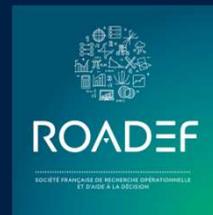




Partitionnement d'un graphe sous contraintes : exemple de la sectorisation d'un réseau de distribution d'eau

Pierre MANDEL

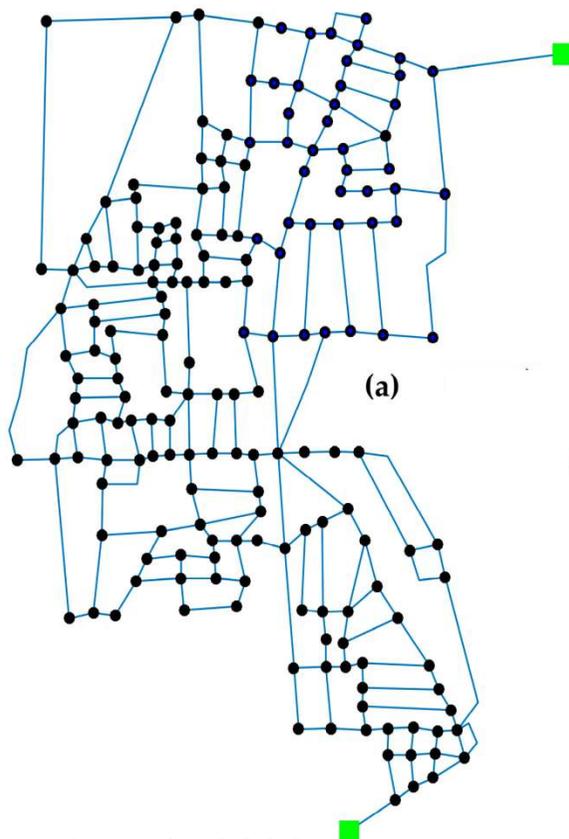


GDR ROD, Journée Optimisation dans les réseaux hydrauliques



1. Introduction

1.1. Sectoriser un réseau de distribution d'eau : deux problèmes

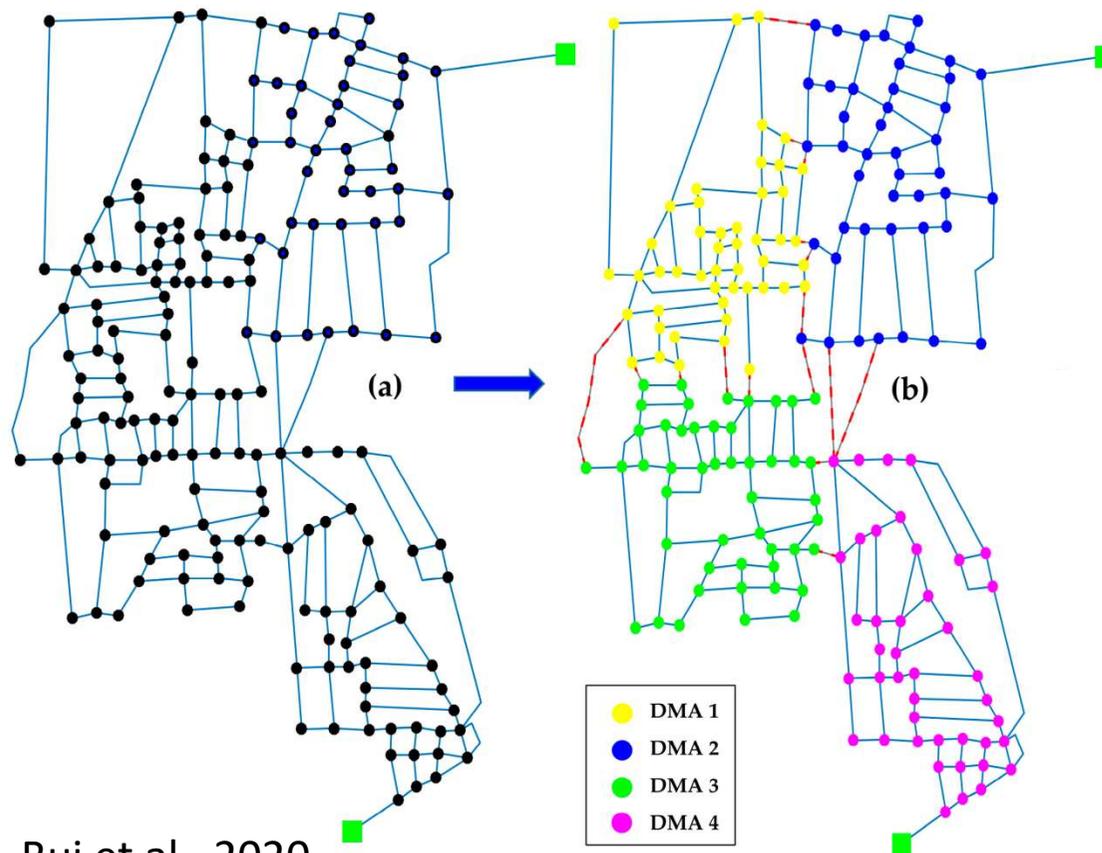


Bui et al., 2020

Bui, Marlim & Kang (2020). Water Network Partitioning into District Metered Areas: A State-Of-The-Art Review, *Water*, 12(4)

