimisation des coûts d'investissement initiaux (CAPEX). Tenter de réhabiliter les réseaux souterrains unitaires des centres-villes historiques pour y insérer, en parallèle, un nouveau réseau séparatif par ouverture de tranchées présenterait des défis logistiques énormes. Les coûts financiers associés seraient considérables, sans même considérer l'impact écologique en matière d'émissions de GES. Aussi, la transition vers l'assainissement circulaire, si mise en place, doit être portée à travers une logique préventive et prospective pour adapter dès maintenant la construction neuve aux défis actuels et futurs. Cela passe par le traitement sur site de l'urine.

Les zones de forte croissance démographique, accueilleront dans un avenir proche de lourds projets immobiliers afin de répondre à la demande croissante de logements. Ces zones en métamorphose seraient alors idéales pour implanter dès le départ cette technologie. Dès les premières phases de conception des Zones d'Aménagement Concerté (ZAC), des nouveaux éco-quartiers ou lors de la construction de nouvelles infrastructures accueillant du public, le cahier des charges technique et environnemental doit imposer contractuellement la mise en place d'un réseau séparatif dédié à l'urine. Car l'étude menée porte uniquement sur le logement, mais la présence de populations implique la potentielle construction de bureaux et autres bâtiments qui peuvent eux aussi être adaptés. En intégrant l'installation de toilettes à séparation et le dimensionnement de cuves de stockage en sous-sol dès l'avant-projet, le surcoût lié à la modification des réseaux à posteriori est évité. L'anticipation semble être la clé de la rentabilité, pour lisser au maximum le CAPEX.

C'est pourquoi, cette anticipation de l'aménagement ne relève plus de la simple recommandation écologique, mais commence à s'inscrire dans les documents de planification stratégique. Afin d'éviter la saturation de ses infrastructures d'épuration et de maximiser la circularité, la commune d'Uppsala a d'ailleurs publié un document d'orientation politique et technique : le *Inriktningsbeslut för teknisk försörjning för de sydöstra stadsdelarna*. [19] Ce document acte la volonté de planifier une usine locale de traitement des ressources pour les futurs quartiers de Södra staden. Surtout, il mandate des études approfondies sur les conditions juridiques permettant d'y intégrer un système d'assainissement avec tri à la source (système MAC). [20] L'objectif d'une telle démarche institutionnelle est, à terme, de faire de ces réseaux séparatifs un nouveau standard d'urbanisme, ce qui contraindrait les promoteurs immobiliers privés à concevoir les immeubles avec des doubles réseaux de tuyauterie dès le dépôt du permis de construire.

4.1.2. La complémentarité entre réseau séparatif ciblé et réseau traditionnel existant

Ce changement de paradigme, épaulé d'un cadre réglementaire plus strict, ne doit pas non plus évincer les bénéfices du réseau « tout-à-l'égout » traditionnel, qui, amorti depuis des décennies,

conserve toute sa pertinence pour acheminer et gérer les grands volumes d'eaux grises (douches, lavabos, machines à laver) ainsi que les eaux vannes des tissus urbains anciens non adaptables.

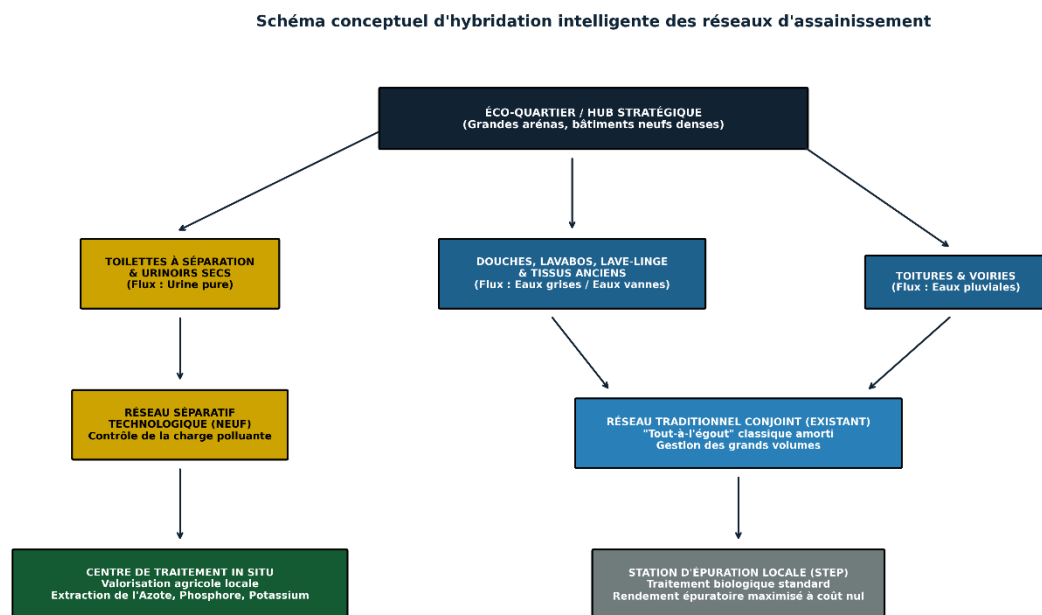


Figure 9 : Schéma d'hybridation des réseaux d'assainissement (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026, réalisé à l'aide d'un prompt demandant un code python à une IA pour créer le schéma dans Jupyter Notebook)

Le but du réseau séparatif est de cibler exclusivement la concentration de l'urine avant dilution pour être en mesure de la traiter efficacement au plus près de la source. En équipant uniquement les « hubs » stratégiques (grandes arénas, bâtiments publics, quartiers résidentiels neufs denses), on réduit de manière drastique la charge future globale arrivant à la station d'épuration locale. Cette complémentarité (Figure 9) fonctionnelle permet aux opérateurs publics de l'eau de conserver le rendement de la centrale tout en traitant l'azote autrement. Il y a donc une décharge de la masse d'azote en STEP (pour rappel l'urine contient 80 % de l'azote et 50 % du Phosphore) comparée à la mise en place d'un réseau traditionnel. En d'autres termes, la croissance de la population n'a presque pas d'impact sur la masse d'azote à traiter en centrale car celle-ci est gérée sur site.

4.2. Viabilité de la filière et défis de structuration technologique

4.2.1. Le nécessaire traitement in situ : de l'urine brute à l'engrais stabilisé

Le modèle développé projeté, à l'échelle de la Suède, un gisement potentiel total dépassant les 100 000 m³ d'urine à l'horizon 2050 dans les quatre Macro-hubs identifiés. Bien que ces volumes massifs soient regroupés, un défi physique demeure : l'urine humaine est composée à environ 95 % d'eau. Or, il semblerait qu'il soit préférable d'intégrer des cuves de stockage plutôt que de dédoubler les réseaux existants. Ainsi, pour évacuer cette urine, elle doit être transportée par flotte de camions vers des zones agricoles. Si ces camions circulent en permanence, le gain environnemental risque d'être réduit drastiquement.

Une condition de réussite réside donc dans le déploiement de solutions de traitement in situ (directement au pied de l'immeuble) pour réduire le volume de l'urine. D'autant que des instituts comme l'Eawag en Suisse ou SLU en Suède développent déjà des procédés compacts tels que la déshydratation alcaline pour concentrer l'urine. L'objectif de ces mini-usines est de transformer plusieurs milliers de litres d'urine brute liquide en quelques dizaines de kilogrammes de poudre inodore ou de concentré liquide riche en N-P-K.

Cette transition logistique vers la concentration ou la déshydratation alcaline au pied du bâtiment divise les contraintes opérationnelles. Le volume est divisé par dix, ce qui ferait chuter le volume total à 10 000 m³ annuels. Concrètement, cela signifie qu'au lieu de faire 2 400 trajets en camions citernes de 40 m³, la collecte ne nécessiterait que 240 trajets, soit en moyenne un tous les six jours dans chaque macro-hub. En éliminant le besoin de transporter de grands volumes d'eau, on substitue une logistique de transport de fluides lourde par une micro-logistique d'approvisionnement en réactifs. Les procédés de stabilisation (comme la déshydratation sur matrice de cendres ou de chaux, testés à l'échelle pilote en Suède par la start-up Sanitation360), requièrent l'apport régulier de consommables destinés à élever le pH au-delà de 12 pour inhiber l'enzyme uréase et empêcher la volatilisation de l'azote sous forme d'ammoniac.

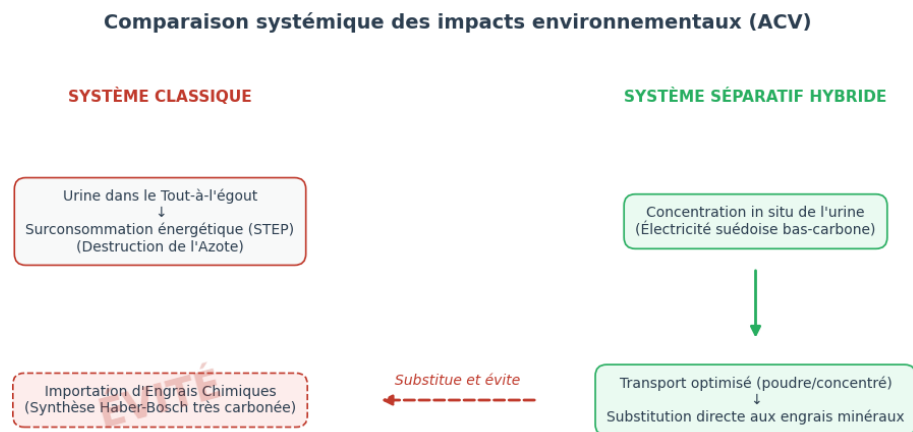


Figure 10 : Comparaison des systèmes d'assainissement (Source : Adapté de « Evaluation of new alternatives in wastewater treatment plants based on dynamic modelling and life cycle assessment (DM-LCA) », par Bisinella de Faria, A. B., Spérandio, M., Ahmadi, A., & Tiruta-Barna, L. (2015). *Water Research*, [21], réalisé à l'aide d'un prompt demandant un code python à une IA pour créer le schéma dans Jupyter Notebook)

L'exploitation des macro-hubs suédois impliquerait donc la mise en place de contrats de service standardisés pour assurer le traitement, la maintenance et la collecte. C'est cette réduction drastique du volume (et donc du coût logistique de transport) qui améliore la rentabilité globale du système.

Quant à la pertinence écologique de la séparation à la source, elle est validée par Analyse du Cycle de Vie (ACV), afin de s'assurer que le déplacement de la charge polluante ne se traduit pas par un transfert d'impact carbone négatif. Le modèle décentralisé proposé évite l'empreinte carbone massive de la fabrication des engrais azotés de synthèse et l'énergie de sur-ventilation nécessaire à la nitrification/dénitrification dans les bassins biologiques des STEP. En effet, les travaux récents d'Aliahmad et al. (2025) [22] de SLU démontrent que la concentration in situ (Scénario 4 de l'étude) émet globalement (transport compris) 43 kg CO_{2eq} / m³ tandis que le traitement traditionnel (Scénario 1 de l'étude) rejette en tout 143 kg CO_{2eq} / m³. Ainsi, le gain

net dû au traitement séparatif comparé au tout-à-l'égout serait de l'ordre de 100 kg CO_{2eq} / m³. A l'échelle des macro-hubs, cela représenterait 10 000 tonnes annuelles de CO_{2eq} évitées.

Néanmoins, il convient de préciser que ce gain est possible en raison d'un mix énergétique suédois décarboné (dominé par l'hydroélectricité et le nucléaire), ce qui minimise l'empreinte carbone opérationnelle des technologies de concentration thermique locales. De plus, l'analyse montre que le transport par camion d'un produit déshydraté (95 % de volume d'eau en moins) génère une empreinte kilométrique bien moindre par rapport aux rotations continues de camions-citernes qui auraient été requises pour de l'urine brute liquide.

4.2.2. Modèles économiques émergents : du traitement du déchet à la commercialisation

Historiquement, l'assainissement est perçu comme un service : l'utilisateur paie une taxe sur sa facture d'eau pour que la collectivité le débarrasse d'un déchet encombrant. La collecte ciblée de l'urine vient bousculer ce paradigme tout en garantissant le même service, mais en créant un bénéfice financier.

Les nutriments récupérés, une fois hygiénisés, stabilisés et certifiés, acquièrent une valeur marchande sous forme d'engrais (un secteur soumis à une forte tension géopolitique et à l'inflation). Le déploiement d'un tel dispositif soulève des questionnements au sujet des acteurs concernés et leur rôle respectif. Il faudrait donc composer entre les aménageurs et gestionnaires d'infrastructures (qui fournissent gratuitement le gisement primaire), les opérateurs logistiques ou start-ups (qui exploitent et maintiennent les process de déshydratation), et enfin les coopératives agricoles (qui achètent le fertilisant biosourcé). Les pouvoirs publics auraient ici un rôle de régulateur, et potentiellement, en amont, de catalyseur, notamment en subventionnant les installations de séparation. Toutefois, la viabilité économique d'un tel procédé repose sur l'évaluation des coûts OPEX et CAPEX économisés sur le traitement classique en station d'épuration, tout en estimant les nouvelles dépenses liées à l'assainissement circulaire.

En raison de sa nouveauté, l'assainissement circulaire peut se heurter à la critique de son coût d'investissement initial (CapEx). Le surcoût matériel pour équiper un logement neuf d'un réseau séparatif (toilettes spécifiques, double colonne de chute, et cuve de rétention au pied de l'immeuble) est aujourd'hui estimé à environ 2 250 € par logement. Si cette charge financière pèse initialement sur le promoteur immobilier, le véritable modèle économique de la séparation à la source se justifie à l'échelle macro-économique de la collectivité par l'évitement massif des coûts d'infrastructure.

En effet, pour faire face à la croissance démographique, la ville d'Uppsala a par exemple engagé des travaux d'agrandissement de sa STEP. Si la commune absorbe sa croissance prévue de 50 000 habitants (environ 25 000 logements d'ici 2050) de manière classique, la centrale devra pouvoir supporter 330 000 Équivalents-Habitants (EH). Pour le moment la première étape (sur trois) a coûté 270 millions de couronnes suédoises (SEK). La deuxième étape qui a été actée fin 2025 est estimée à 835 millions SEK et sera livrée d'ici 2033. [\[23\]](#) Puis, d'après les estimations faites par Naturvardsverket, l'étape 3 d'une centrale aussi large que celle d'Uppsala engendrerait entre 0,5 et 1 milliard SEK. [\[24\]](#) Cela porterait donc la somme totale d'investissement (CAPEX) dans une tranche comprise entre 1,6 et 2 milliards SEK, soit 145 à 190 millions d'euros. Ce montant n'inclut d'ailleurs pas les dépenses d'exploitation (OpEx) liées

à l'achat de réactifs chimiques (méthanol) et à la surconsommation d'énergie pour l'aération des bassins.

Le tri à la source inverse ce modèle. Tout d'abord, la construction progressive d'infrastructures décentralisées coûte environ 2,25 millions d'euros par an pour 1 000 logements, soit 56,25 millions d'euros sur les 25 ans. Ensuite, la mise en place de toilettes séparant l'urine du reste des eaux vannes n'a aucune incidence sur le reste du système d'assainissement. Dans cette logique hybride, les coûts de raccordements au réseau existant des nouveaux quartiers ne sont pas à prendre en compte dans ce calcul. Cependant, il convient d'estimer l'investissement lié aux « mini-usines » de traitement sur site. Si on centralise à l'échelle d'un quartier (ex : Svenskt Vatten), le CAPEX de celle-ci, en se fondant sur le système de l'usine RecoLab à Helsingborg [12] et le projet VUNA mené par l'Eawag [10], serait aux alentours de 60 millions d'euros. Le coût de fonctionnement pourrait quant à lui atteindre 500 000 euros par an (12,5 millions sur 25 ans) compte tenu des prix suédois de l'électricité. De plus, les dépenses dues à la collecte de l'urine sont également à chiffrer, mais devraient être marginales compte tenu du faible volume résultant de la déshydratation alcaline.

