

Les enjeux liés à l'utilisation de l'optimisation mathématique pour les réseaux d'eau



SOMMAIRE

01

Réseaux d'adduction
en eau potable

02

Réseaux
d'assainissement





Expertises Scientifiques & Technologiques

Réseaux d'adduction en eau potable

Les enjeux d'optimisation des infrastructures et des opérations de distribution pour un acteur comme Veolia



Réseaux d'adduction en eau potable

Qu'est-ce que c'est ?



<https://youtu.be/4imD-10IDIM>

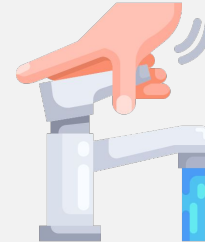


Réseaux d'adduction en eau potable

Principales fonctionnalités

Ostfeld [1] a défini les systèmes de distribution d'eau comme “*une connexion interrelationnelle de sources d'eau, de tuyaux et de modules de contrôle hydraulique tels que des vannes, des régulateurs de pompes et des réservoirs dans le but de fournir de l'eau pour une utilisation finale dans des conditions de pression contrôlées*”

- **Fonctionnalité principale** : répondre à la **demande en eau potable des usagers** connectés au réseau (particuliers, commerces, industriels)
- **Fonctionnalités secondaires** :
 - Garantir la **continuité de service**
 - Garantir une **qualité d'eau** compatible avec les **normes de potabilité** aux usagers (directive 98/83/CE)
 - Assurer les niveaux de pression suffisants pour assurer la **défense incendie**
 - Garantir la **durabilité** et minimiser l'**empreinte environnementale**



Réseaux d'adduction en eau potable

Principaux composants

Le réseau de distribution d'eau potable peut être vu comme un graphe reliant les composants placés en ses nœuds et permettant d'assurer le service [2]. Les composants sont :

- **Usine / Production** : Le nœud fournit de l'eau au système, également connu comme la source.
- **Réservoir** : Le nœud stocke et réserve de l'eau et libère de l'eau de manière intermittente dans le système pour l'utilisateur final.
- **Jonction** : Connexion entre plusieurs liaisons transportant l'eau depuis ou vers plusieurs directions
- **Tuyau** : La liaison transporte l'eau à travers les nœuds
- **Pompe** : Ce nœud étend la charge hydraulique ou la pression pour vaincre les pertes de pression dues à la friction et aux différences d'élévation.
- **Vannes** : Contrôle le débit et la pression dans le système

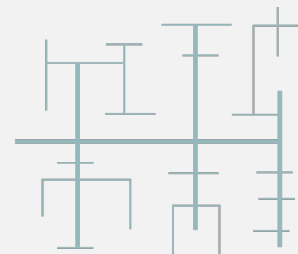
Réseaux d'adduction en eau potable

Types de réseaux de distribution

On distingue en règle générale 4 grands types de topologie de réseaux de distribution d'eau potable en fonction de la façon dont les tronçons sont agencés les uns par rapport aux autres [2] :

- **Les configurations en série** : configurations simples sans boucles ni branches. Configuration la plus basique. Elles sont la configuration la plus basique de toutes. Elles se composent généralement d'une source, d'une extrémité et quelques points de demande intermédiaires également appelés nœuds.
- **La configuration ramifiée** : combinaison de deux configurations en série ou plus. En générale composée d'une source et de nombreux points de demande. Les points de demande intermédiaires (nœuds) dans le système relient un tuyau en amont à un ou plusieurs tuyaux en aval. Les directions de flux prédéterminées.
- **La configuration en boucle ou maillée** : se compose de points de demande (nœuds) qui peuvent collecter de l'eau de plus d'un côté. Cela est dû à la configuration en boucle du système.
- **La configuration combinée** : couramment utilisée dans les zones urbaines/industrielles. Les configurations en boucle et ramifiées sont combinées pour former ce type de configuration.

Les structures maillées sont souvent utilisées en situations urbaines et les structures ramifiées en situations rurales.