1. Introduction

1.1. Sectoriser un réseau de distribution d'eau : deux problèmes



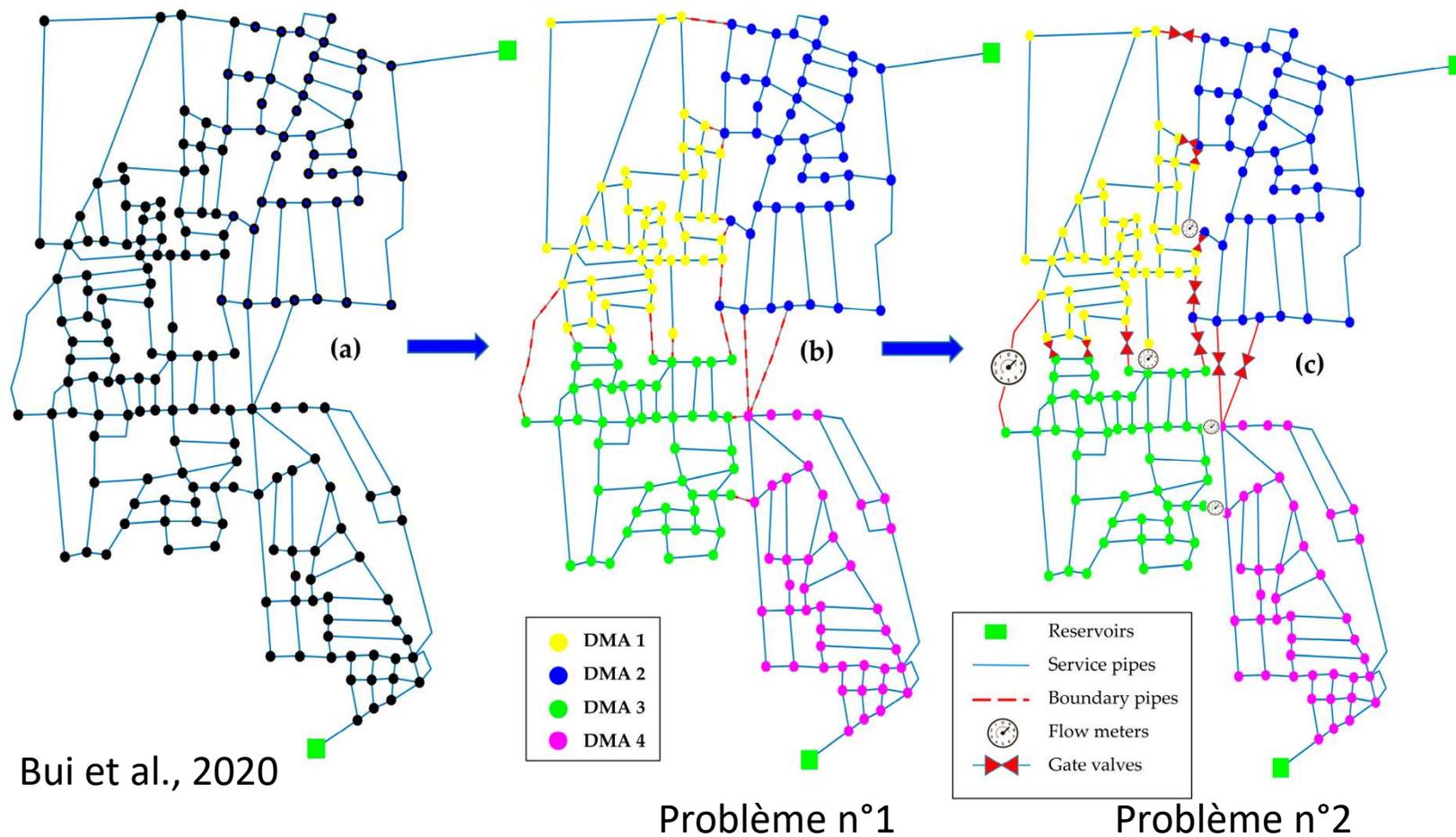
Bui et al., 2020

Problème n°1

Bui, Marlim & Kang (2020). Water Network Partitioning into District Metered Areas: A State-Of-The-Art Review, *Water*, 12(4)