En somme, les investissements initiaux couplés aux coûts de fonctionnement donnent un léger avantage pour l'assainissement hybride (voir [Annexe 6](#)) :

- 145 à 190 millions d'euros en STEP (hors coût de fonctionnement)
- 130 millions d'euros en séparation à la source + Mini-usine

Il demeure important de préciser la nature incomplète de ce bilan, qui se contente d'être une estimation macro-économique des coûts (CAPEX/OPEX), afin d'élaborer une première idée de la viabilité économique d'un système hybride.

Par ailleurs, les volumes présents dans les stades pourraient bénéficier du même système, à la différence près qu'ils nécessiteraient une mini-usine à eux seuls. Les événements extérieurs, eux, ne sont pas sujets à des questions plus approfondies concernant les dépenses car les entreprises de location de toilettes portables collectent déjà les eaux usées par camion. L'installation de toilettes portables à séparation d'urine ainsi que la déshydratation in situ réduiraient simplement le nombre de camions.

4.2.3. Potentiel de substitution aux engrais de synthèse et balance agronomique territoriale

Pour valider la viabilité macroéconomique de la séparation à la source, le gisement d'azote, de phosphore et de potassium calculé dans les macro-hubs doit être confronté à la demande en engrais réelle des territoires. À l'échelle de la Suède, la dépendance aux engrais minéraux importés reste omniprésente.

L'intégration du gisement issu des événements, des stades et des écoquartiers ne vise pas à remplacer la totalité des importations. Par exemple, les besoins en 2022 en azote en Suède étaient de 360 000 tonnes. [25] Toutefois, en supposant que la totalité de l'urine suédoise annuelle est récoltée, sachant qu'il y a 10,66 millions d'habitants, ce qui représente 5,8 millions de m³, il serait possible de produire 40 800 tonnes d'azote, soit 11 % des besoins. En ce sens, la production d'azote et plus largement d'engrais grâce à l'urine ne vise pas à substituer

totalement les engrais importés. A l'image des macro-hubs ciblés, c'est dans une logique de ciblage que pourrait s'inscrire la valorisation des nutriments.

En effet, l'utilisation d'engrais ne se fait pas exclusivement en milieu rural, mais également en milieu urbain. La ville de Stockholm, un des macro-hubs identifiés, adopte une politique de végétalisation forte depuis de nombreuses années. Le principe consiste à conserver un équilibre entre terres minérales, végétales et aquatiques.

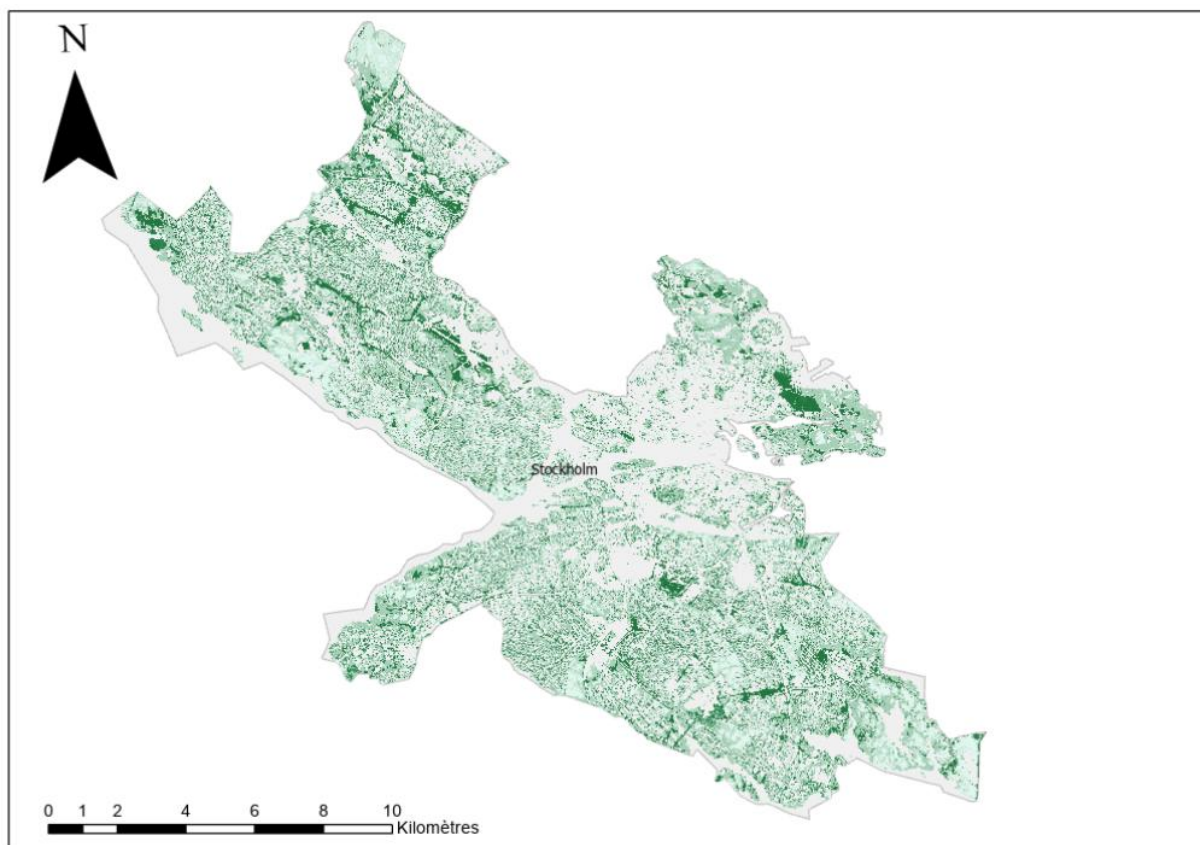


Figure 11 : terres végétales dans Stockholm (Source : carte adaptée des données cadastrales de l'Agence suédoise de protection de l'environnement [26])

Ainsi, selon cette approche de ciblage, il est pertinent de corrélérer les besoins en azote de la ville avec les volumes d'urine dégagés par l'étude des événements et les projections démographiques d'ici à 2050. D'où, sur la base des calculs (voir [Annexe 1](#)), les besoins associés aux surfaces identifiées (Figure 11) atteignent un peu plus de 90 tonnes d'azote par an pour Stockholm. La production d'azote issue de la collecte d'urine pourrait quant à elle avoisiner les 200 tonnes annuelles en 2050, soit le double de la masse nécessaire à l'entretien des espaces verts.

De même, les autres macro-hubs présentent des masses similaires en 2050 (voir [Annexe 5](#)) :

- Göteborg : 150 tonnes annuelles collectées pour 117 tonnes de besoins ([Annexe 2](#))
- Malmö : 80 tonnes annuelles collectées pour 67 tonnes de besoins ([Annexe 3](#))
- Uppsala : 70 tonnes annuelles collectées pour 23 tonnes de besoins ([Annexe 4](#))

Ensuite, sur la base du marché de revente de l'ammonitrate qui est un engrais composé à 33,5% d'azote se vendant environ 500 euros la tonne, [\[27\]](#) le prix de l'azote serait de 1 500 euros la tonne (juin 2026). Dès lors, une ville comme Stockholm utiliserait 90 tonnes pour les parcs et jardins et revendrait 110 tonnes. Le bénéfice net résultant de la souveraineté azotée de la ville s'élèverait à 300 000 euros (90 tonnes de dépenses évitées et 110 tonnes vendues), ce qui peut alors couvrir une partie des frais de fonctionnement des mini-usine de traitement.

Cet indicateur montre donc la pertinence des Macro-Hubs comme une source d'approvisionnement des villes afin d'acquérir une forme d'étanchéité face aux mouvements géopolitiques.

4.3. Bilan critique du modèle et reproductibilité

4.3.1. Le cadre réglementaire et jeux d'acteurs

La transition vers un assainissement circulaire tout comme la mise en œuvre d'une hybridation des réseaux dépend d'un jeu d'acteurs complexe, impliquant à la fois le tissu économique privé, les régies publiques de l'eau, les planificateurs urbains et les autorités de régulation à l'échelle nationale et européenne.

Sur le marché de l'évènementiel en extérieur, certaines entreprises de location de toilettes portables commencent à manifester un intérêt pour les prototypes équipés de systèmes de séparation à la source. L'adoption de ces cabines de collecte de l'urine permettrait aux opérateurs privés de réduire leurs rotations logistiques de vidange (divisé par 10). Les cartes présentées à 26 entreprises ont suscité l'intérêt des acteurs majeurs de la logistique liée aux événements extérieurs.

Néanmoins, au-delà des barrières techniques ou financières, le principal verrou au déploiement de la séparation à la source réside dans le cadre réglementaire. En Suède, comme dans la majorité de l'Union européenne, l'urine humaine demeure assimilée à un statut juridique d'effluent d'assainissement ou de déchet, limitant son application directe en agriculture en raison des contraintes liées aux boues d'épuration (Directive 86/278/CEE). [\[28\]](#)

Pour débloquer ce modèle, la transition vers des sous-produits stabilisés et déshydratés (poudre ou granulés) est indispensable pour viser une homologation de type AMM (Autorisation de Mise sur le Marché) ou une certification par l'organisme suédois de contrôle agricole (Jordbruksverket). [\[29\]](#) Le respect des normes de l'organisation suédoise de certification de l'économie circulaire (Spurv) [\[30\]](#) implique de garantir l'absence de pathogènes et de stabiliser le produit pour éviter les nuisances olfactives lors du stockage dans les cuves. De même, ces normes s'appliquent au processus d'épandage. Aussi, tant que les instances compétentes n'auront pas adressé ces sujets, la normalisation de la collecte de nutriments provenant de l'urine humaine fera face aux contraintes réglementaires.

Parallèlement, la pérennisation de ces systèmes séparatifs par l'habitat est portée par une volonté institutionnelle croissante, cherchant justement à anticiper ces évolutions normatives. La ville de Stockholm et son opérateur public étudient l'intégration de systèmes d'assainissement à tri à la source dans leurs nouveaux développements urbains, comme l'éco-quartier de Norra Djurgårdsstaden. Le chef des jardins de Stockholm a d'ailleurs montré un fort intérêt pour ce

type de projet, décrivant le besoin de trouver des solutions durables face à la pénurie d'engrais qui frappe le monde agricole. La ville n'a par exemple pas pu se procurer suffisamment de nutriments pour ce printemps et cet été, ce qui corrobore l'idée d'une demande existante à laquelle l'assainissement séparatif répond.

La dynamique émerge également à Uppsala, ce qui alimente les perspectives d'une évolution réglementaire ou du moins de nouvelles pressions, confirmant dans le même temps la pertinence d'un ciblage sur ce Macro-Hub. La municipalité inscrit des projets d'alternatives au sein de ses documents d'orientation politique, notamment pour le futur quartier de Södra staden, en s'appuyant sur les travaux menés à SLU.

En somme, si le cadre juridique actuel corrobore l'idée d'un frein limitant l'expansion de l'assainissement circulaire, les municipalités semblent adresser le sujet. Cela s'explique notamment par la volonté des grandes communes de réduire drastiquement leurs émissions GES. La ville d'Uppsala vise par exemple la neutralité carbone post 2030. [\[31\]](#) Ces objectifs environnementaux mettent ainsi en lumière des projets de valorisation des déchets tels que la collecte d'urine. Ils forcent la convergence d'intérêts entre des acteurs privés cherchant l'optimisation logistique, des chercheurs développant des processus de valorisation des déchets, et des régies publiques préparant leurs territoires aux standards de demain.

4.3.2. Limites de l'étude (incertitudes démographiques et comportementales)

Par ailleurs, au-delà des difficultés liées aux politiques publiques, ce sont les potentiels usagers qui peuvent faire preuve d'imprévisibilité ou de résistance au changement. Bien que l'outil de modélisation (basé sur l'extraction de la base de données Excel et la génération des cartographies SIG) soit méthodologiquement viable, il repose sur des projections à long terme (2050 voire 2070). Ces projections démographiques comportent inévitablement des marges d'incertitude.

De plus, l'algorithme de calcul (notamment les pondérations appliquées aux taux d'utilisation des toilettes et à la fréquentation des arénas) présuppose une adhésion parfaite et rationnelle des usagers. Or, le comportement humain peut s'avérer variable et parfois imprévisible. L'acceptabilité sociale, la bonne utilisation des toilettes à séparation par un grand public non sensibilisé, ou encore le risque de contamination du flux d'urine par d'autres déchets (papiers, tampons, produits d'entretien chimiques), sont des facteurs de risque technique. La méthodologie appliquée atteint alors ses limites, en supposant un fonctionnement indépendant des nuisances liées au comportement humain. Bien que les toilettes NoMix ne requièrent pas de changement d'usage, l'idée de la collecte séparative d'un déchet, possiblement odorant, suffirait à freiner la volonté de certains usagers.

4.3.3. Analyse critique de la démarche : difficultés rencontrées et solutions techniques apportées

La réalisation de ce modèle territorial, menée en autonomie à la SLU, et épaulé par Prithvi Simha ainsi que Sanitation360 a confronté ma démarche à des défis d'accès et de structuration de l'information. La première difficulté a résidé dans la phase de sourcing : trouver et collecter des données, hétérogènes et souvent non standardisées auprès d'organismes suédois publics et privés pour recenser les événements en extérieur ainsi que les stades suédois. La Suède n'étant

pas un pays très peuplé, comparé à la France par exemple, le nombre d'évènements extérieurs ou rassemblements dans les stades a vite contraint la recherche. Les larges festivités sont facilement identifiables sur les sites traitant de l'évènementiel, mais rapidement les chiffres de fréquentation chutent. S'en suit alors un cercle vicieux : plus l'évènement est « petit », plus il est dur à trouver et moins il y a d'informations à disposition. Toutefois, l'évaluation du potentiel issu des projections démographiques atteste finalement que le gisement ne dépend pas d'évènements ponctuels, au contraire, c'est dans la durée que la collecte devient significative.

De plus, la définition des coefficients de modélisation comportementaux, nécessaires pour convertir la présence humaine en volumes d'urine et en kilogrammes de nutriments N, P, K extractibles, a nécessité de longs échanges afin d'ancrer le modèle au plus proche de la réalité. Les compagnies de location de toilettes portables partenaires de Sanitation360 n'avaient d'ailleurs pas de chiffres ou tableaux permettant de corroborer ces hypothèses, augmentant ainsi l'incertitude. Enfin, l'étape de cartographie a demandé une forte autonomie étant donné que les chercheurs avec qui je travaillais n'étaient pas accommodés à ArcgisPro. Cette situation est arrivée suite à ma proposition de traiter la donnée ainsi, grâce à ma connaissance du logiciel. La création des rendus visuels m'a donc naturellement incombé, tout en poursuivant en parallèle les discussions autour des attentes des cartes avec mes collègues.

La validation de la modélisation soulève également des questionnements quant à sa viabilité. Le retour d'expérience est encore faible, la donnée étant inédite. Un exemple concret de collecte via le prototype de toilettes portables unisexes a été l'évènement de Valborg à Uppsala. Sur le site Ekonomikum, 20 m³ d'urine ont été récoltés lors de cette journée, en sachant que la moitié des sanitaires permettait la collecte. Le modèle réalisé prévoyait un peu moins de 50 m³. Seulement, la ville n'a mis à disposition que 40 m³ au total, impliquant donc que les jauges maximales ont été atteintes. Aussi, il n'est pas possible de conclure proprement si le modèle développé correspond à la réalité du terrain. L'unique leçon à tirer de cet essai émerge sur le plan de l'acceptabilité sociale ; les utilisateurs n'ont pas fait de distinction entre le système de collecte d'urine et les toilettes portables traditionnelles, ce qui représente un point particulièrement encourageant. Outre cet évènement, la viabilité du modèle s'améliorera au fil de sa mise en place en se nourrissant des retours d'expérience pour adapter les variables en fonction des conclusions liées à la mise en service des prototypes.