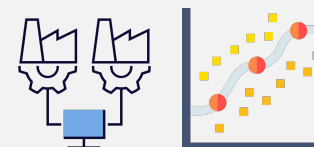
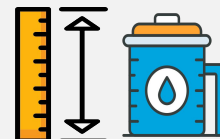


L'optimisation pour les réseaux de distribution d'eau potable

Les axes d'optimisation

Depuis la fin des années 80, universitaires, bureaux d'étude et opérateurs de réseaux utilisent les méthodes d'optimisation mathématique pour plusieurs applications :

- **Design et réhabilitation** : choix et dimensionnement des équipements et des tuyaux, stratégie d'extension, choix des techniques de réhabilitation et planification court et moyen termes des travaux
- **Opération (énergie, pression, fuites)** : optimisation énergétique du réseau (pompes et marnage des réservoirs), contrôle des niveaux de pression pour réduire les risques de casse et les pertes, définition optimale de la sectorisation
- **Placement d'équipements** : positionnement optimal des bornes incendies, des réseaux de sonde de surveillance de la qualité d'eau, positionnement et dimensionnement de poste de rechloration
- **Calibration de modèle** : associés aux données issues du SCADA du réseau, les modèles hydrauliques forment l'un des outils les plus utilisés pour optimiser les réseaux. Leur calibration fine et leur mise à jour est un défi.



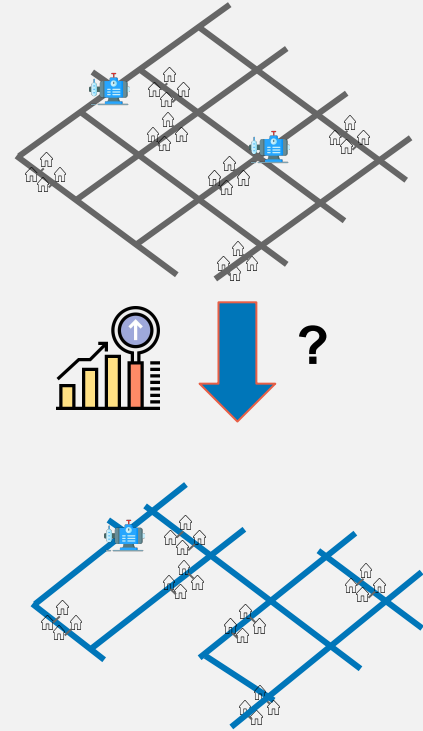
L'optimisation pour les réseaux de distribution d'eau potable

Généralités

Les objectifs d'optimisation opérationnelle ou de design font souvent appel à la modélisation des phénomènes de transport et des phénomènes mécaniques, hydrauliques ou biologiques [3]:

- Modèles hydrauliques explicite ou intégrés dans un logiciel type EPANET (Pression/Débit)
- Modèles de transport d'éléments trace
- Modèles de consommation réactive du Chlore
- Modélisation fine des sous-systèmes : pompes, réservoirs, prévision des dynamiques de consommation, modèles de coûts spécifiques, etc.

La diversité des applications nous amène à des problèmes d'optimisation de tous types, car les systèmes peuvent être représentés par de modèles linéaires ou non linéaires, avec des variables discrètes (ex: planification des installations) et/ou continues (ex.l'amélioration des performances opérationnelles).



L'optimisation pour les réseaux de distribution d'eau potable

Optimization de Design

Le design des réseaux de distribution d'eau potable correspond au choix de l'agencement et du dimensionnement des différentes composantes du réseau. Cette problématique a fait l'objet d'une littérature scientifique abondante depuis les années 2000 [4].

Les problèmes traités peuvent être la création du réseau, son évolution/adaptation ou son extension.

Défis à relever : minimisation du coût, maximisation de la résilience

- **Variables de décision** : position, dimensions (diamètres, volumes, puissances) des équipements
- **Contraintes** : répondre à la demande en eau des usagers, pression aux points de livraison, topographie, urbanisation

Exemples de résultats : sur un réseau de 35 000 abonnés en Belgique [5] : revamping avec économie de CAPEX de 5M€ et une réduction du temps de résidence global (diamètres pipes)



L'optimisation pour les réseaux de distribution d'eau potable

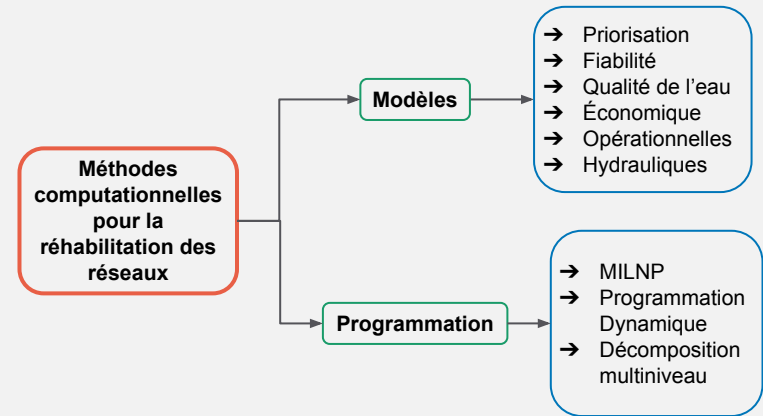
Optimisation de la maintenance du réseau