1. Introduction

1.1. Sectoriser un réseau de distribution d'eau : deux problèmes



Bui et al., 2020

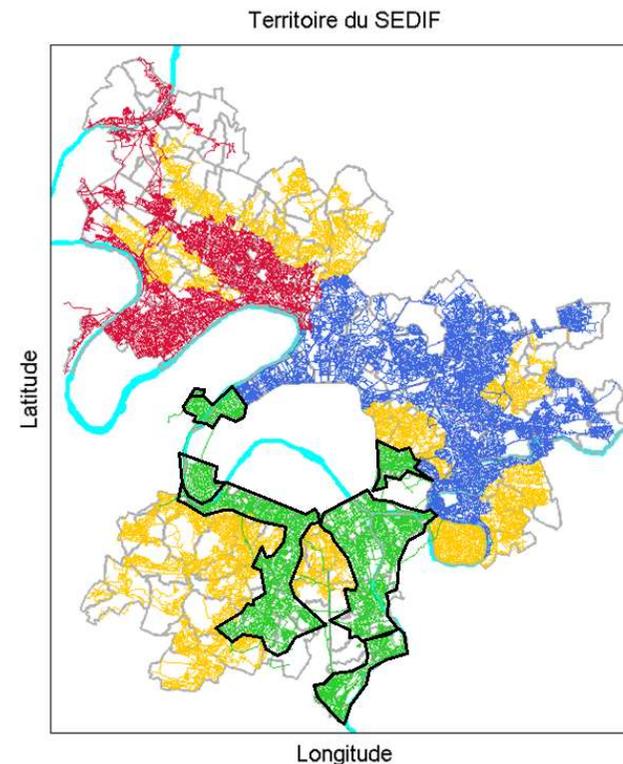
Bui, Marlim & Kang (2020). Water Network Partitioning into District Metered

Areas: A State-Of-The-Art Review, *Water*, 12(4)

1. Introduction

1.2. Contexte et objectifs

- Taille du réseau complet
 - 8500 km de canalisations
 - $4,5 \cdot 10^6$ consommateurs
- Approche simplificatrice
 - Première sectorisation à dire d'experts
 - Réseaux simplifiés : pas de sommet de degré ≤ 2
- Taille des problèmes traités
 - De 900 à 4000 sommets
 - De 1300 à 6000 arêtes
 - De 2 à 10 secteurs créés
- Enjeux de la sectorisation
 - Meilleure gestion des fuites par l'analyse des débits de nuit
 - Consommations télérelevées
 - Débits mesurés par les débitmètres de la sectorisation
 - Sécurité d'approvisionnement
 - Casse
 - Fortes demandes
 - Défense Incendie
 - Coûts (budget projet > 20 M€)
 - Qualité de l'eau



Première sectorisation à dire d'experts sur la partie sud

2. Méthodes

2.1. Définition du problème

- Variables de décision
 - Appartenance des sommets aux secteurs
 - Position des débitmètres
- Contraintes
 - A priori métier
 - Nombres min et max de débitmètres par secteur
 - Non-fermeture des canalisations de diamètre important
 - Liées à la solution
 - Non-fermeture des ponts du graphe
 - Pénalisation des micro-secteurs
 - Pénalisation des solutions avec des secteurs trop inhomogènes
 - Casse des canalisations où sont installés les débitmètres
 - Convergence du modèle hydraulique
- Objectifs
 - Minimiser le plus petit débit de fuite détectable à partir des débits de nuit
 - Diamètres des canalisations
 - Incertitude de la mesure
 - Maximiser la résilience
 - Nombre de chemins hydrauliques reliant les sources aux secteurs
 - Dépense énergétique le long des chemins

- Convergence du modèle hydraulique
 - But : déterminer, pour tout pas de temps, pression et débit en chaque sommet et arête
 - Bilans de masse (loi de Kirchhoff)
 - Bilans d'énergie : fortement non-linéaires
- Utilisation d'un simulateur métier
 - Synergi Water
 - Évaluation coûteuse : entre 10 et 25 minutes par évaluation