Au-delà de la seule étude de cas suédoise, le défi final qui s'est présenté à moi a été de conceptualiser plus largement le système de traitement hybride pour en évaluer sa reproductibilité. Cette confrontation aux réalités de la recherche de donnée et de la prospective territoriale a été le cœur de mon apprentissage, me forçant à développer des solutions de traitement de données géographiques.

4.3.4. Transposition de la méthode de ciblage (Hubs) à d'autres métropoles

Si cette étude s'est appuyée sur la Suède comme territoire test, en raison de ma présence à SLU, la méthodologie déployée peut être répliquée à d'autres territoires. La difficulté réside dans la collecte de données particulièrement chronophage. Ensuite, l'approche d'identification des « Macro-Hubs » par le croisement de données démographiques, évènementielles et infrastructurelles semble pouvoir être répliquée sur n'importe quel territoire.

Cela permet d'évaluer sensoriellement les zones à cibler. La carte offre une justification visuelle de ce qui semble évident, les grandes villes sont les hubs, tout en réservant des conclusions inattendues.

Conclusion

Le modèle centralisé traditionnel, dit du « tout-à-l'égout », se heurte aujourd'hui à des limites écologiques et infrastructurelles notables. L'augmentation de la pression démographique et l'étalement urbain satureront les stations d'épuration (STEP) existantes. De plus, ce système repose sur un non-sens agronomique et énergétique : il dilue l'urine dans de vastes quantités d'eau potable, pour ensuite dépenser une énergie considérable afin de détruire ses nutriments en station d'épuration, alors même que ces éléments pourraient substituer les engrais de synthèse importés et polluants.

Face à ce constat, la problématique interrogeait la pertinence d'une transition vers la collecte ciblée de l'urine pour les métropoles de demain. L'étude démontre que l'assainissement circulaire est une réponse non seulement pertinente, mais logistiquement et économiquement viable, à la condition stricte d'adopter une planification spatialisée. En effet, le déploiement d'un réseau séparatif diffus à l'échelle d'un territoire entier s'avèrerait être un gouffre financier doublé d'une aberration écologique, le coût carbone du transport annulant les bénéfices de la récupération des nutriments.

La viabilité de ce nouveau paradigme repose donc sur le ciblage géographique de gisements hyper-concentrés, les « Macro-Hubs ». La modélisation spatiale (SIG) menée sur le territoire suédois valide cette approche stratégique en s'appuyant sur trois axes fondamentaux :

- Les événements en extérieur génèrent des gisements éphémères correctes qui offrent une opportunité d'application immédiate grâce à la substitution des toilettes portables classiques par des systèmes à séparation.
- Les grandes infrastructures fixes, telles que les arénas sportives et culturelles, fournissent des volumes pérennes et concentrés au cœur des agglomérations.
- Les projections démographiques résidentielles (2026-2050) permettent d'identifier les zones de tension future où l'intégration de réseaux séparatifs dans les constructions neuves évitera la saturation des stations d'épuration.

L'analyse des données révèle une concentration de la ressource : plus d'un tiers du potentiel urinaire suédois se situe sur seulement 0,7 % de son territoire, regroupé autour des pôles de Stockholm, Göteborg, Malmö et Uppsala.

Toutefois, pour que la transition vers ces Macro-Hubs soit pérenne pour les métropoles de demain, elle doit s'accompagner d'une structuration technologique adéquate. Le modèle exige un traitement in situ, tel que la déshydratation alcaline, afin de diviser les volumes d'urine par dix et rendre la logistique de transport vers les zones agricoles rationnelle. De plus, il implique une hybridation des réseaux d'assainissement : les nouveaux écoquartiers collectent l'urine à la source pour alléger la charge polluante, tandis que le réseau traditionnel existant est maintenu pour la gestion des eaux grises et pluviales. De même, face aux barrières réglementaires, les acteurs locaux (municipalités, acteurs privés) pourraient contribuer à l'argumentaire valorisant la séparation à la source.

En définitive, en intégrant ces Macro-Hubs dès la conception de la ville de demain, une commune sera en mesure de créer des boucles locales de gestion des déchets, réduisant ainsi ses émissions GES, valorisant une denrée utile à l'agriculture et gagnant en souveraineté territoriale, tout en agissant sur les problématiques liées à la gestion de la ressource en eau.

Bibliographie

- [1] Larsen, T. A., & Gujer, W. (1996). Separate management of anthropogenic nutrient solutions (human urine) (NoMix). *Water Science and Technology*. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00560-4](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00560-4)
- [2] Beckinghausen, A., Odlare, M., Thorin, E., & Schwede, S. (2018). Nitrogen recovery from wastewater: Possibilities, competition with other resources, and adaptation pathways. *Sustainability*. https://www.researchgate.net/publication/339553165_From_removal_to_recovery_An_evaluation_of_nitrogen_recovery_techniques_from_wastewater
- [3] Cordell, D., Drangert, J.-O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- [4] Centre d'information sur l'eau (C.I.Eau). (2023). *La consommation d'eau domestique en France et en Europe*.
- [5] Maurer, M., Schwegler, P., & Larsen, T. A. (2003). Nutrients in urine: Energetic aspects of removal and recovery. *Water Science and Technology*. <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0011>
- [6] Lienert, J., Bürki, T., & Escher, B. I. (2007). Reducing ecotoxicity of pharmaceuticals in tile-drainage wastewater by source separation of urine. https://www.researchgate.net/publication/5961007_Reducing_Micropollutants_with_Source_Control_Substance_Flow_Analysis_of_212_Pharmaceuticals_in_Faeces_and_Urine
- [7] Senecal, J., Nordin, A., Simha, P., & Vinnerås, B. (2020). Hygiene aspect of treating human urine by alkaline dehydration. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.030>
- [8] Engrais Azoté pour la croissance des feuillages (légumes) : <https://fr.risso-chemical.com/product/high-nitrogen-npk-fertilizer/>
- [9] Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., & Zurbrugg, C. (2014). *Recueil des systèmes et technologies d'assainissement* (2e éd. révisée). Institut fédéral suisse des sciences et technologies aquatiques (Eawag). https://www.researchgate.net/publication/305991576_Compendium_des_systemes_et_technologies_d'assainissement_-_2e_edition_actualisee
- [10] Eawag. (2015). *Source separation of urine: A solution for sustainable nutrient management*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- [11] Saint-vincent de Paul : <https://www.chooseparisregion.org/news/saint-vincent-de-paul-paris-14th-new-kind-paris>
- [12] Helsingborg Stad. . *Oceanhamnen: The H⁺ project and RecoLab technical report*. Récupéré de <https://www.recolab.se/en/>
- [13] Organisation Mondiale de la Santé (OMS). (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater: Volume 4, Excreta and greywater use in agriculture*. Organisation Mondiale de la Santé. <https://www.who.int/publications/i/item/9241546859>

- [14] : Statistics Sweden (SCB). (2025). *Population projections by municipality 2024–2070*. Bureau central des statistiques de Suède. <https://www.scb.se/>
- [15] Johansson, M., Jönsson, H., Höglund, C., Richert Stintzing, A., & Rodhe, L. (2000). *Urine separation – Closing the nutrient cycle. Final report on the R&D project: Source-separated human urine – A future source of fertilizer for agriculture in the Stockholm region*. Stockholm Vatten. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/JOHANSSON%202000%20Urine%20Separation%20-%20Closing%20the%20Nutrient%20Cycle_0.pdf
- [16] Classement populations villes : <https://bostadsfakta.se/kommuner/solvesborg/>
- [17] Uppsala kommun. (2025). *Uppsala kommuns befolkningsprognos 2025–2050*. Récupéré de <https://www.uppsala.se/>
- [18] Statistics Sweden (SCB). (2021). *Land use in Sweden, by municipality*. Bureau central des statistiques de Suède. <https://www.scb.se/>
- [19] Uppsala kommun. (2024). *Inriktningsbeslut för teknisk försörjning för de sydöstra stadsdelarna*.
- [20] Système MAC : RISE (Research Institutes of Sweden). (2021). *MACRO – Mat i Cirkulära RObusta system : Slutrapport*. Récupéré de <https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/projekt/macro-mat-i-cirkulara-robusta-system>
- [21] Bisinella de Faria, A. B., Spérandio, M., Ahmadi, A., & Tiruta-Barna, L. (2015). Evaluation of new alternatives in wastewater treatment plants based on dynamic modelling and life cycle assessment (DM-LCA). *Water Research*, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.048>
- [22] Aliahmad, A., Simha, P., Vinnerås, B., & McConville, J. (2025). Comparative Environmental Assessment of Three Urine Recycling Scenarios : Influence of Treatment Configurations and Life Cycle Modeling Approaches. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c09248>
- [23] Source étape 2/3 de l'agrandissement de la centrale (835 millions SEK) : <https://www.uppsala.se/contentassets/c4aa060a68ea4dcbb695e7136b642eb7/protokoll-uppsala-stadshus-ab-2025-12-16.pdf>
- [24] Source de l'étape 3 entre 0,5 et 1 milliard de SEK : <https://www.naturvardsverket.se/490731/contentassets/5408c5e2928d421fafbafa70a30651e4/forslag-till-forfattningsandringar-till-foljd-av-eus-reviderade-avloppsvattendirektiv.pdf>
- [25] Statistics Sweden (SCB). *Näringsbalanser 2022*. Besoins en azote en 2022 : 356 233 tonnes : https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START_MI_MI1004/Naringsbalanser2/table/tableViewLayout1/
- [26] Naturvårdsverket. (2023). *Nationella Marktäckedata (NMD) - Données nationales d'occupation des sols*. Agence suédoise de protection de l'environnement.

[27] Pleinchamp.com (Cours des intrants) Prix ammonitrate (33,5% azote) : <https://www.pleinchamp.com/les-cours/intrants/19-ammonitrate-33-5>

[28] Conseil des Communautés Européennes. (1986). *Directive 86/278/CEE du Conseil du 12 juin 1986 relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture*. Journal officiel des Communautés européennes.

[29] Jordbruksverket. (2023). *Riktlinjer för användning av organiska gödselmedel och restprodukter i jordbruket* [Directives pour l'utilisation des engrais organiques et des coproduits en agriculture]. Statens jordbruksverk (Commission suédoise de l'agriculture).

[30] Svenskt Vatten. (2022). *SPURV - Svensk certifiering för källsorterade avloppsfraktioner*.

[31] Uppsala kommun & Viable Cities. *Climate City Contract 2030*. Viable Cities. Récupéré sur https://viablecities.se/wp-content/uploads/2023/11/EN_Viable_Cities_Klimatkontrakt_Uppsala.pdf

Annexes

Annexe 1 : Quantité d'azote selon le sol et les plantations Stockholm

Catégorie	Type d'espace vert	Besoins indicatifs en Azote pur par an (g / m²)	Surface (m²)	Besoin TOTAL (Ton)
	Jardinières	10,00		
	Massifs de fleurs	6,00		
Mesic grass-dominated land	Pelouses de parcs et Gazons d'ornement	7,00	5 058 700,00	35,41
Dry grass-dominated land	Pelouses extensives et Prairies urbaines	0,00	1 635 900,00	0,00
Mesic grass-dominated land			-	0,00
Mesic-moist grass-dominated land			11 819 300,00	0,00
Dry shrub-dominated land	Arbustes et Landes en ville	4,00	1 601 300,00	6,41
Mesic shrub-dominated land			2 655 700,00	10,62
Mesic-moist shrub-dominated land			3 287 600,00	13,15
Dry dwarf-shrub-dominated land			2 737 900,00	10,95
Mesic dwarf-shrub-dominated land			3 435 400,00	13,74
Mesic-moist dwarf-shrub-dominated land			2 522 500,00	10,09
Temporarily unstocked forest land on mineral soil	Zones forestières en régénération	4,00	67 000,00	0,27
Pine forest on mineral soil	Forêts urbaines et réserves naturelles	0,00	14 012 500,00	0,00
Spruce forest on mineral soil			2 704 100,00	0,00
Mixed coniferous forest on mineral soil			5 393 500,00	0,00
Coniferous forest mixed with broadleaves on mineral soil			11 394 000,00	0,00
Common broadleaved forest on mineral soil			11 445 900,00	0,00
Temperate deciduous forest on mineral soil			23 688 900,00	0,00
Common broadleaved forest with elements of noble broadleaves on mineral soil			7 448 000,00	0,00
Open mineral soil without vegetation (excluding glaciers or permanent snowfields)	Sols nus / Zones post-industrielles	0,00	1 103 000,00	0,00

TOTAL : 100.64 tonnes

Superficie de la commune de la couche ArcgisPro : 208,33 km²

Superficie de la ville : 188 km²

Soit l'équivalent de **90,82 tonnes** pour la ville seulement.

Annexe 2 : Quantité d'azote selon le sol et les plantations Göteborg

Catégorie	Type d'espace vert	Besoins indicatifs en Azote pur par an (g / m²)	Surface (m²)	Besoin TOTAL (Ton)
	Jardinières	10,00		
	Massifs de fleurs	6,00		
Mesic grass-dominated land	Pelouses de parcs et Gazons d'ornement	7,00	16 268 500,00	113,88
Dry grass-dominated land	Pelouses extensives et Prairies urbaines	0,00	4 522 900,00	0,00
Mesic grass-dominated land			16 268 500,00	0,00
Mesic-moist grass-dominated land			29 309 000,00	0,00
Dry shrub-dominated land	Arbustes et Landes en ville	4,00	5 839 700,00	23,36
Mesic shrub-dominated land			6 642 400,00	26,57
Mesic-moist shrub-dominated land			5 417 900,00	21,67
Dry dwarf-shrub-dominated land			9 330 800,00	37,32
Mesic dwarf-shrub-dominated land			10 106 300,00	40,42
Mesic-moist dwarf-shrub-dominated land			5 606 000,00	22,42
Temporarily unstocked forest land on mineral soil	Zones forestières en régénération	4,00	3 707 000,00	14,82
Pine forest on mineral soil	Forêts urbaines et réserves naturelles	0,00	58 191 600,00	0,00
Spruce forest on mineral soil			9 517 000,00	0,00
Mixed coniferous forest on mineral soil			7 343 100,00	0,00
Coniferous forest mixed with broadleaves on mineral soil			28 549 700,00	0,00
Common broadleaved forest on mineral soil			43 751 000,00	0,00
Temperate deciduous forest on mineral soil			31 956 000,00	0,00
Common broadleaved forest with elements of noble broadleaves on mineral soil			17 843 900,00	0,00
Open mineral soil without vegetation (excluding glaciers or permanent snowfields)	Sols nus / Zones post-industrielles	0,00		0,00

TOTAL : 300,46 tonnes

Superficie de la commune de la couche ArcgisPro : 463,55 km²

Superficie de la ville : 179,99 km²

Soit l'équivalent de **116,66 tonnes** pour la ville seulement.