Le vieillissement des infrastructures de distribution d'eau potable implique la nécessité de réparer, réhabiliter (lining) ou remplacer les conduites afin de conserver la performance du réseau. L'état de santé de ces ouvrages est hétérogène et des **stratégies de réhabilitation** à courts termes et longs termes peuvent être définies de façon optimales à l'aide d'approches de recherche opérationnelle. Littérature relativement abondante [6]

Défis à relever : minimisation du coût à court ou long terme, maximisation du niveau de service

- **Variables de décision** : quelle action (réparation, lining, remplacement, diamètre), où, quand
- **Contraintes** : pression de service à respecter, défense incendie, opportunité travaux

Exemples de résultats : Outil de planification optimal des investissements (basé sur NSGA2 + modèle probabiliste de casse) → comparaison de scénarii (coût minimum sur 40 ans ou budget annuel limités) pour un secteur de 2,34 km² en Corée [7].



L'optimisation pour les réseaux de distribution d'eau potable

Operational optimization : optimisation de pression

Le contrôle de la pression dans les réseaux de distribution d'eau réduit les fuites et les casses, ce qui entraîne une amélioration des coûts de maintenance et d'exploitation. L'utilisation de vannes de régulation de pression positionnées en des points stratégiques permet le contrôle de la pression en aval des ouvrages [8].

Défis à relever : Minimiser les pertes de revenue liées aux volumes perdus, minimiser les coûts d'installation

- **Variables de décision** : Position des vannes de réduction de pression, setpoints dynamique des vannes (jour/nuit)
- **Contraintes** : Conservation de la masse et de l'énergie, pressions hydrauliques aux noeuds



Fig. 7. (a) Pressure's contour before Pressure Management during the critical hour; (b) Pressure's contour after Pressure Management during the critical hour. Pressure in m

Exemples de résultats : pour un secteur du réseau de Bogota [8], optimisation multi-objectif utilisant NSGA2. Solution à 3 PRV : réduction du niveau de perte en eau de 16,3% du volume à 14,3% du volume sur un jour type.

L'optimisation pour les réseaux de distribution d'eau potable

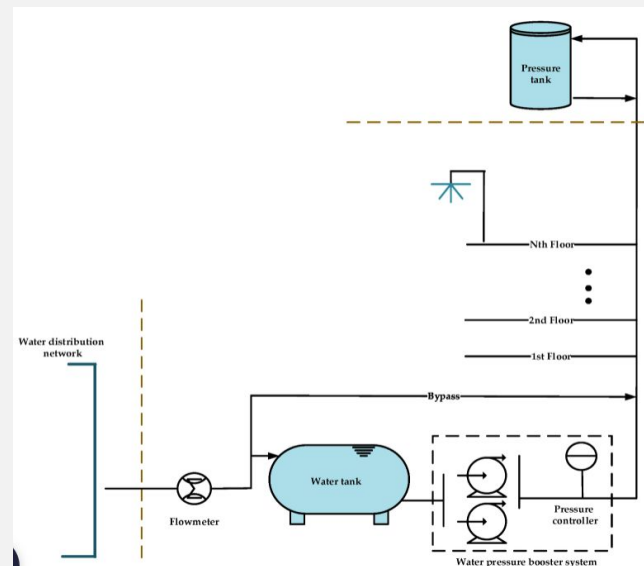
Operational optimization : optimisation de pression

Le contrôle de la pression dans les réseaux de distribution d'eau réduit les volumes de pertes liées aux fuites et les risques de casse, ce qui entraîne une amélioration des coûts de maintenance et d'exploitation. Néanmoins, les réseaux urbains font face à une demande croissante des consommateurs. Grâce à des démarches d'optimisation, il est possible d'atteindre les niveaux de pression minimum pour assurer le service en minimisant les coûts d'exploitation et de maintenance.