2. Méthodes

2.2. Objectifs : Résilience R

$$R = \sum_{s=1}^S \frac{f_s}{K_s} \sum_{i=1}^{K_s} \frac{1}{g(i, s)}$$

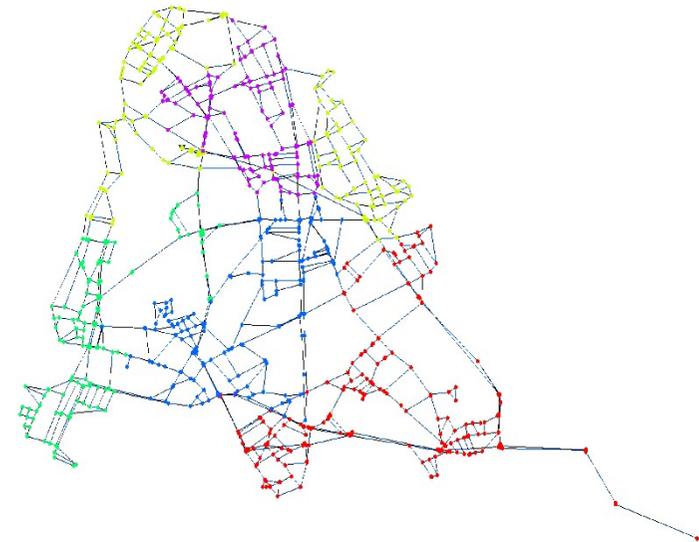
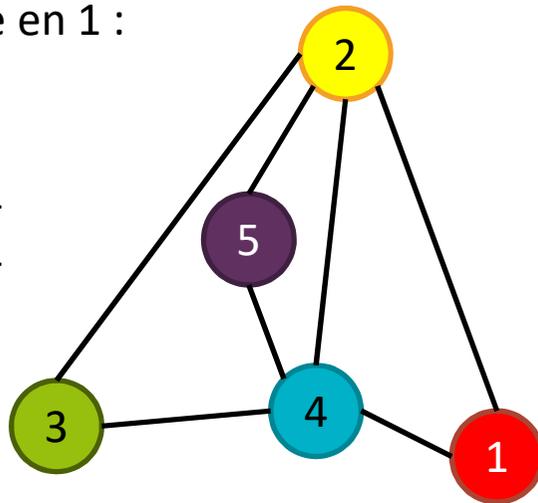
Herrera et al., 2016

- s : indice parcourant tous les secteurs contenant au moins une source,
- S : nombre de secteurs contenant au moins une source,
- K_s : nombre de plus courts chemins vers le secteur s ,
- i : indice parcourant les plus courts chemins vers le secteur s .
- f_s : fraction du volume absolu entrant et sortant aux bornes du secteur s

$$f_s = \frac{V_s}{\sum_{s'=1}^S V_{s'}}$$

De 2 à la source en 1 :

2	1		
2	4	1	
2	5	4	1
2	3	4	1



2. Méthodes

2.2. Objectifs : Résilience R

$$R = \sum_{s=1}^S \frac{f_s}{K_s} \sum_{i=1}^{K_s} \frac{1}{g(i, s)}$$

Herrera et al., 2016

- s : indice parcourant tous les secteurs contenant au moins une source,
 - S : nombre de secteurs contenant au moins une source,
 - K_s : nombre de plus courts chemins vers le secteur s ,
 - i : indice parcourant les plus courts chemins vers le secteur s .
-
- f_s : fraction du volume entrant pour le secteur s

$$f_s = \frac{V_s}{\sum_{s'=1}^S V_{s'}}$$

où $g(i, s, k)$ est une mesure approximée de la perte de charge pour le k -ième chemin de la source s au sommet i :

$$g(i, s, k) = \sum_{m=1}^{M_{i,s,k}} \frac{L_m}{D_m}$$

- m : indice parcourant les tronçons menant de la source s au sommet i en suivant le k -ième chemin,
- $M_{i,s,k}$: nombre de tronçons à parcourir en suivant le k -ième chemin menant de la source s au sommet i ,
- L_m : longueur du tronçon m ,
- D_m : diamètre du tronçon m .

Herrera, M., Abraham, E. and Stoianov, I. (2016) A Graph-Theoretic Framework for Assessing the Resilience of Sectorised Water Distribution Networks. *Water resources management* 30(5), 1685-1699.

2. Méthodes

2.3. Objectifs : PPDFD (Plus Petit Débit de Fuite Détectable)

o Principe

- Pour un débitmètre placé entre les secteurs i et j , on génère une série possible de débits de nuit mesurés selon :

$$\widehat{Q}_{i,j} \sim \mathcal{N}(Q_{i,j}; 3 \cdot \sigma_{mesure})$$

Dépend du diamètre et de $Q_{i,j}$ (données constructeurs)

- Pour chaque secteur j , on calcule :

$$Q_{min,j} = P_1\left(\sum_i \widehat{Q}_{i,j}\right) \quad Q_{max,j} = P_{99}\left(\sum_i \widehat{Q}_{i,j}\right)$$