Annexe 3 : Quantité d'azote selon le sol et les plantations Malmö

Catégorie	Type d'espace vert	Besoins indicatifs en Azote pur par an (g / m²)	Surface (m²)	Besoin TOTAL (Ton)
	Jardinières	10,00		
	Massifs de fleurs	6,00		
Mesic grass-dominated land	Pelouses de parcs et Gazons d'ornement	7,00	9 024 400,00	63,17
Dry grass-dominated land	Pelouses extensives et Prairies urbaines	0,00	2 630 900,00	0,00
Mesic grass-dominated land			9 024 400,00	0,00
Mesic-moist grass-dominated land			13 285 100,00	0,00
Dry shrub-dominated land	Arbustes et Landes en ville	4,00	818 500,00	3,27
Mesic shrub-dominated land			3 529 000,00	14,12
Mesic-moist shrub-dominated land			4 666 300,00	18,66
Dry dwarf-shrub-dominated land			558 000,00	2,23
Mesic dwarf-shrub-dominated land			2 410 500,00	9,64
Mesic-moist dwarf-shrub-dominated land			2 672 300,00	10,69
Temporarily unstocked forest land on mineral soil	Zones forestières en régénération	4,00	33 200,00	0,13
Pine forest on mineral soil	Forêts urbaines et réserves naturelles	0,00	2 098 500,00	0,00
Spruce forest on mineral soil			81 400,00	0,00
Mixed coniferous forest on mineral soil			122 800,00	0,00
Coniferous forest mixed with broadleaves on mineral soil			5 692 800,00	0,00
Common broadleaved forest on mineral soil			3 174 800,00	0,00
Temperate deciduous forest on mineral soil			4 799 200,00	0,00
Common broadleaved forest with elements of noble broadleaves on mineral soil			2 503 100,00	0,00
Open mineral soil without vegetation (excluding glaciers or permanent snowfields)	Sols nus / Zones post-industrielles	0,00		0,00

TOTAL : 121,91 tonnes

Superficie de la commune de la couche ArcgisPro : 159,39 km²

Superficie de la ville : 80,67 km²

Soit l'équivalent de **61,70 tonnes** pour la ville seulement.

Annexe 4 : Quantité d'azote selon le sol et les plantations Uppsala

Catégorie	Type d'espace vert	Besoins indicatifs en Azote pur par an (g / m²)	Surface (m²)	Besoin TOTAL (Ton)
	Jardinières	10,00		
	Massifs de fleurs	6,00		
Mesic grass-dominated land	Pelouses de parcs et Gazons d'ornement	7,00	41 797 700,00	292,58
Dry grass-dominated land	Pelouses extensives et Prairies urbaines	0,00	6 272 100,00	0,00
Mesic grass-dominated land			41 797 700,00	0,00
Mesic-moist grass-dominated land			61 279 000,00	0,00
Dry shrub-dominated land			2 525 800,00	10,10
Mesic shrub-dominated land	Arbustes et Landes en ville	4,00	7 239 000,00	28,96
Mesic-moist shrub-dominated land			5 262 400,00	21,05
Dry dwarf-shrub-dominated land			7 617 400,00	30,47
Mesic dwarf-shrub-dominated land			14 994 700,00	59,98
Mesic-moist dwarf-shrub-dominated land			7 929 200,00	31,72
Temporarily unstocked forest land on mineral soil	Zones forestières en régénération	4,00	144 924 000,00	579,67
Pine forest on mineral soil	Forêts urbaines et réserves naturelles	0,00	359 108 000,00	0,00
Spruce forest on mineral soil			215 165 000,00	0,00
Mixed coniferous forest on mineral soil			137 707 000,00	0,00
Coniferous forest mixed with broadleaves on mineral soil			68 961 500,00	0,00
Common broadleaved forest on mineral soil			158 147 600,00	0,00
Temperate deciduous forest on mineral soil			55 244 000,00	0,00
Common broadleaved forest with elements of noble broadleaves on mineral soil			47 993 900,00	0,00
Open mineral soil without vegetation (excluding glaciers or permanent snowfields)	Sols nus / Zones post-industrielles	0,00		0,00

TOTAL : 1 054,53 tonnes

Superficie de la commune : 2 245,33 km²

Superficie de la ville : 48,77 km²

Soit l'équivalent de **22,90 tonnes** pour la ville seulement.

Annexe 5 : Potentiel de fertilisation en 2050

Potentiel de fertilisation en 2050 (Source : Adapté de *Riktlinjer för användning av organiska gödselmedel och restprodukter i jordbruket*, par Jordbruksverket, 2023.)

Ville métropolitaine	Azote (N) issu de la croissance (kg)	Potentiel de fertilisation totale (Hectares équivalents blé/an)
Stockholm	197 629 kg	1 520 ha
Göteborg	151 627 kg	1 166 ha
Malmö	82 420 kg	634 ha
Uppsala	71 896 kg	553 ha

Annexe 6 : CAPEX/OPEX du système hybride

Tableau A.1 : Estimation des coûts d'investissement initial (CAPEX) pour 25 000 logements (50 000 hab.)

Composante de l'investissement	Estimation financière (SEK)	Explication de la base de calcul (Données RecoLab / NSVA)
Usine de traitement de l'urine	250 à 400 millions SEK	L'usine RecoLab (2 500 hab.) a coûté environ 40 M SEK. L'économie d'échelle pour une capacité 20 fois supérieure sur un seul site réduit le coût proportionnel (estimé à 5-8 M SEK par tranche de 1 000 hab.).
Réseau urbain (Tuyaux sous vide)	100 à 150 millions SEK	Coûts liés au creusement et au déploiement du double ou triple réseau de canalisations sous les voiries du quartier.
Équipement intérieur (Toilettes)	250 à 500 millions SEK	Surcoût d'installation à la charge des promoteurs immobiliers (double plomberie, toilettes séparatives ou sous vide) estimé entre 10 000 et 20 000 SEK par logement par rapport aux standards habituels.
CAPEX TOTAL ESTIMÉ	600 M à 1,05 milliard SEK	Équivalent financier estimé entre 53 et 93 millions d'euros.

Helsingborg Stad. . *Oceanhamnen: The H+ project and RecoLab technical report.* <https://www.recolab.se/en/>

Nordvästra Skånes Vatten och Avlopp (NSVA). . *Tre rör ut : Erfarenhetsrapporter.* <https://nsva.se/mitt-vatten/avlopp/tre-ror-ut/>

Tableau A.2 : Estimation des coûts de fonctionnement annuels (OPEX) pour l'usine de traitement décentralisée

Poste de dépense	Estimation annuelle (SEK)	Explication de la base de calcul (Données Eawag / SLU)
Besoins énergétiques (Évaporation)	2 millions SEK	Les pompes à chaleur industrielles modernes consomment entre 50 et 75 kWh/m³. Pour 75 m³/jour, la consommation atteint 2 GWh/an. Calcul indexé sur le prix industriel en zone SE3 (incluant taxes réseau) à 1 SEK/kWh.
Consommables et Masse salariale	3 à 4 millions SEK	Achats réguliers de chaux ou d'acide (nécessaires pour bloquer l'évaporation de l'ammoniac, maîtriser les odeurs et retenir l'azote) et rémunération de 1 à 2 techniciens à temps plein.
OPEX TOTAL ANNUEL	5 à 6 millions SEK	Équivalent financier estimé entre 450 000 et 530 000 euros par an.

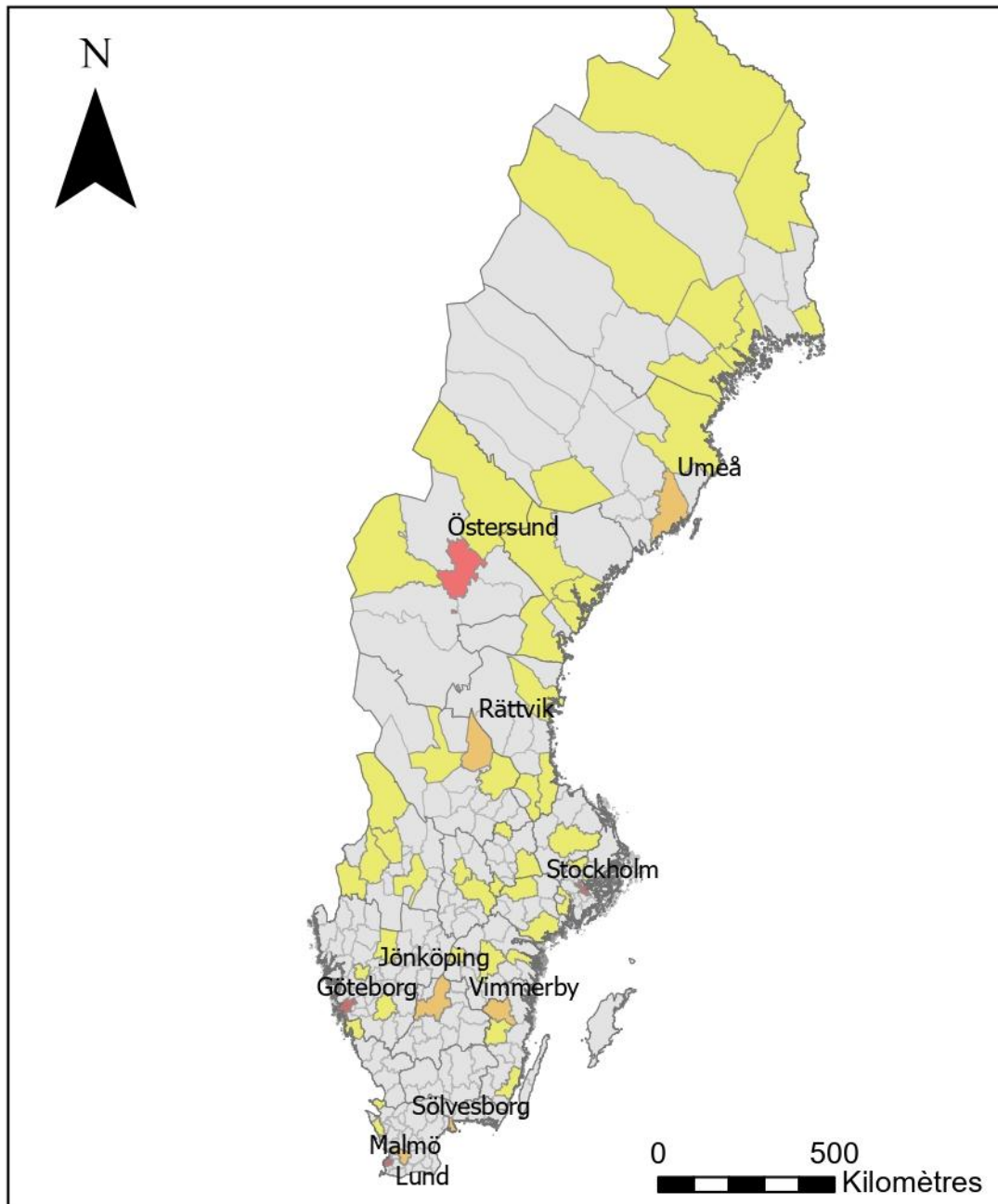
Larsen, T. A., Lienert, J., & Joss, A. : *Source separation and decentralization for wastewater management*. Institut Fédéral Suisse des Sciences et Technologies de l'Eau (Eawag). <https://www.eawag.ch/en/departement/eng/projects/vuna/>

Sanitation360. . *Sanitation360 : Alkaline dehydration technology*. <https://sanitation360.se/>

Simha, P., Senecal, J., Nordin, A., Arbeau, K., & Vinnerås, B. . Alkaline dehydration of source-separated fresh human urine: Preliminary insights into using different dehydration temperature and media. *Water Research*.

Vuna GmbH. . *Aurin : Commercial spin-off and distillation systems*. <https://www.vuna.ch/>

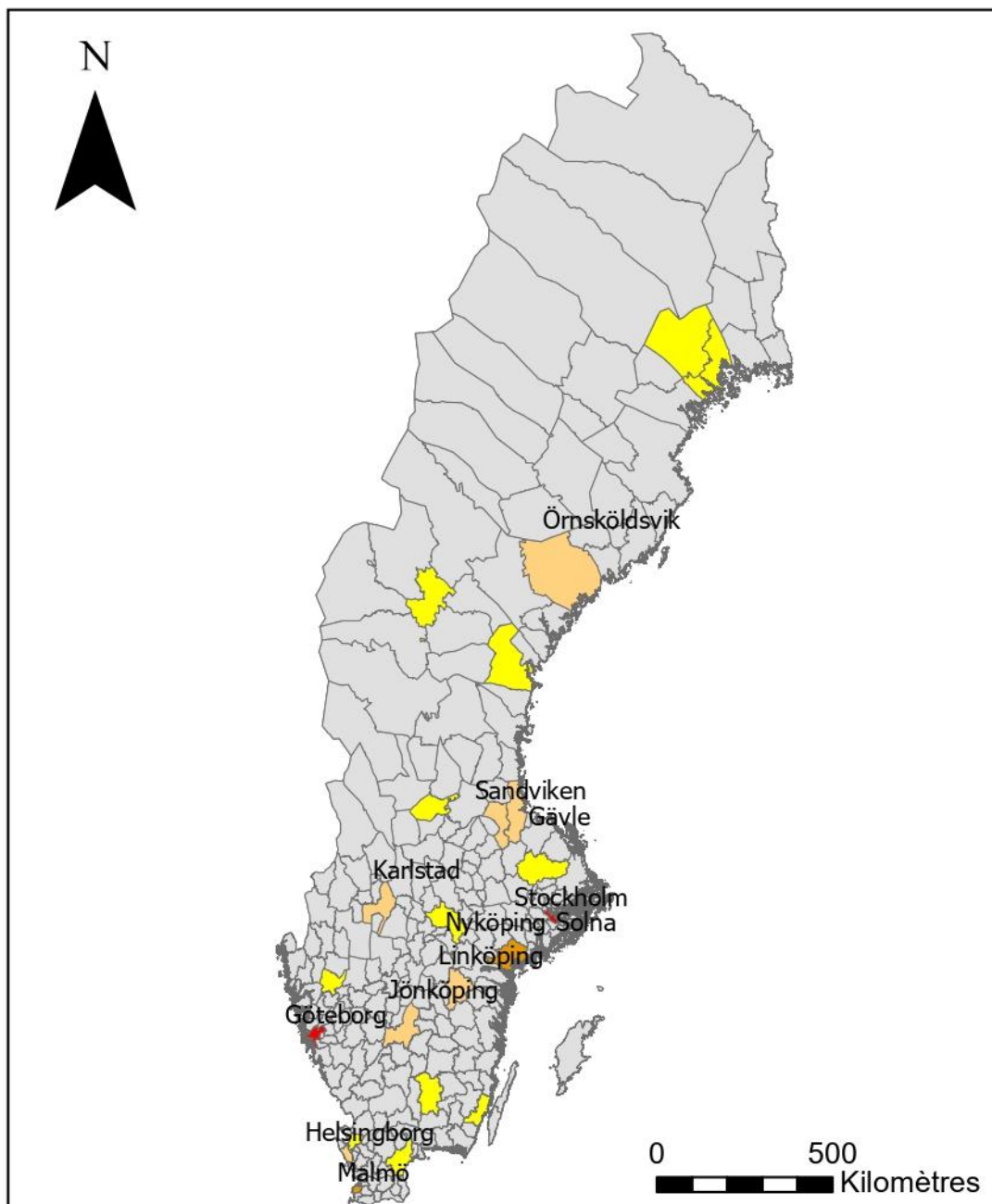
Annexe 7 : Volumes d'urine annuels



Urine Volume in Events (m3)