Défis à relever : Optimiser les pressions pour minimiser les coûts d'opération, en particulier le coût des systèmes de surélévation de pression domestique

- **Variables de décision :** Setpoints dynamique des vannes (jour/nuit)
- **Contraintes :** Conservation de la masse et de l'énergie, pressions hydrauliques aux noeuds

Exemples de résultats : A Teheran [9], pour un réseau avec 71 noeuds, 107 tuyaux, 1 réservoir et 1 PRV, définition des profils de pression horaire → Niveau de pertes physiques (fuites): - 4%; Réduction des coûts journaliers : - 41%



L'optimisation pour les réseaux de distribution d'eau potable

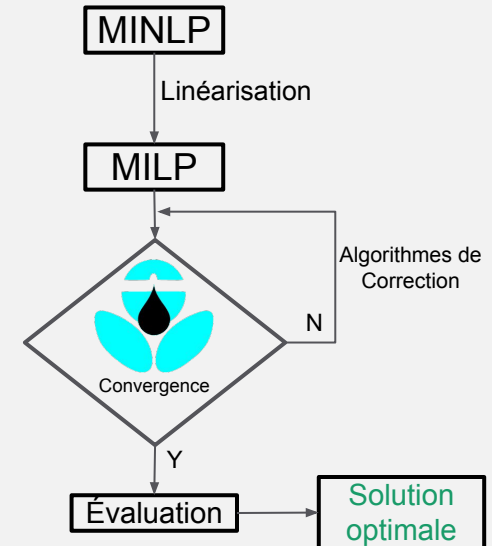
Operational optimization : Optimisation énergétique

l'un des coûts les plus importants dans les réseaux de distribution d'eau est lié à l'électricité nécessaire au fonctionnement des pompes. En effet, le fonctionnement de ces réseaux dans le monde représente environ 2 à 3% de notre consommation mondiale et leur facture d'électricité représente environ 30 % de leur coût total d'exploitation.

Défis à relever : Optimiser l'Ordonnancement des équipements pour minimiser le coût total d'exploitation.

- **Variables de décision (discrètes)** : l'utilisation (ou non) des pompes, vannes et réservoirs pendant une période de temps.
- **Contraintes** : Hydrauliques, courbes de fonctionnement des pompes

Exemples de résultats : Pour un réseau composé de 560 points de demande, 643 tuyaux, 7 pompes, 4 vannes de contrôle de pression [10], proposition d'un ordonnancement optimal horaire sur la journée, avec pour conséquence : ⚡ Consommation → -8% ; 💰 Coût opérationnel → -17%



L'optimisation pour les réseaux de distribution d'eau potable

Optimisation de la sectorisation

La sectorisation (subdivision en réseaux plus petits) des réseaux d'eau est bénéfique pour le contrôle des fuites d'eau grâce à la surveillance et à la gestion des débits internes aux secteurs. En installant des débitmètres ou des vannes à certains endroits, le réseau peut être divisé en plusieurs secteurs.

Défis à relever : Optimization multi-objectif (**min**: pression, temps de résidence de l'eau, coûts d'implémentation, **max**: nombre de secteurs)

- **Variables de décision (discrètes)** : # tuyaux par secteur, # des secteurs, localisation des vannes et débitmètres
- **Contraintes** : Budget, hydrauliques, isolation des secteurs, taille des secteurs, sources d'eau, capacité de production.

Exemples de résultats : Pour un réseau de 7684 noeuds et 8556 tuyaux, Zhang et. al [11] proposent 4 solutions d'intérêt pour les opérations, avec performances opérationnelles similaires.



No.	Average pressure (m)	Average water age (h)	Transforming costs (Yuan RMB)	Sector number	Flowmeters number	Valves number
a	25.24	42.10	1,238,050	13	37	14
b	26.38	40.70	1,975,050	24	89	6
c	26.48	41.19	907,720	11	37	1
d	26.20	41.29	2,143,870	26	92	13