1^{er} centile

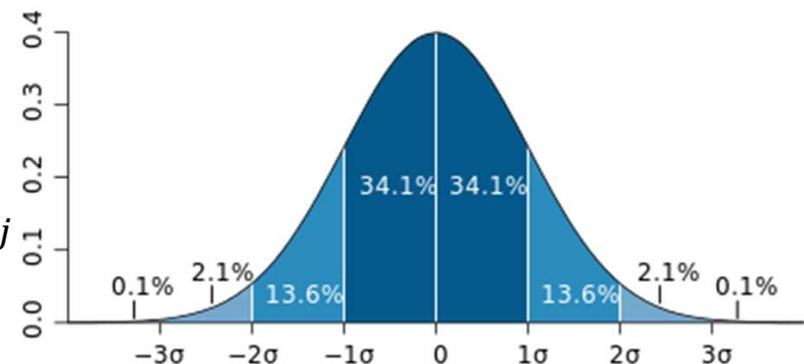
Débit simulé par Synergi entre 3 et 4 h

- On a alors le PPDFD du secteur j

$$PPDFD_j = \frac{Q_{max,j} - Q_{min,j}}{2}$$

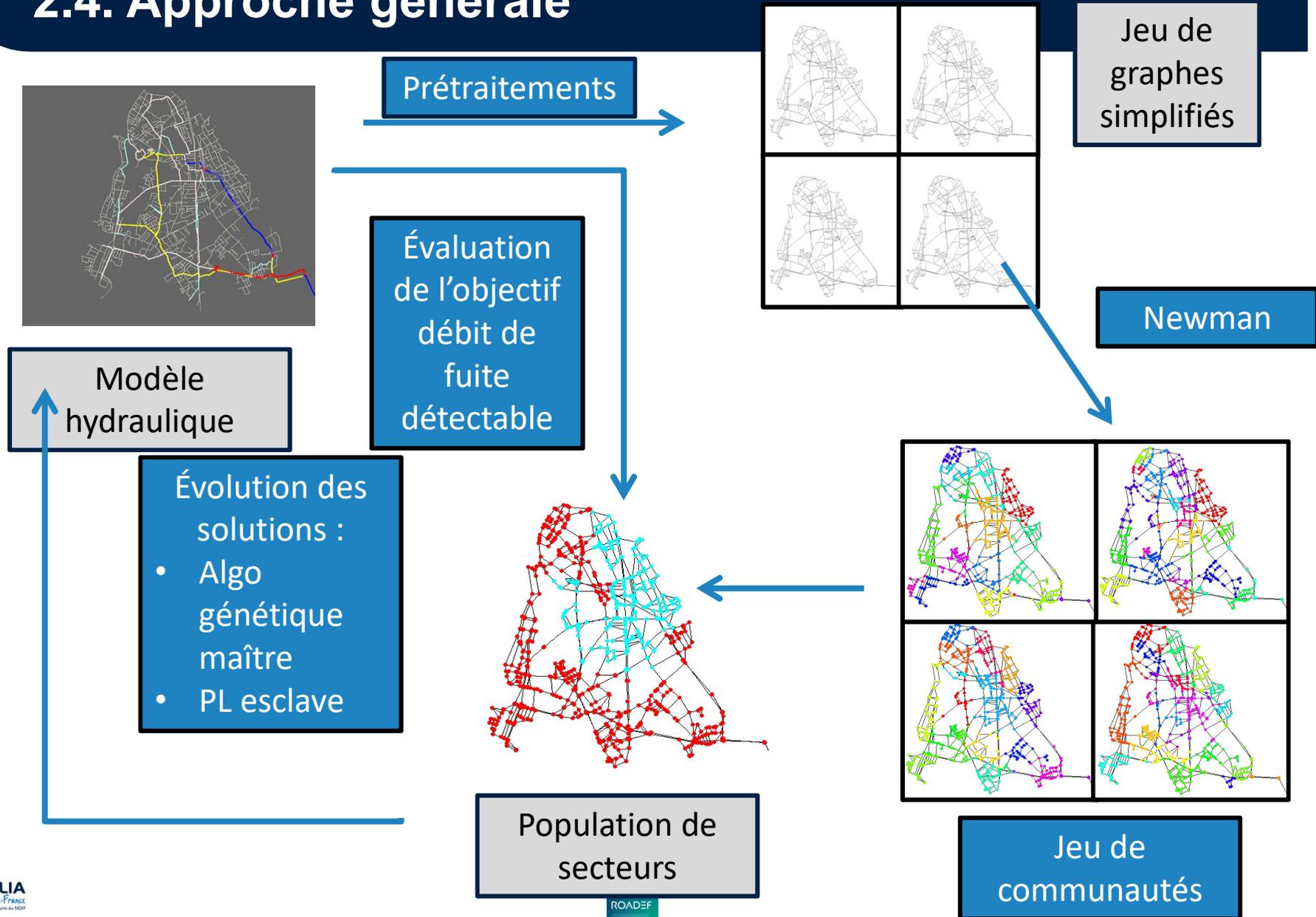
- Pour l'ensemble des secteurs :

$$PPDFD = \text{médiane}_j PPDFD_j$$



2. Méthodes

2.4. Approche générale



3. Algorithmes

3.1. Pose des vannes et des débitmètres (PL)

o Objectif

- Minimisation du nombre de débitmètres

$$\min \sum_{k=1}^K x_k$$

o Contraintes

- Bilan de masse par secteur

$$\forall (j, u) \in \llbracket 1, N \rrbracket. \llbracket 1, K \rrbracket \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N q_{k,u} \cdot A_{k,i,j} - \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^N q_{k,u} \cdot A_{k,l,j} = d_j$$