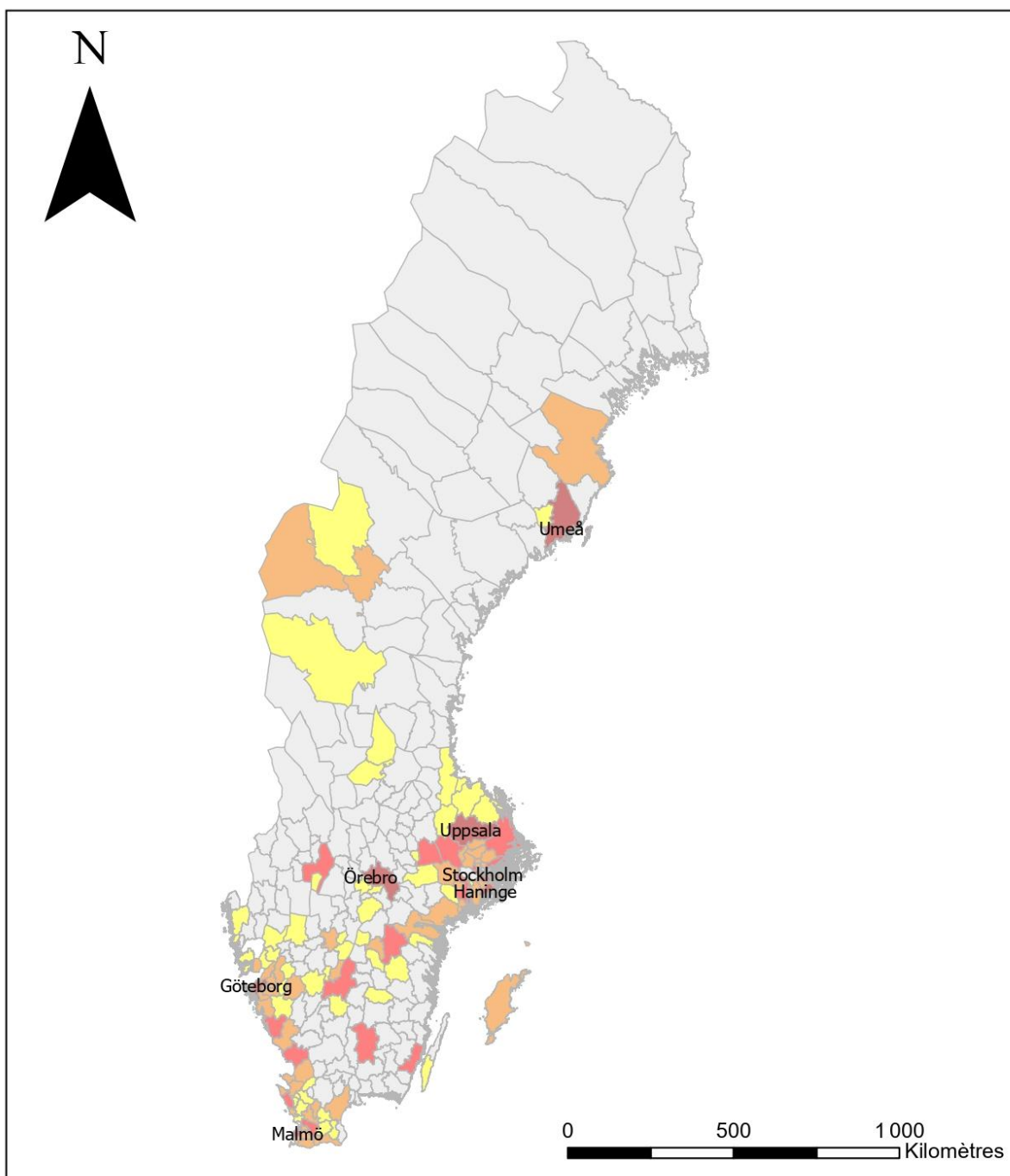
Volume d'urine par commune dans les événements extérieurs en 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)



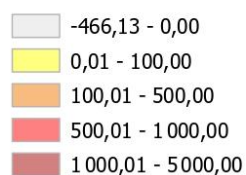
Urine Volume in Arenas (m3)



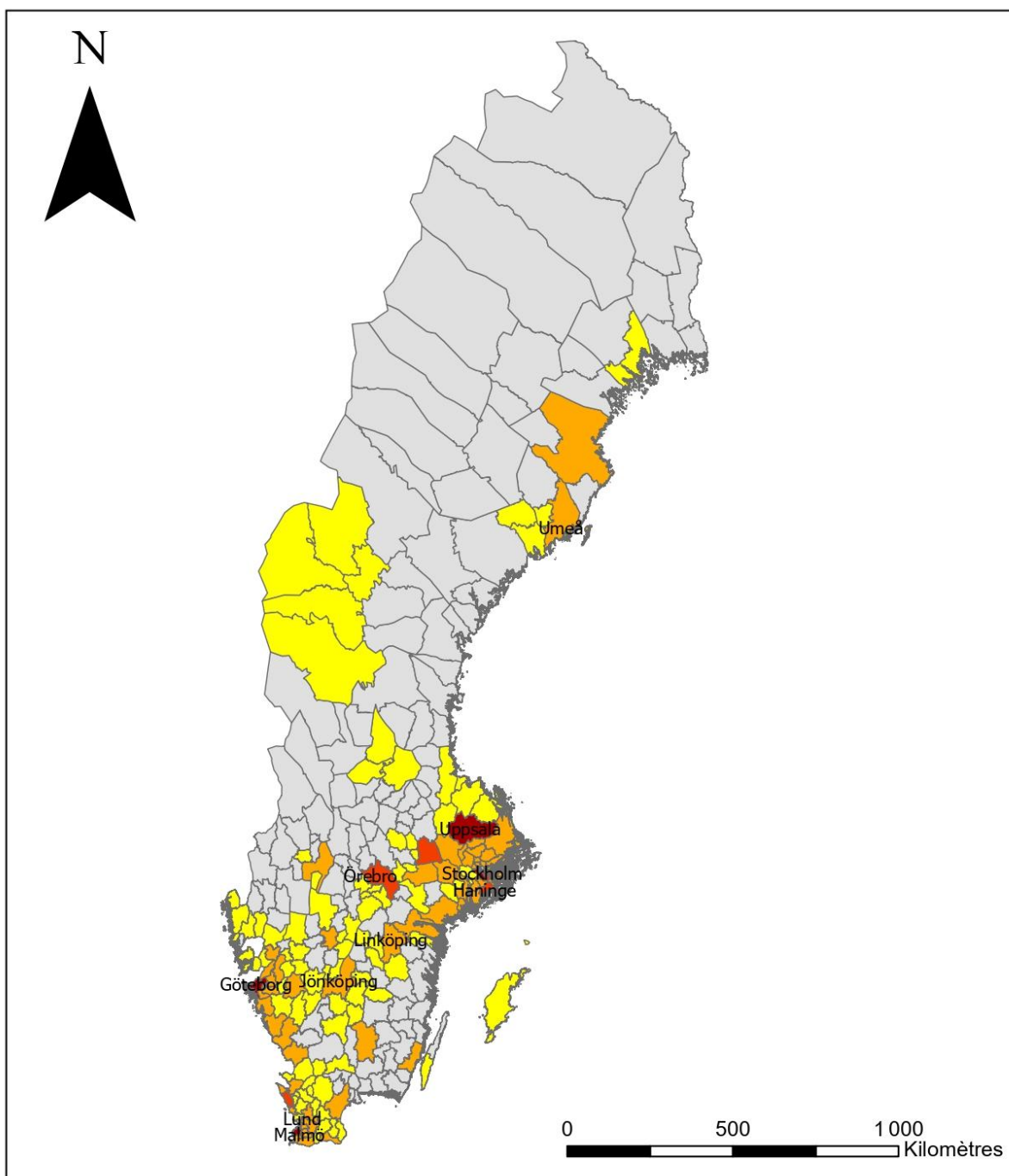
Volume d'urine par commune dans les stades suédois en 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)



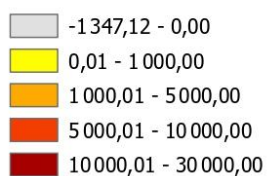
Urine Volume Growth (m³) 2026-2030



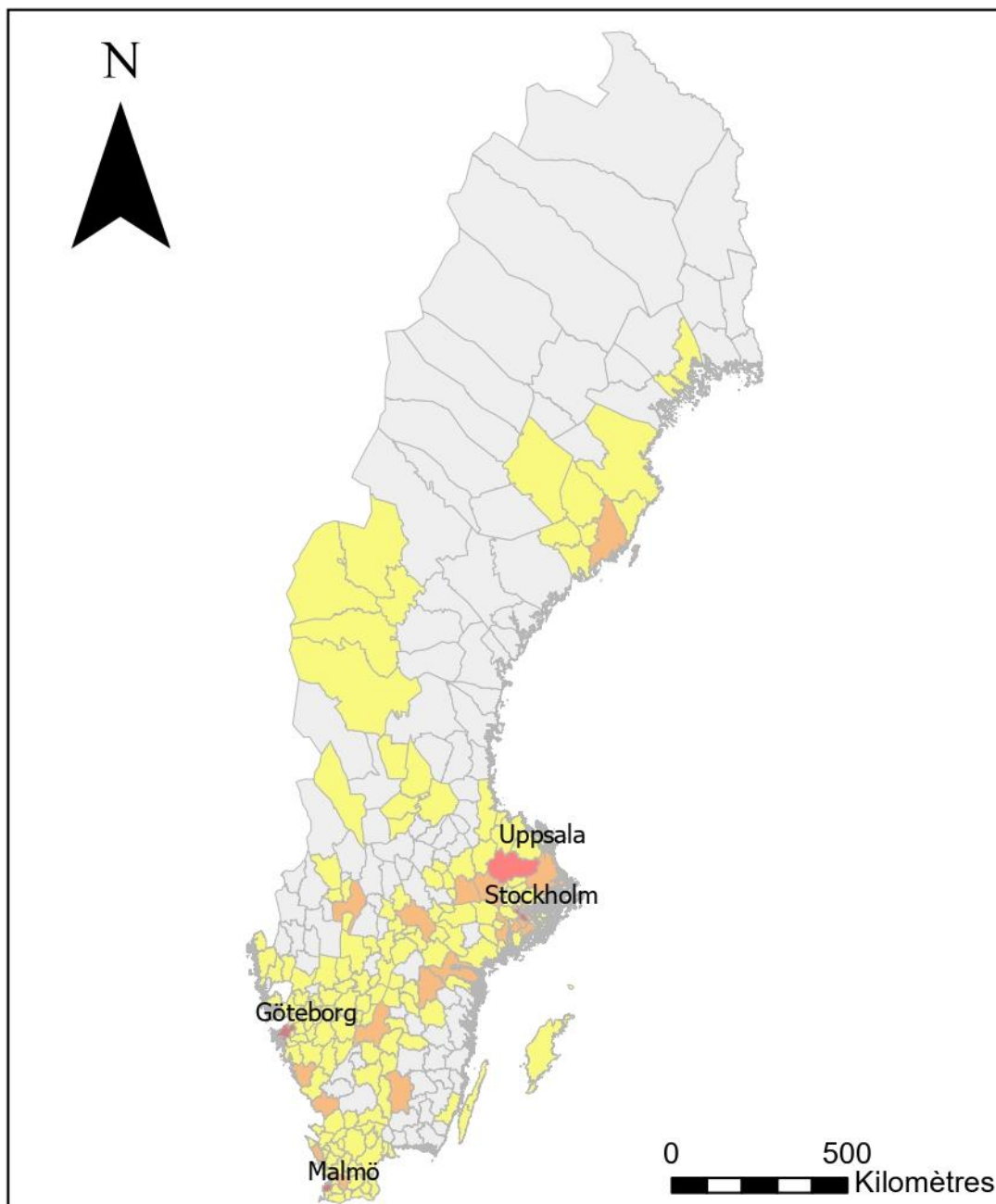
Volume d'urine par commune en 2030 à collecter en sommant les évènements extérieurs, les stades et la population additionnelle par rapport à 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)



Urine Volume Growth (m³) 2026-2050



Volume d'urine par commune en 2050 à collecter en sommant les événements extérieurs, les stades et la population additionnelle par rapport à 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

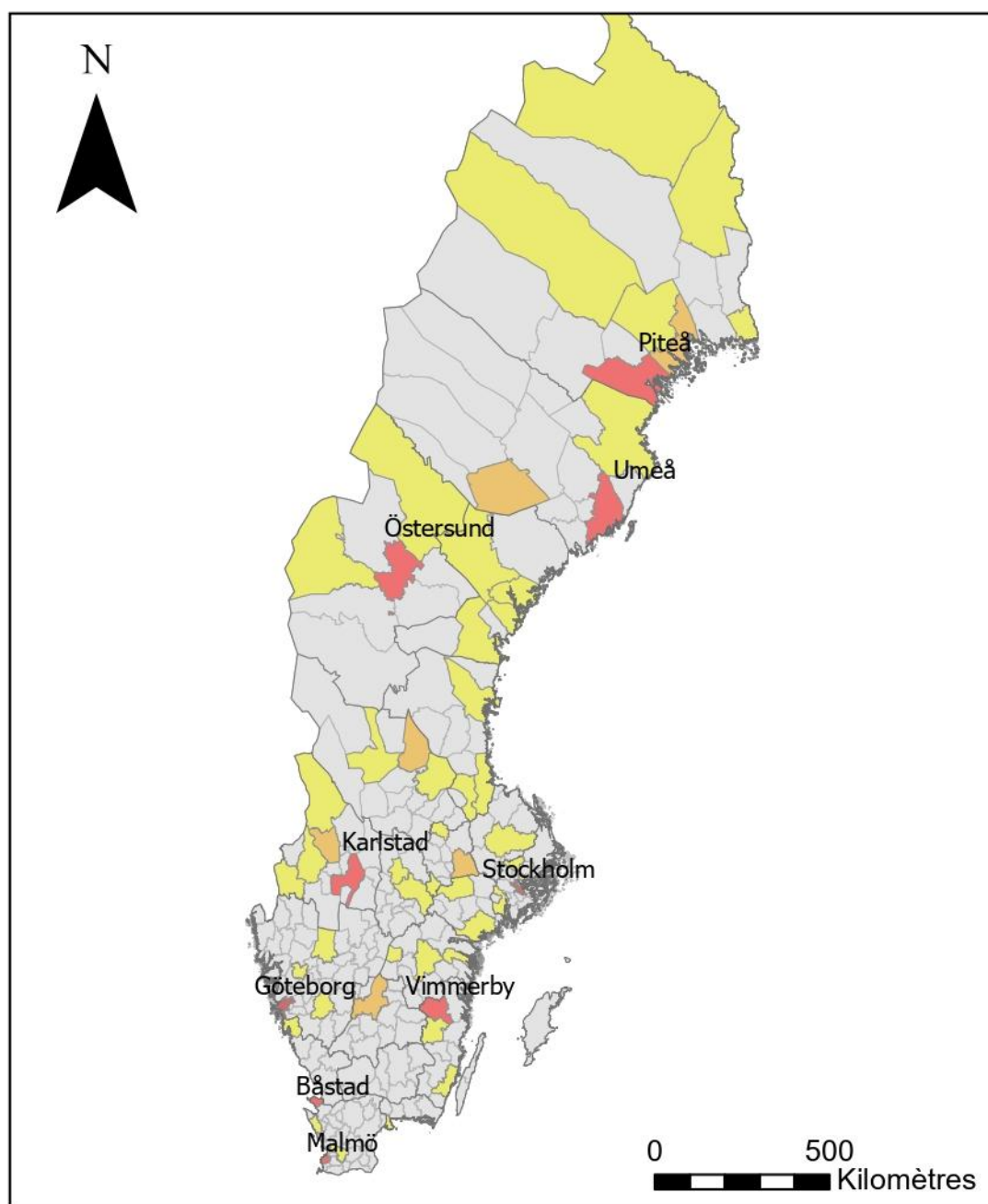


Urine Volume Growth 2026-2070



Volume d'urine par commune en 2070 à collecter en sommant les événements extérieurs, les stades et la population additionnelle par rapport à 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