L'optimisation pour les réseaux de distribution d'eau potable

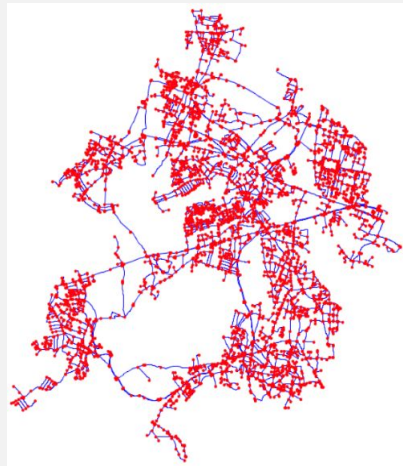
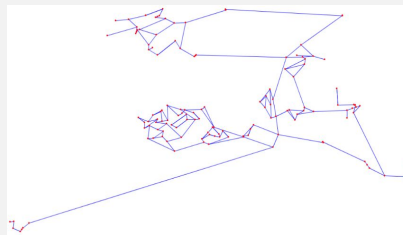
Optimisation du positionnement de capteurs qualité

La surveillance en temps réel d'un grand réseau peut s'avérer très difficile avec un nombre limité de capteurs. Le placement de capteurs est un problème complexe sans consensus clair sur une méthode de résolution unique en raison de divers objectifs et contraintes opérationnelles [12].

Défis à relever : placement d'un nombre limité de capteurs de manière à maximiser la détection d'événements de contamination avec un temps moyen de détection minimal.

- **Variables de décision :** positions des capteurs
- **Contraintes :** nombre de capteurs, détection d'une contamination par au moins un capteur.

Exemples de résultats : 4 méthodes d'optimisation testées pour résoudre le problème de deux réseaux de distribution d'eau, dont un grand réseau réel en France avec 10 senseurs à placer dans un réseau de plus de 5500 nœuds.



L'optimisation pour les réseaux de distribution d'eau potable

Model calibration

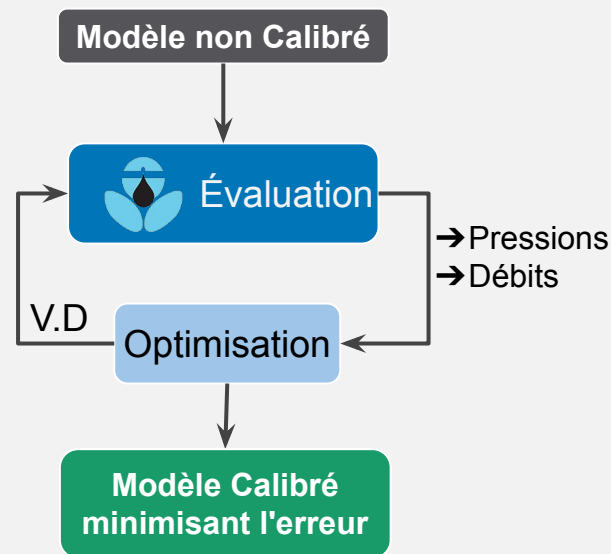
Un modèle hydraulique représentatif est crucial pour une analyse correcte du comportement des systèmes de distribution d'eau. Étant donné les incertitudes et le manque de détails dans certaines informations du système, une gestion fiable ne peut être obtenue qu'en employant un modèle calibré précis [13].

Défis à relever : Minimiser l'erreur entre les mesures de pression et débit et les résultats du modèle hydraulique

- **Variables de décision** : Demande des noeuds, rugosité des tuyaux, élévation des noeuds
- **Contraintes** : Bilans de masse et énergie (pertes de charge) du réseau.

Exemples de résultats (interne Veolia) : Réseau de 13 km, 350+ clients, 12 capteurs

- Moins de 4% d'erreur moyen en débit
- Moins de 2 mH2O d'erreur moyen absolue en pression





Expertises Scientifiques & Technologiques

Réseaux d'assainissement

*Les enjeux d'optimisation des infrastructures
et des opérations de collecte des eaux
usées pour un acteur comme Veolia*



Réseaux de collecte des eaux usées

Qu'est-ce que c'est?



Réseaux de collecte des eaux usées

Principales fonctionnalités

Un réseau d'assainissement est défini comme **un ensemble de canalisations, de bassins, de pompes et de vannes** qui fonctionnent ensemble pour collecter et évacuer les eaux usées (et potentiellement de ruissellement) de la population ou des centres industriels vers des installations de traitement hors site.