- Capacité de transfert des arêtes

$$\forall (k, u) \in \llbracket 1, K \rrbracket. \llbracket 1, K \rrbracket \begin{cases} q_{k,u} \leq q_k^{\max} \cdot y_{k,u} \\ q_{k,u} \geq -q_k^{\max} \cdot y_{k,u} \end{cases}$$

- Simulation de casse des arêtes

$$\forall (k, u) \in \llbracket 1, K \rrbracket^2 \begin{cases} y_{k,u} = x_k \text{ si } k \neq u \\ y_{k,u} = 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

- Nombres minimal et maximal de débitmètres

$$\forall j \in \llbracket 1, N \rrbracket \quad x_j^{\min} \leq \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N x_k \cdot (A_{k,i,j} + A_{k,j,i}) \leq x_j^{\max}$$

- Arêtes obligatoirement ouvertes

$$\sum_{k=1}^K o_k \cdot x_k = N_o$$

o Notations

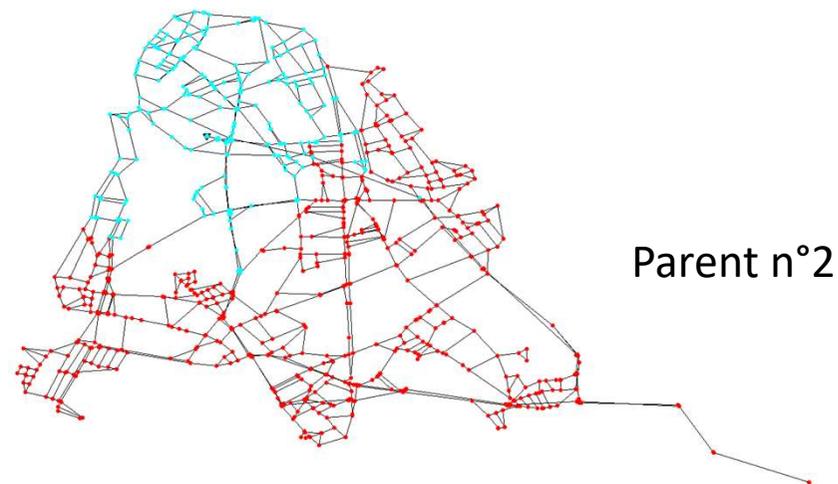
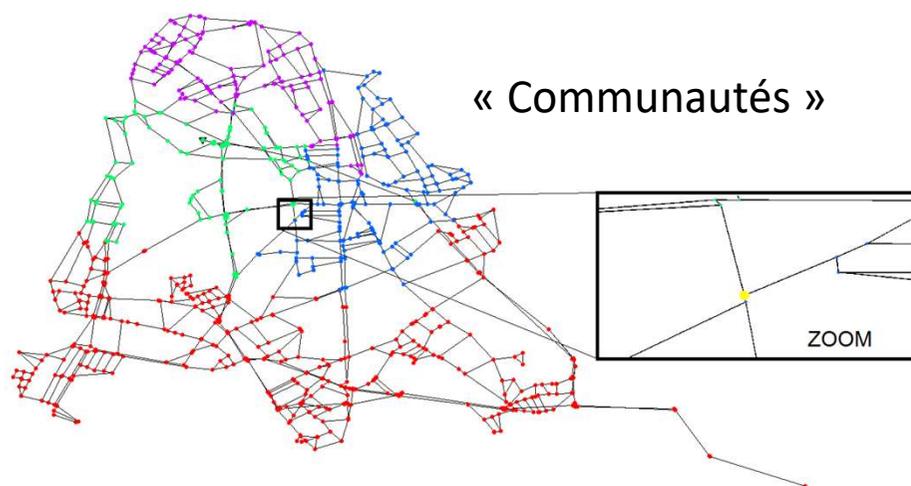
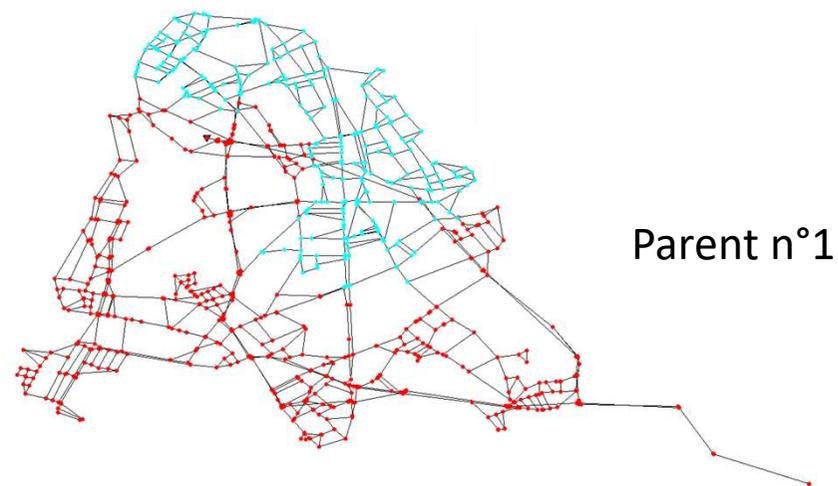
N	nombre de secteurs ($N > 1$)
K	nombre d'arêtes admissibles entre secteurs
$O_{k \in \llbracket 1, K \rrbracket}$	vecteur des arêtes obligatoirement ouvertes (la $k^{\text{ème}}$ composante vaut 1 si la $k^{\text{ème}}$ arête doit obligatoirement être ouverte)
N_o	nombre d'arêtes obligatoirement ouvertes
$A_{k,i,j \in \llbracket 1, K \rrbracket. \llbracket 1, N \rrbracket^2}$	matrice d'adjacence. Matrice non- symétrique car les arêtes sont orientées.
d_j	demande de pointe du secteur j
x_j^{\min}	nombre minimal de débitmètres pour le secteur j
x_j^{\max}	nombre maximal de débitmètres pour le secteur j
$x_{k \in \llbracket 1, K \rrbracket}$	variable booléenne qui vaut 1 si l'arête k est ouverte et équipée d'un débitmètre
$y_{k,u \in \llbracket 1, K \rrbracket. \llbracket 1, K \rrbracket}$	variable booléenne qui vaut 0 si l'arête k est inactivée lors de la simulation de casse u
$q_{k,u \in \llbracket 1, K \rrbracket. \llbracket 1, K \rrbracket}$	variable réelle qui vaut le débit circulant dans l'arête k lors de la simulation de casse u