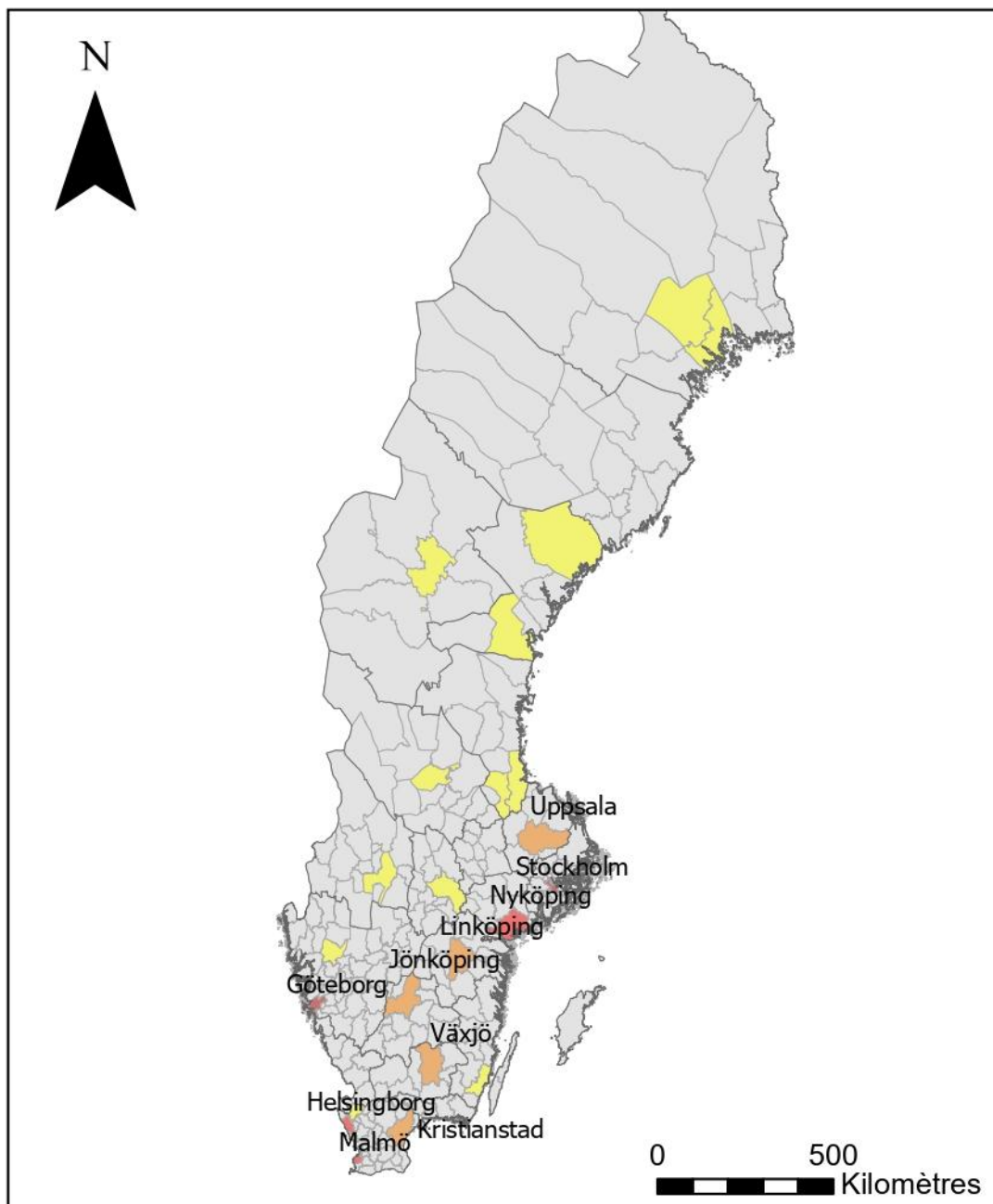
Annexe 8 : Nombre d'évènements annuels



Number of Event days



Nombre de jours d'évènements extérieurs par commune en 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

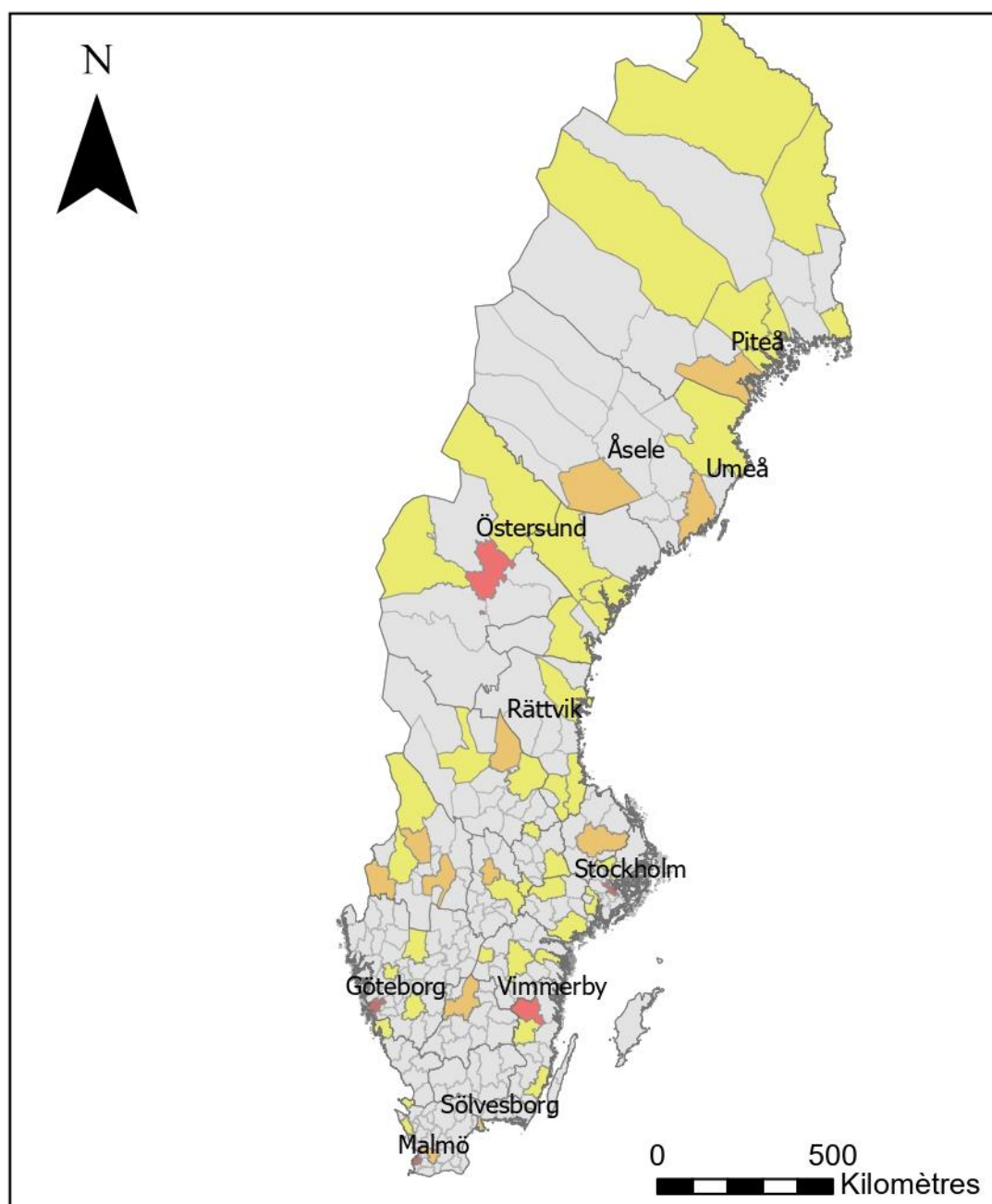


Number of Event days in Arenas



Nombre de jours d'évènements par commune dans les stades suédois en 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

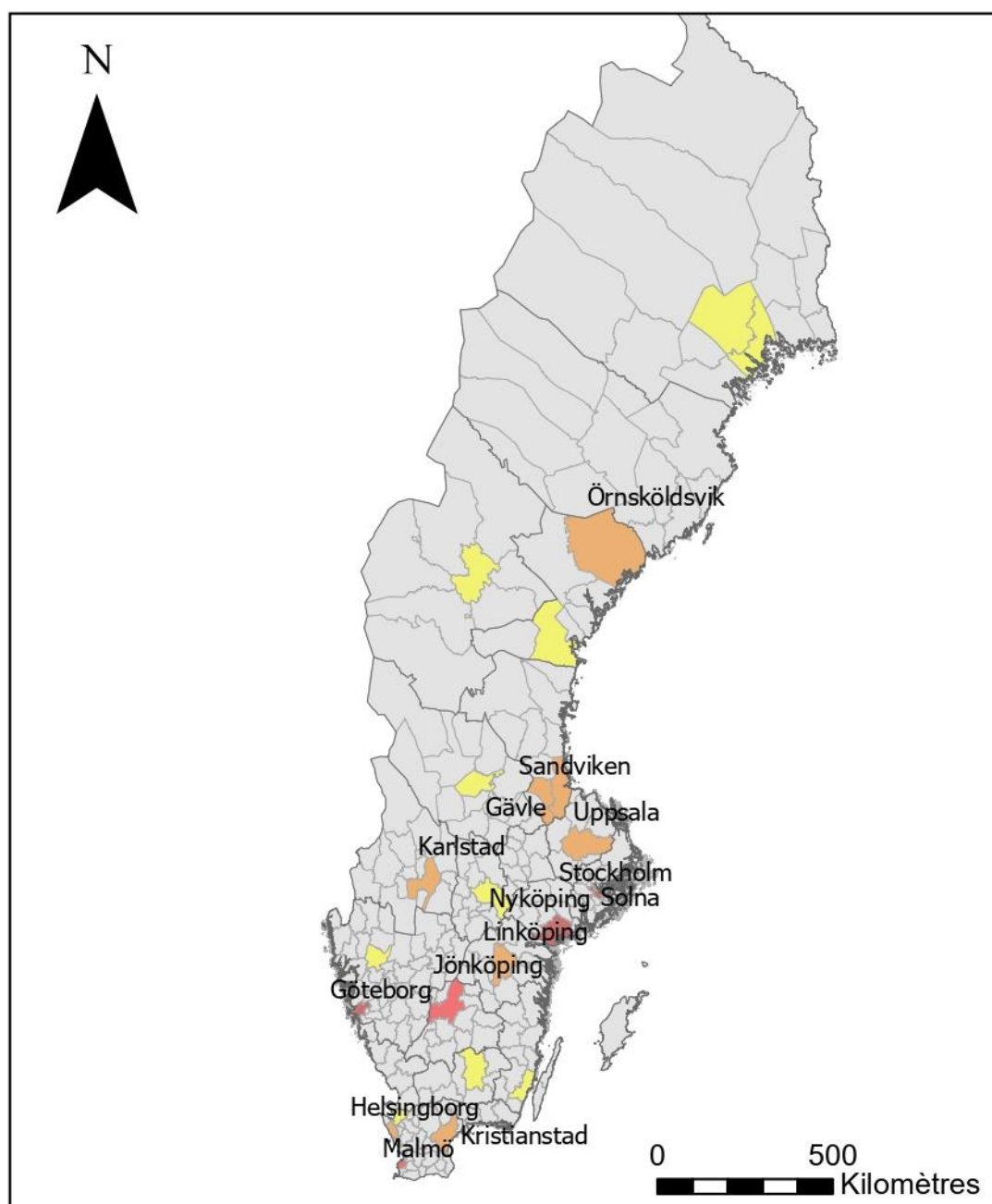
Annexe 9 : Nombre de personnes recensées



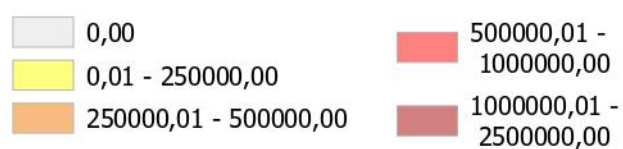
Number of people in Events



Nombre de personnes recensées dans les événements extérieurs par commune en 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

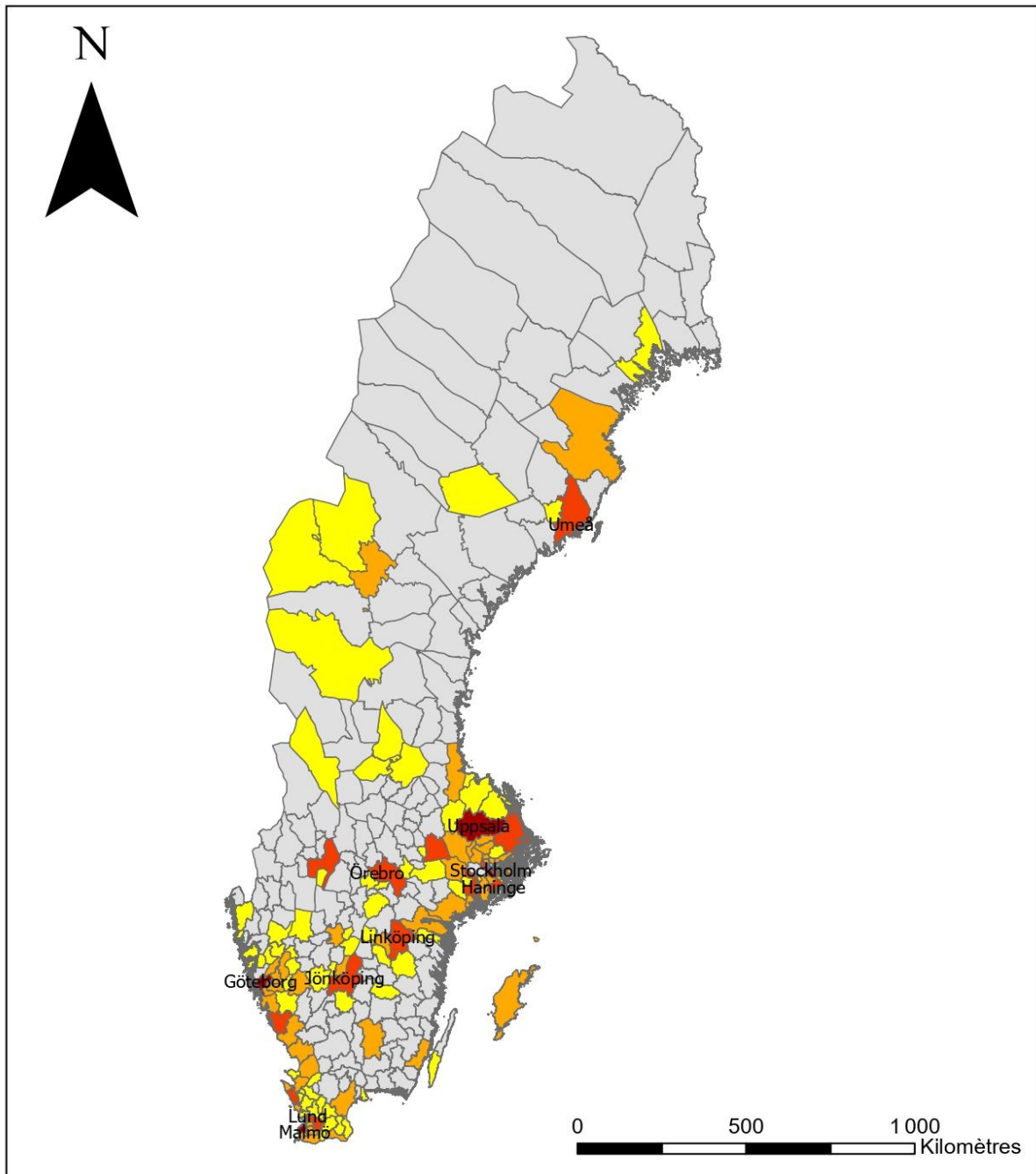


Number of people in Arenas

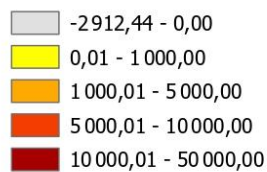


Nombre de personnes recensées dans les évènements des stades par commune en 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