- **Fonctionnalités principales :**
 - assurer le **transport des eaux usées** domestiques et industrielles vers la station de traitement,
 - assurer un **drainage efficace des eaux pluviales** de manière à prévenir la submersion des zones urbanisées
- **Fonctionnalités secondaires :**
 - Garantir la **continuité de service**
 - **Minimiser les rejets** au milieu naturel
 - Minimiser les nuisances olfactives et les risques sanitaires
 - Garantir la **durabilité** et minimiser l'**empreinte environnementale**

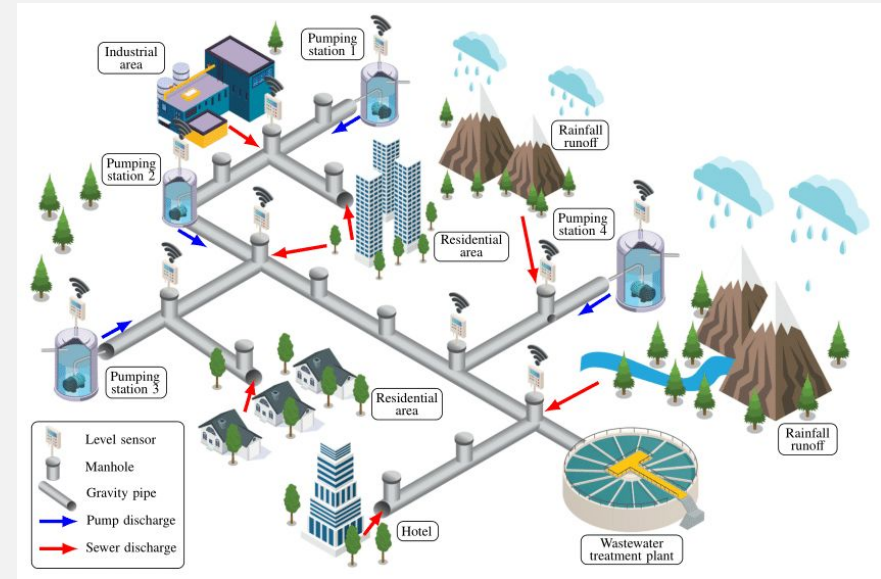


Réseaux de collecte des eaux usées

Principaux composants

Le réseau de collecte des eaux usées peut être vu comme un graphe reliant les composants placés en ses noeuds et permettant d'assurer le service [14]. Les composants sont :

- **Tuyau** : La liaison transporte l'eau à travers les nœuds
- **Branchement** : Plus petits tuyaux qui raccordent les producteurs au réseau
- **Bassin tampon** : Ouvrage permettant le pilotage des volumes transportés vers la station de traitement
- **Pompe / station de pompage** : Permet de relever le flux hydraulique pour pallier aux contraintes topographiques
- **Vannes** : Contrôle le débit dans le système
- **Regards** : Permet l'inspection des tronçons de tuyaux composants le réseau
- **Stations de traitement H_2S** : Permet d'injecter des réactifs évitant la création d' H_2S



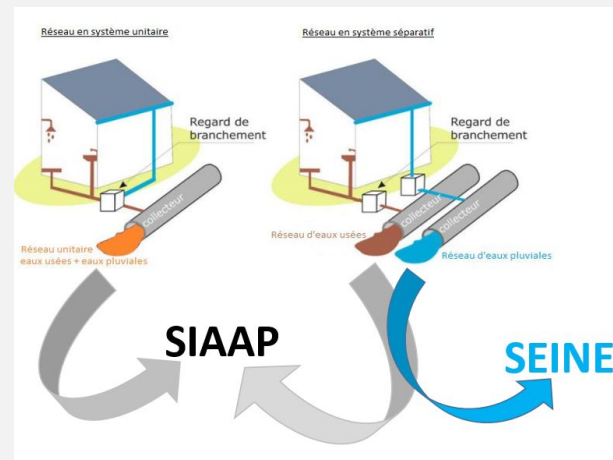
*image issue de [14]

Réseaux de collecte des eaux usées

Types de réseaux d'assainissement

On distingue en règle générale 2 grands types de réseaux d'assainissement :

- **le réseau unitaire**, également appelé également « tout-à-l'égout », reçoit l'**ensemble des eaux usées** (effluents) dans un collecteur unique, quelle que soit leur origine. Ils sont pratiques, mais présentent quelques inconvénients dont un haut risque de **débordement, voire d'inondation** en cas de pluies importantes ou persistantes.
- **le réseau séparatif** est composé de **deux réseaux séparés** :
 - le premier est destiné à collecter et rejeter les eaux de pluie (après un éventuel traitement) directement dans le milieu naturel
 - le second collecte et conduit les eaux vannes et domestiques directement à une station d'épurationCe type de réseau implique des travaux plus conséquents, mais permet une meilleure maîtrise des risques pour la santé et l'environnement.