3. Algorithmes

3.2. Evolution des secteurs (GA)

o Étape de croisement

- Création de « communautés » à partir de deux parents : deux sommets sont dans la même communauté si, pour chacun des parents, ils étaient dans le même secteur
- Création de deux enfants par algo glouton stochastique

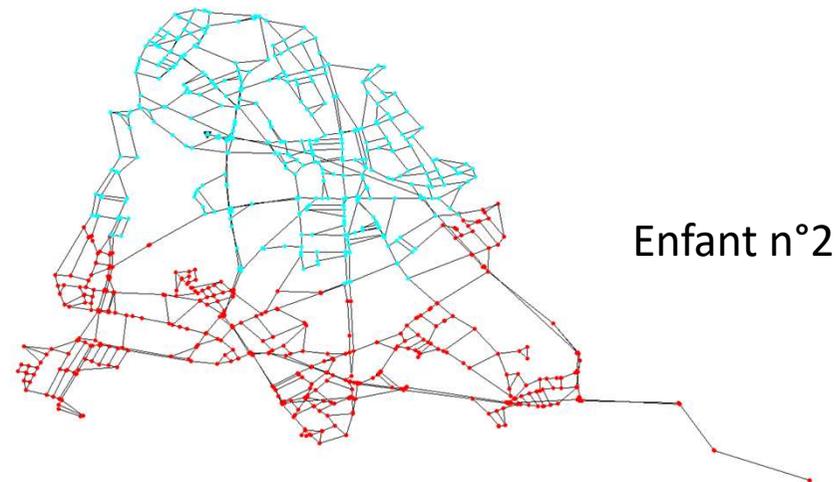
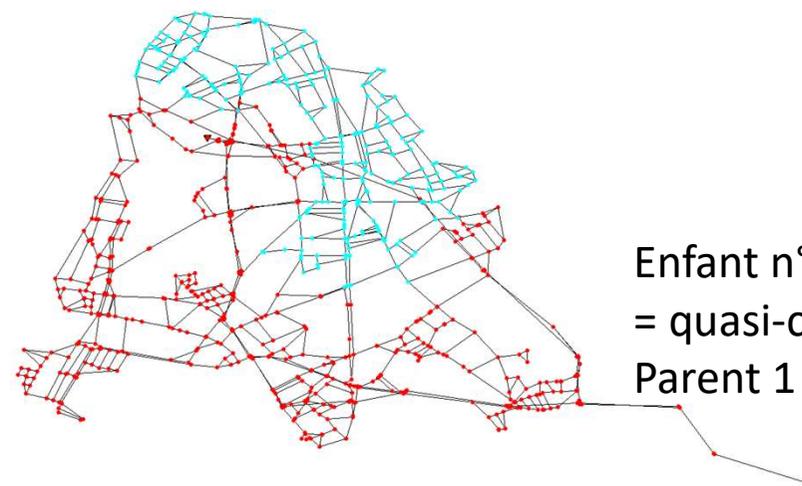
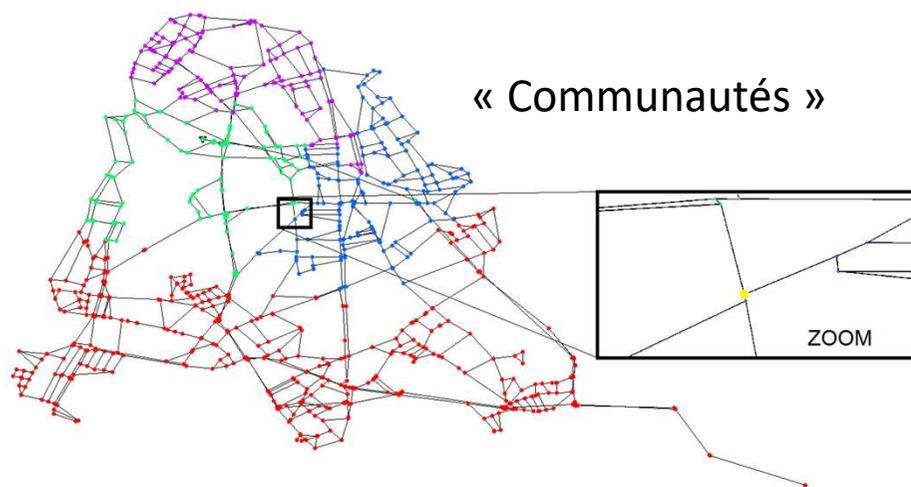


3. Algorithmes