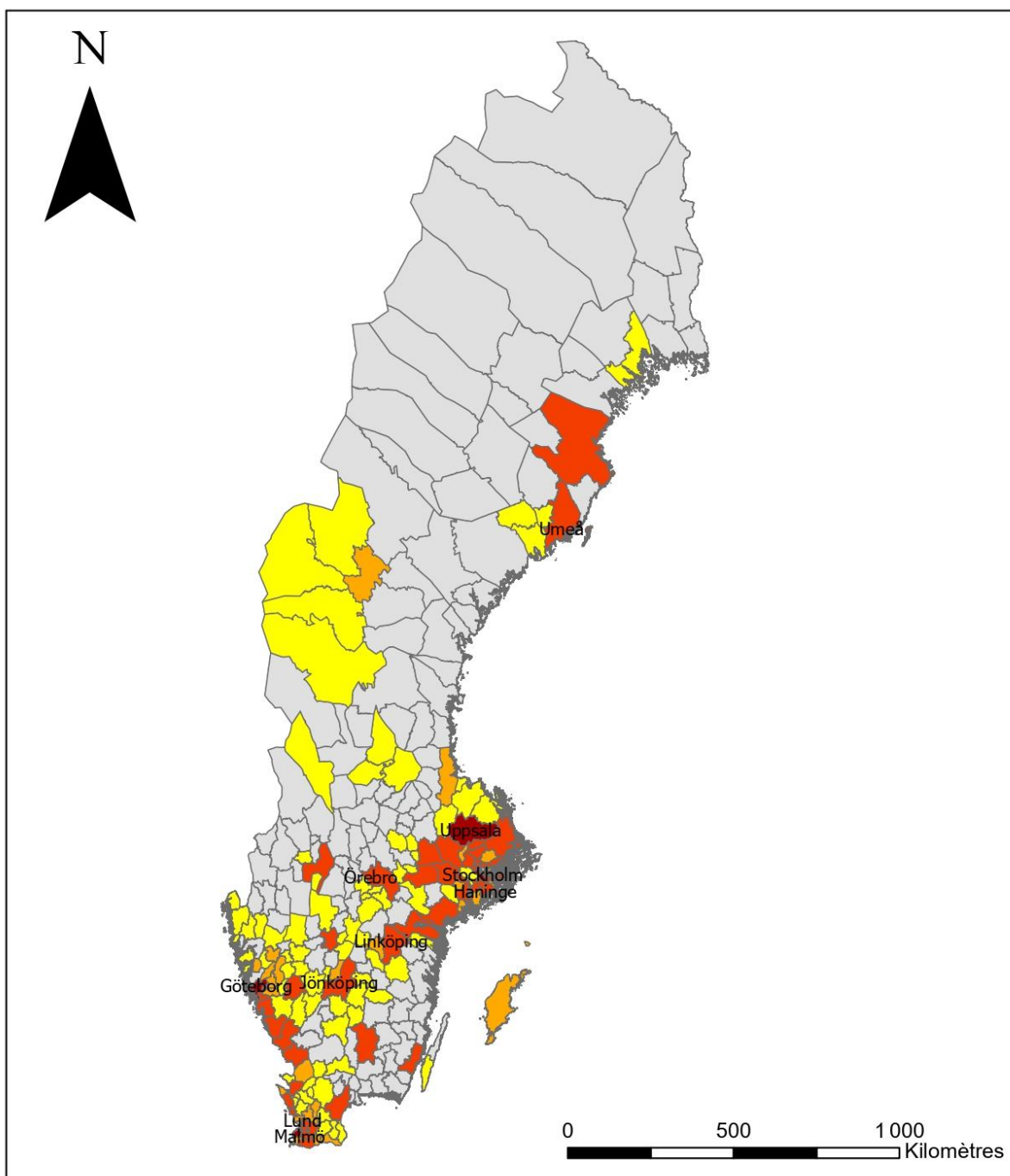
Annexe 10 : Masse de nutriments N-P-K



NITROGEN (kg) 2026-2030



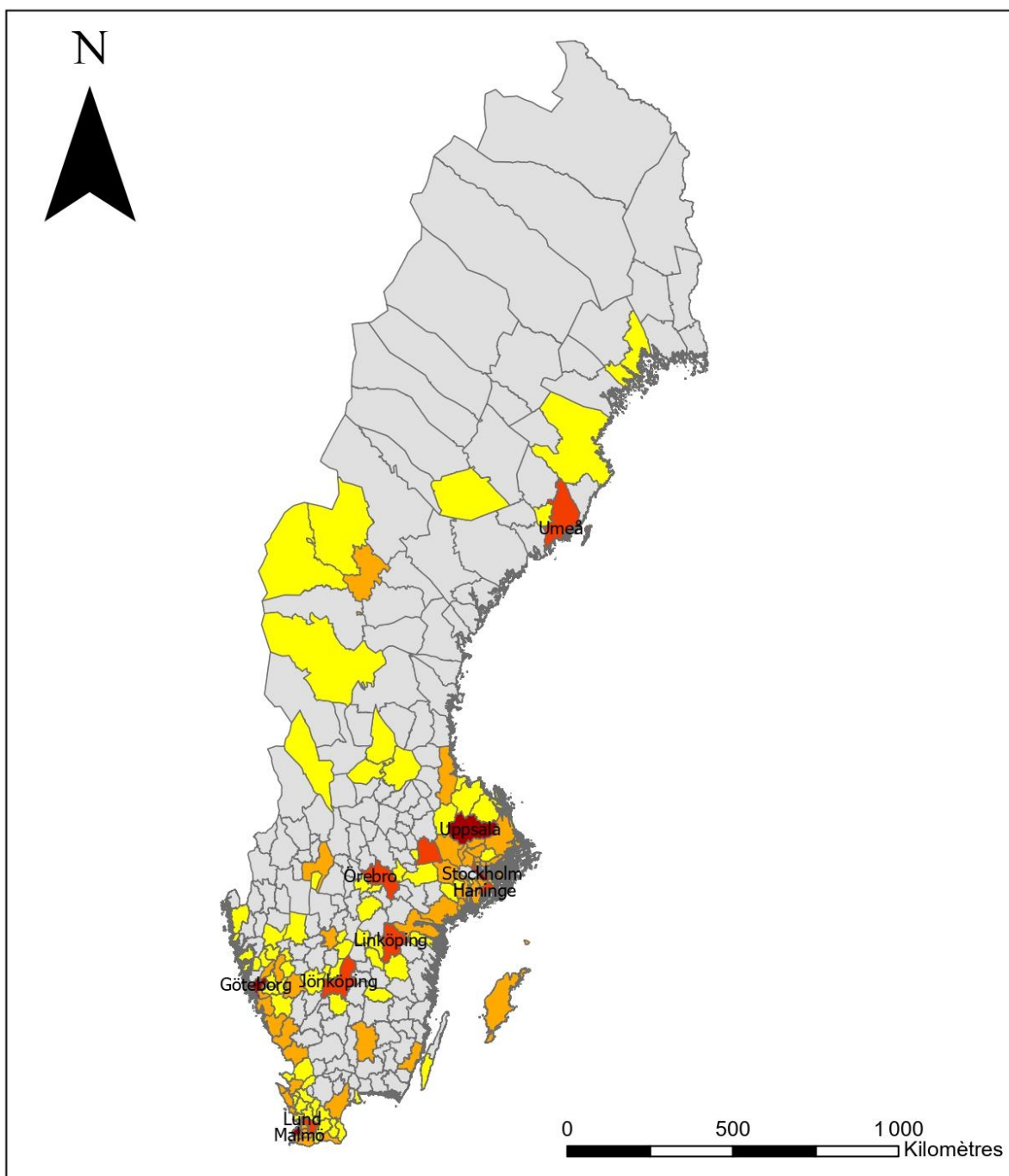
Masse d'azote par commune en 2030 à collecter en sommant les événements extérieurs, les stades et la population additionnelle par rapport à 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)



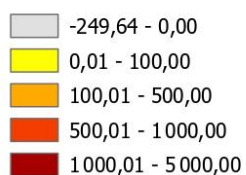
NITROGEN (kg) 2026-2050



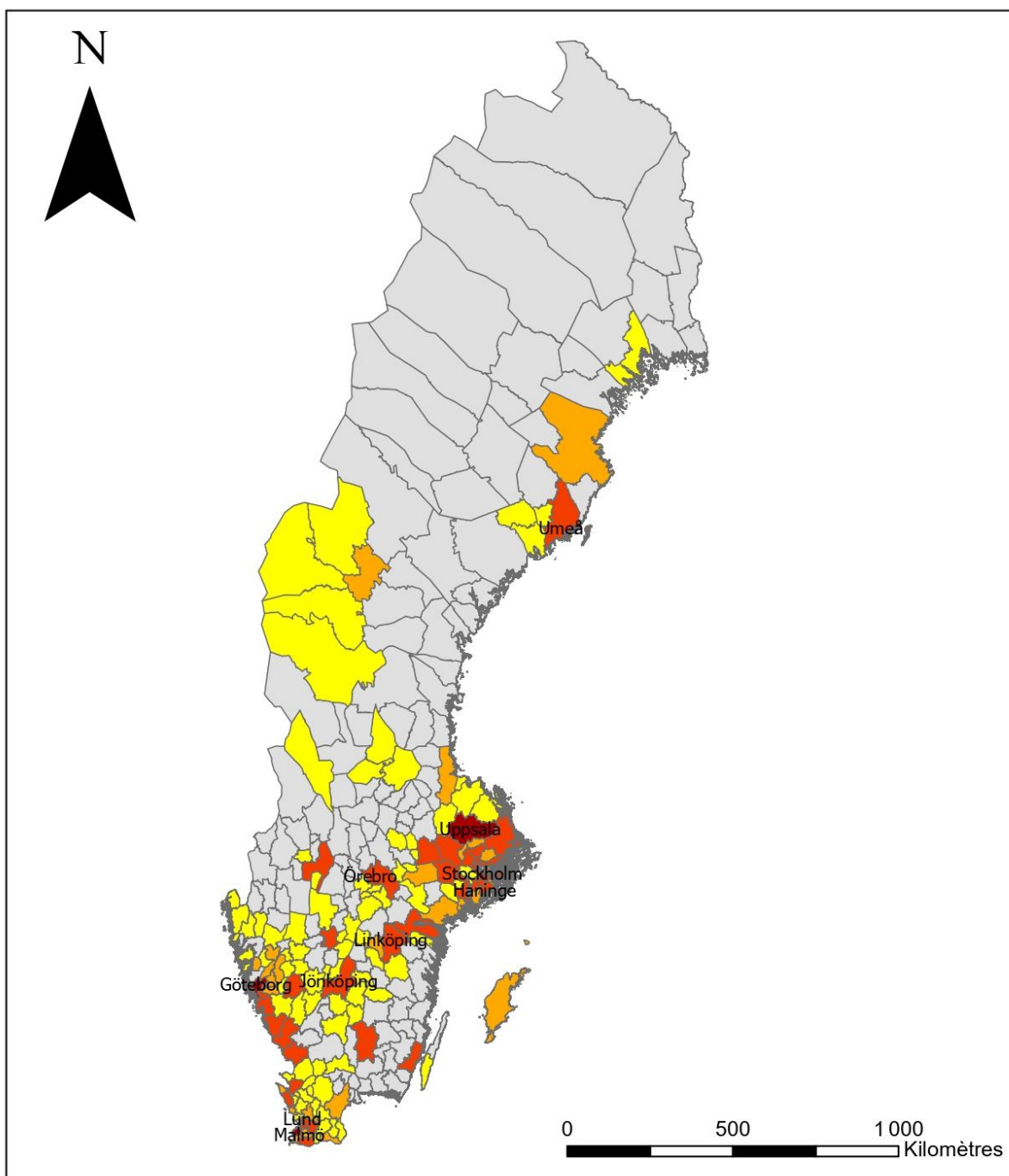
Masse d'azote par commune en 2050 à collecter en sommant les événements extérieurs, les stades et la population additionnelle par rapport à 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)



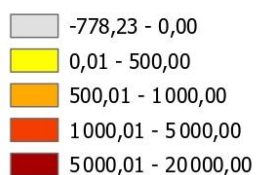
PHOSPHORE (kg) 2026-2030



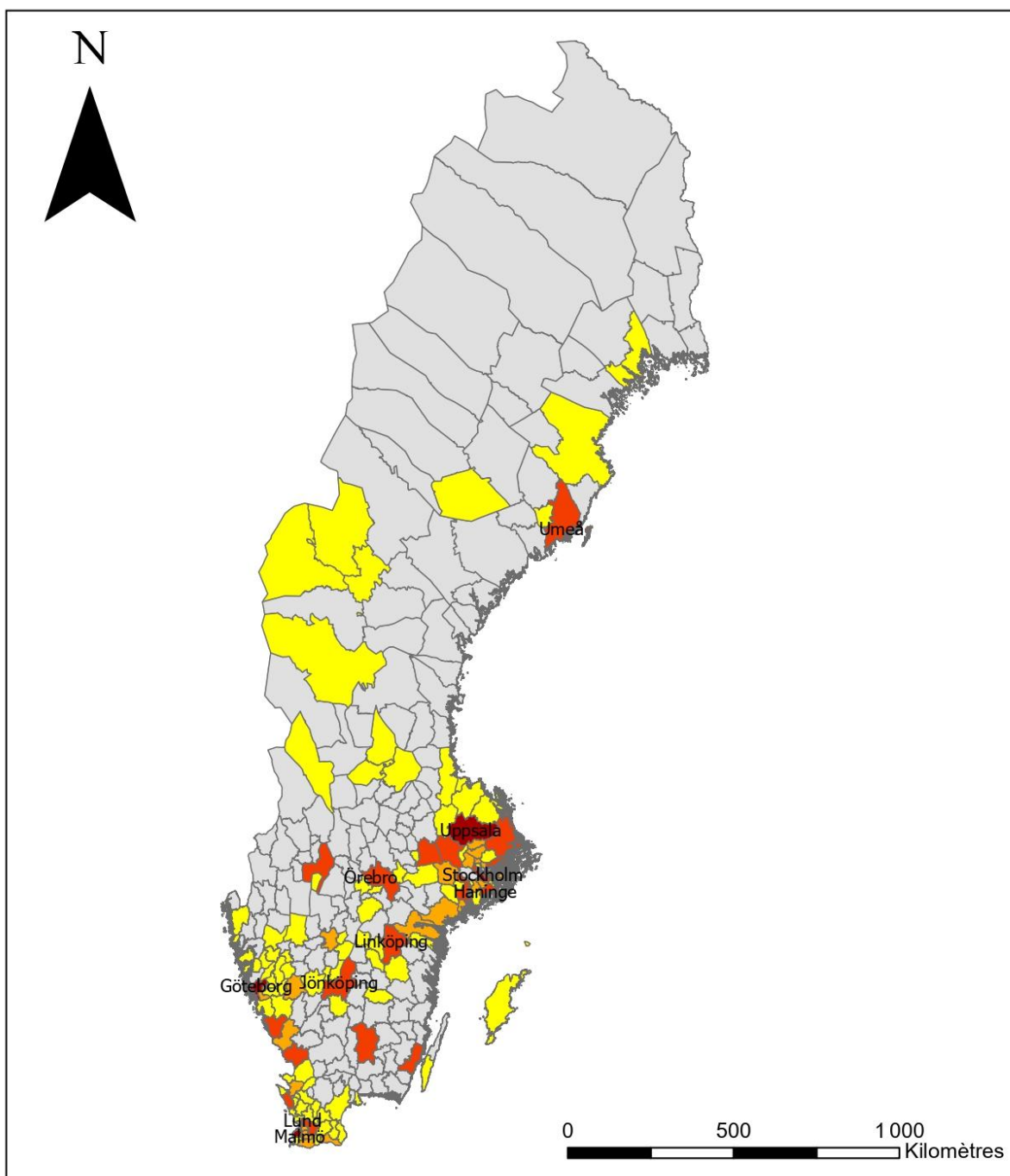
Masse de phosphore par commune en 2030 à collecter en sommant les évènements extérieurs, les stades et la population additionnelle par rapport à 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)