*image issue de <https://www.seineouest.fr/au-fil-de-leau-comment-fonctionne-le-systeme-d-assainissement>

Les écoulements au sein des réseaux d'assainissement sont majoritairement **gravitaires**. Les stations de pompages sont les ouvrages qui permettent de pomper et refouler les flux vers les stations de traitement lorsque la topographie du terrain le nécessite.

L'optimisation pour les réseaux d'assainissement

Les axes d'optimisation

L'optimisation du design et de la gestion dynamique opérationnelle des réseaux d'assainissement a fait l'objet de nombreuses publications, en particulier depuis la fin des années 90. Les enjeux de résilience des systèmes face au changement climatique ont donné une nouvelle dynamique à ce thème de recherche. Les axes d'optimisation sont les suivants :

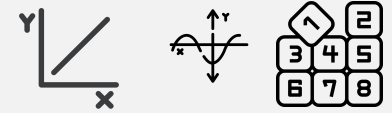
- **Design et réhabilitation** : choix et dimensionnement des équipements et des tuyaux, stratégie d'extension, choix des techniques de réhabilitation et planification court et moyen termes des travaux
- **Opération (énergie, gestion des volumes,)** : optimisation énergétique du réseau (station de pompage), gestion des évènements pluvieux et minimisation des rejets au milieu naturel, injection dynamique de réactifs
- **Calibration de modèle** : associés aux données issues du SCADA du réseau, les modèles hydrauliques et biologiques sont des outils utilisés pour optimiser les réseaux. Leur calibration fine et leur mise à jour est un défis.



L'optimisation pour les réseaux d'assainissement

Généralités

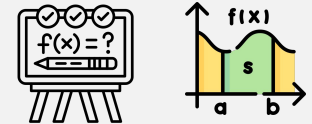
La diversité des applications nous amène à des problèmes d'optimisation de tous types, car les systèmes peuvent être représentés par de modèles linéaires ou non linéaires, avec des variables discrètes (ex: planification des installations) et/ou continues (ex. l'amélioration des performances opérationnelles).



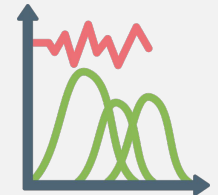
Des approches d'optimisation black-box peuvent également être utilisées de manière à pouvoir évaluer des fonctions externes à l'aide d'outils de modélisation hydraulique (SWMM, INFOWORKS, MOUSE, PORTEAU, etc.) et de modélisation des phénomènes de transport réactifs (biologiques ou chimiques).



Néanmoins des modèles explicites simplifiés des relations entre les composantes du système sont souvent utilisés.



Enfin, les approches de maintenance à court ou moyen termes peuvent également faire appel à une modélisation probabiliste de l'évolution de l'état de santé de l'ensemble des canalisations du réseau [15].



L'optimisation pour les réseaux d'assainissement

Optimization de Design

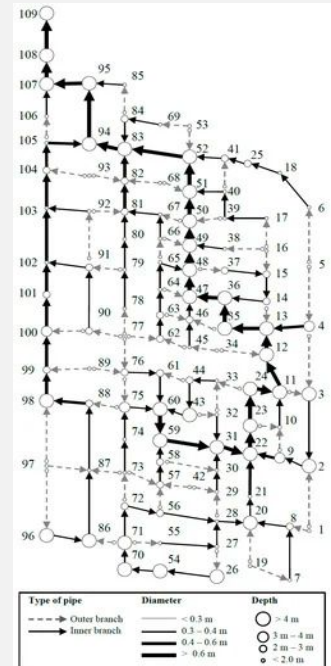
A l'instar des réseaux de distribution d'eau potable, le design des réseaux d'assainissement correspond au choix de l'agencement et du dimensionnement des différentes composantes du réseau, en particulier les tuyaux. Le choix conjoint de l'agencement et du dimensionnement est un sujet de recherche récent [16].

Les problèmes traités peuvent être la création du réseau, son évolution/adaptation ou son extension.