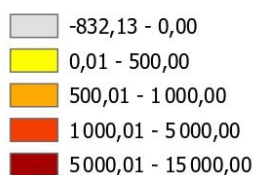
PHOSPHORE (kg) 2026-2050



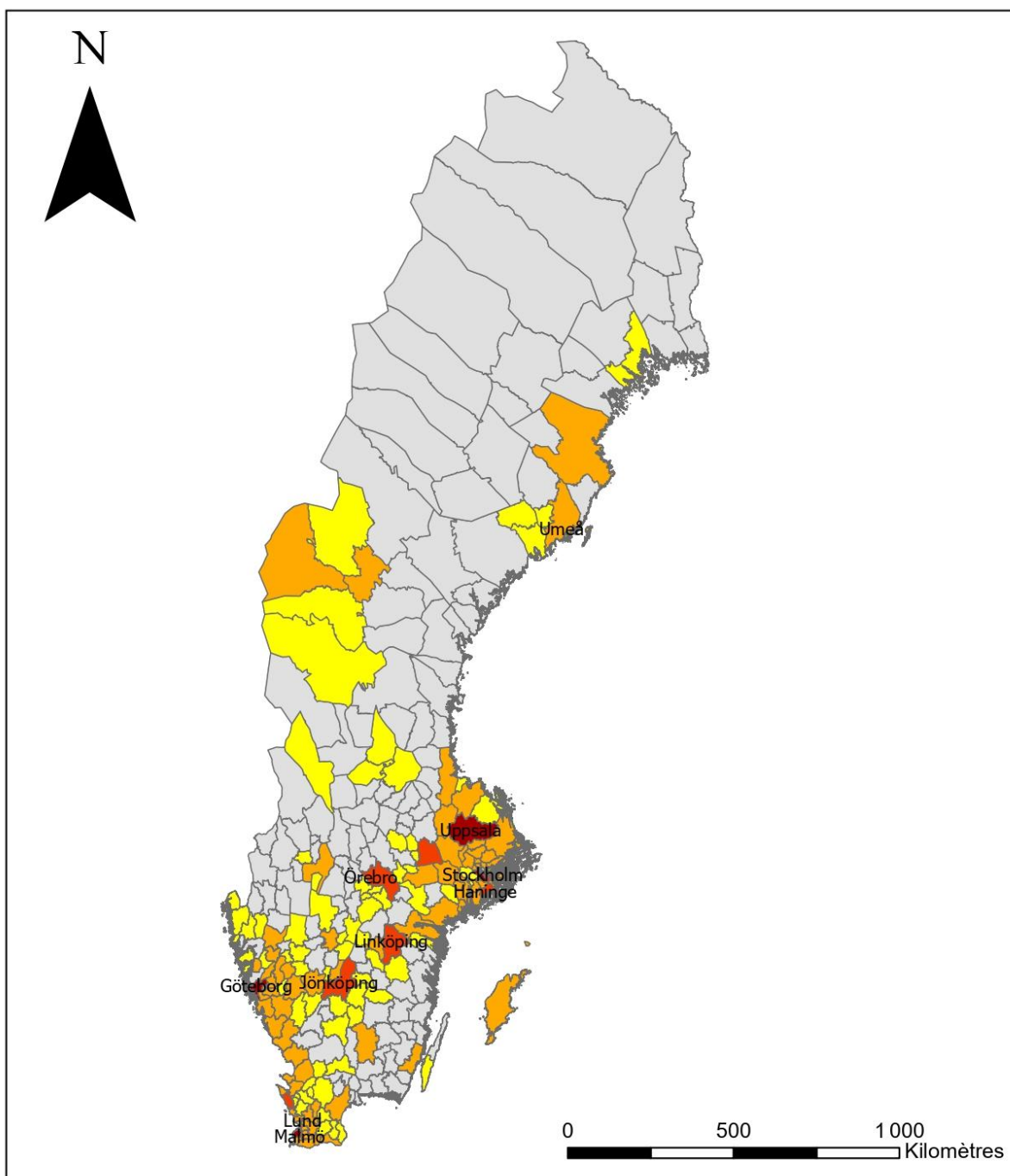
Masse de phosphore par commune en 2050 à collecter en sommant les évènements extérieurs, les stades et la population additionnelle par rapport à 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)



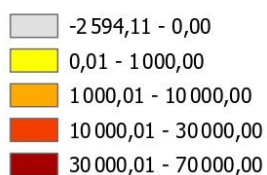
POTASSIUM (kg) 2026-2030



Masse de potassium par commune en 2030 à collecter en sommant les évènements extérieurs, les stades et la population additionnelle par rapport à 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

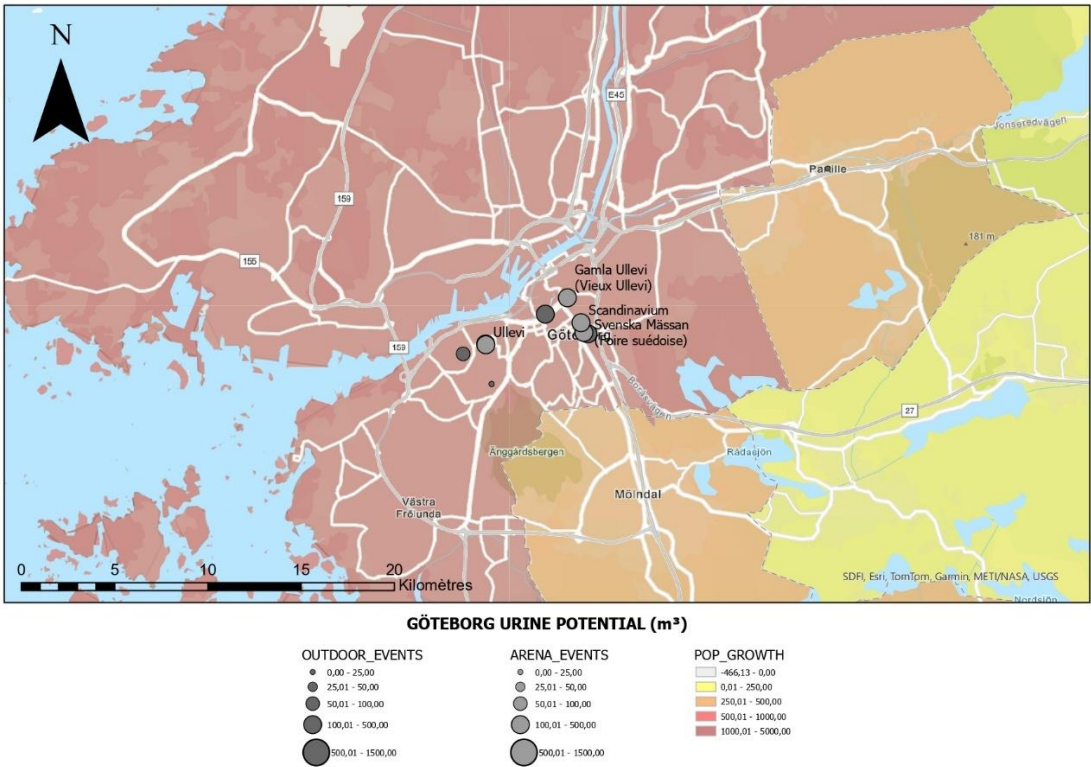


POTASSIUM (kg) 2026-2050

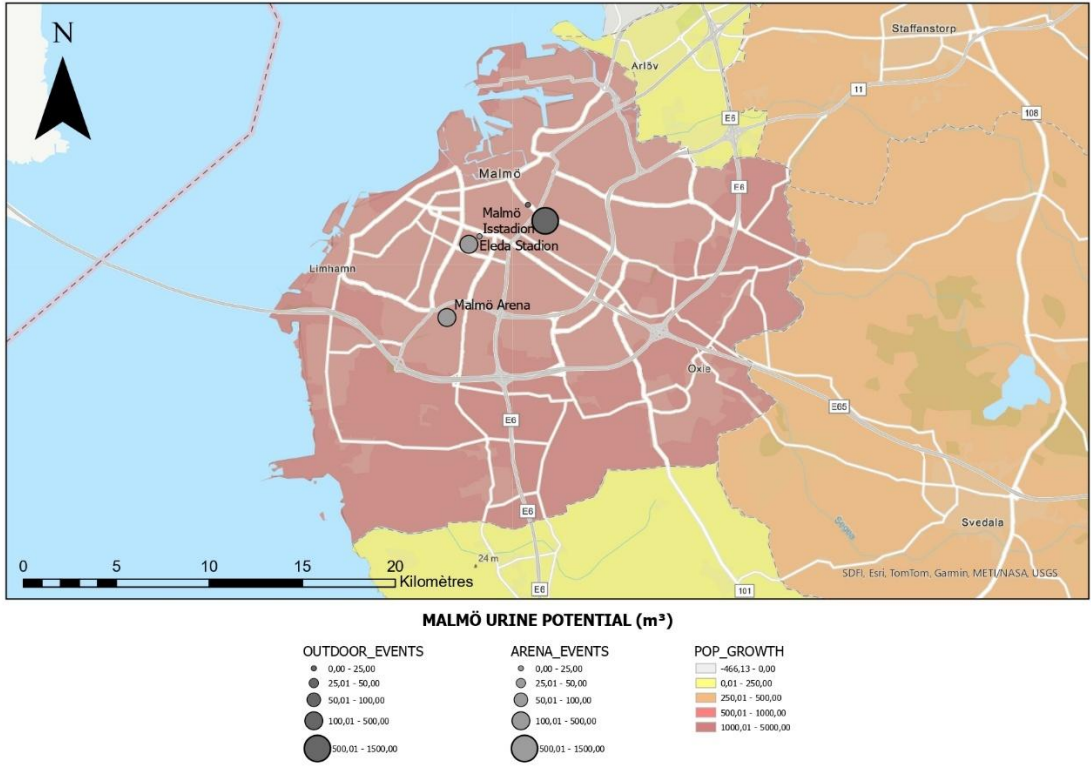


Masse de potassium par commune en 2050 à collecter en sommant les événements extérieurs, les stades et la population additionnelle par rapport à 2026 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)

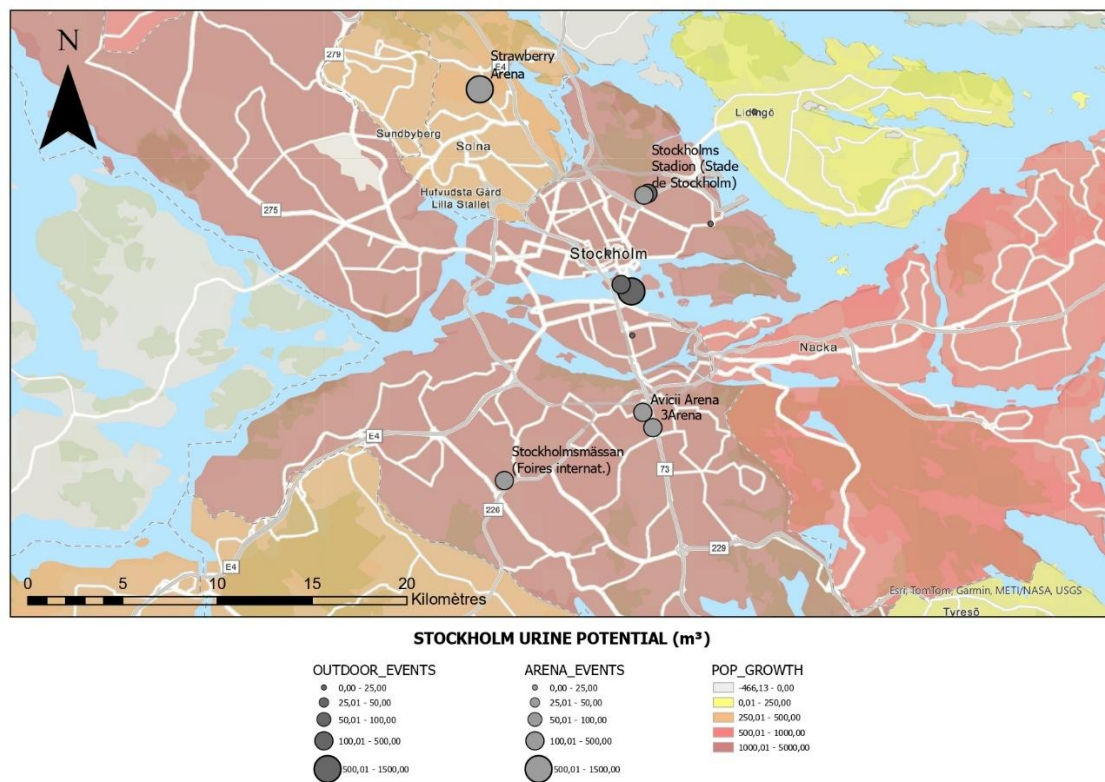
Annexe 11 : Macro-Hubs



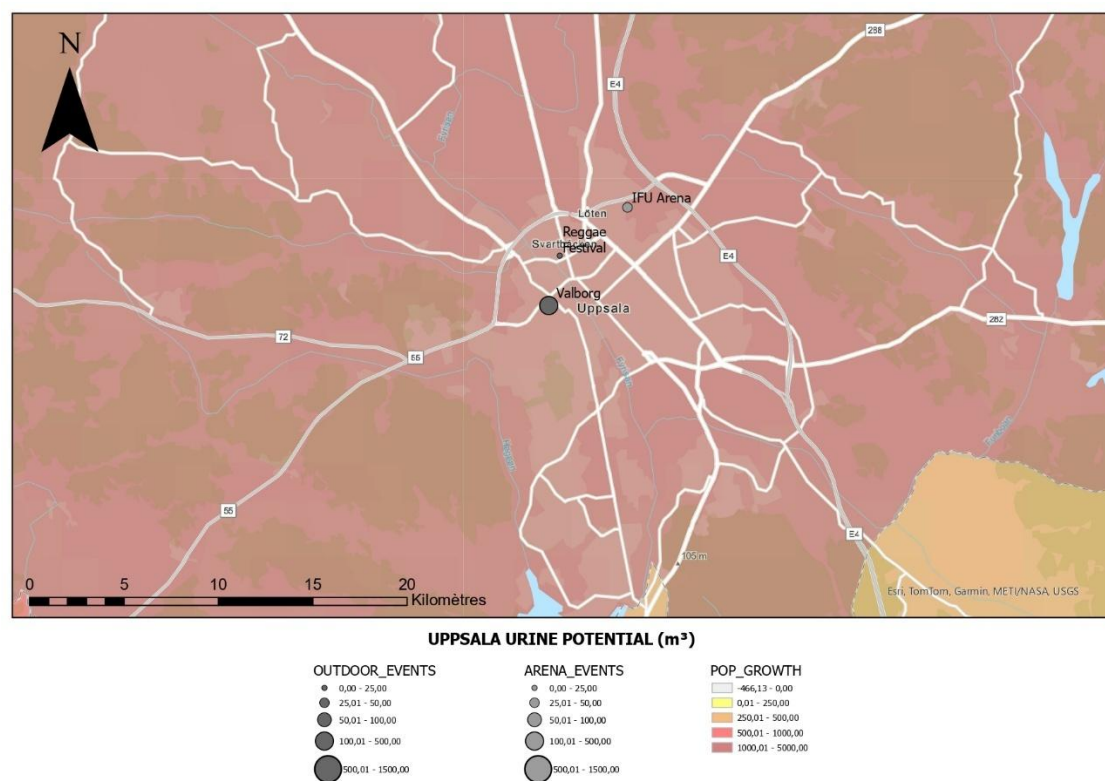
Volume d'urine de la commune de Göteborg en 2030 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)



Volume d'urine de la commune de Malmö en 2030 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)



Volume d'urine de la commune de Stockholm en 2030 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)



Volume d'urine de la commune de Uppsala en 2030 (Source : S. Bondkowski-Malet, SLU 2026)