Défis à relever : minimisation du coût de chaque tronçon, minimisation du coût de l'ensemble du réseau

- **Variables de décision** : position, élévation, dimensions (diamètres) des équipements
- **Contraintes** : bilan masse, écoulement gravitaire, capacité hydraulique des tuyaux, sens d'écoulement, topographie, infrastructure urbaines

Exemples de résultats : sur une portion du réseau de Bogota (109 regards, 160 tronçons de longueur entre 65 et 204 mètres), proposition d'un design et d'un dimensionnement hydraulique permettant un gain de 42% de CAPEX.



L'optimisation pour les réseaux d'assainissement

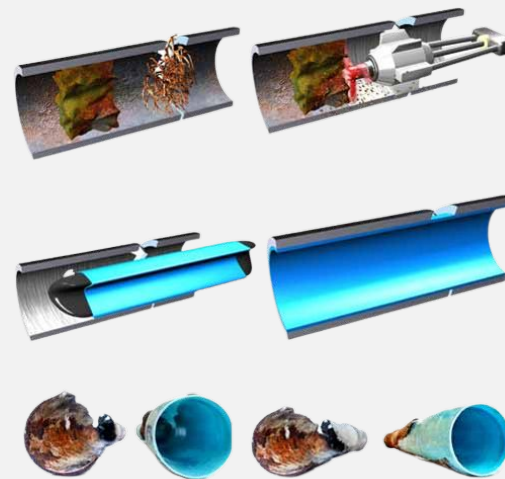
Optimisation de la maintenance du réseau

La réhabilitation des réseaux d'assainissement implique une définition de stratégie à long terme qui réduit les coûts et améliore l'état de santé, le besoin de maintenance et la durée de vie restante du réseau. Il existe différents objectifs de réhabilitation ainsi que des techniques variées de réhabilitation.

Défis à relever : déterminer les niveaux d'investissement et de dépenses opérationnelles des prochaines décennies de façon à maximiser la santé du réseau.

- **Variables de décision** : quelle % pour chaque action (réparation, lining, remplacement), quand
- **Contraintes** : budget, répartition maximale de chaque type d'action, variance entre deux années consécutives de la part d'une action

Exemples de résultats : en 22 années, 20 % de la longueur des canalisations en mauvais état peut être réduite avec une augmentation de 4,5% du coût du scénario de référence [17]



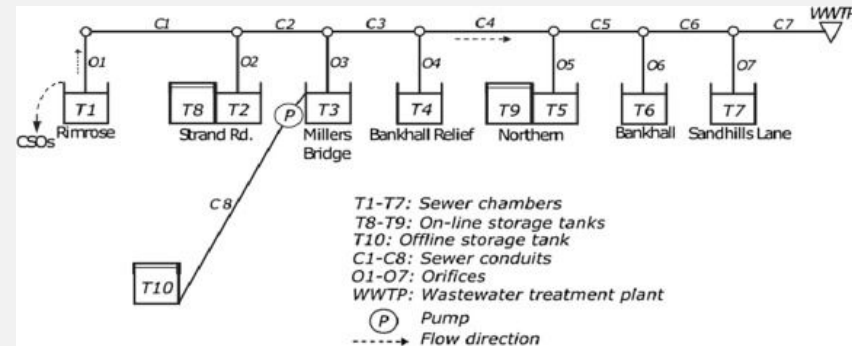
L'optimisation pour les réseaux de collecte des eaux usées

Operational optimization : Optimisation environnementale

L'un des enjeux principaux de gestion des réseaux d'assainissement unitaires est la gestion des événements pluvieux intenses. Suivant l'intensité, la durée, la concentration géographique de l'événement, le volume du réseau est plus ou moins sollicité. Le pilotage dynamique des ouvrages doit permettre d'éviter à tout prix les inondations et de minimiser les rejets au milieu naturel au niveau des déversoirs d'orage [18].

Défis à relever : minimiser les volumes de débordement (P1), minimiser les volumes rejetés au milieu naturel (P2), minimisation des coûts de traitement et pompage (P3)

- **Variables de décision** : programme d'ouverture des vannes (solicitation des bassins tampon), pas de temps 15 minutes
- **Contraintes** : bilan masse, continuité hydraulique sur chaque ouvrage



Exemples de résultats : réseau d'assainissement principale de Liverpool, simulation hydraulique sur SWMM, période de 2h30, planning optimisé d'ouverture des vannes sur la période, front de Pareto de solutions permettant de choisir des solutions plus ou moins performantes économiquement ou environnementalement [19].

Merci de votre attention