3.2. Evolution des secteurs (GA)

o Étape de croisement

- Création de « communautés » à partir de deux parents : deux sommets sont dans la même communauté si, pour chacun des parents, ils étaient dans le même secteur
- Création de deux enfants par algo glouton stochastique
 - Taille des secteurs
 - Maximisation des possibilités de transferts entre secteurs

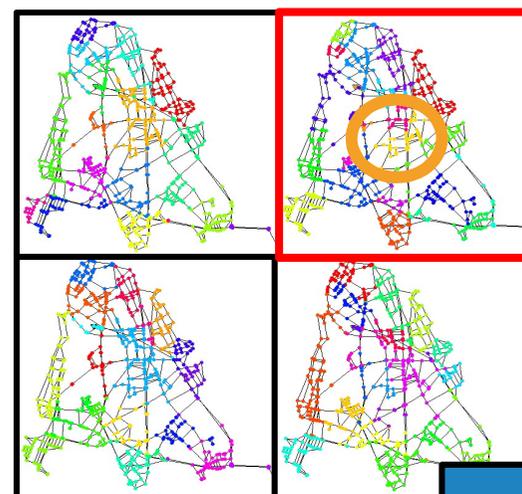
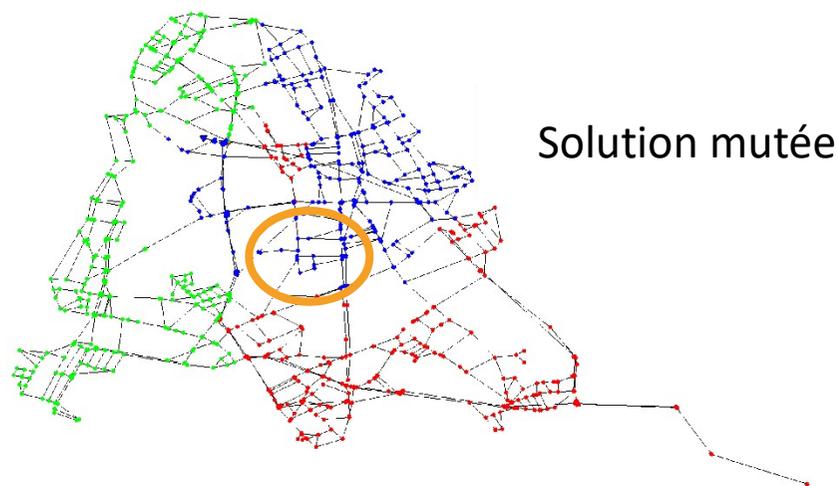
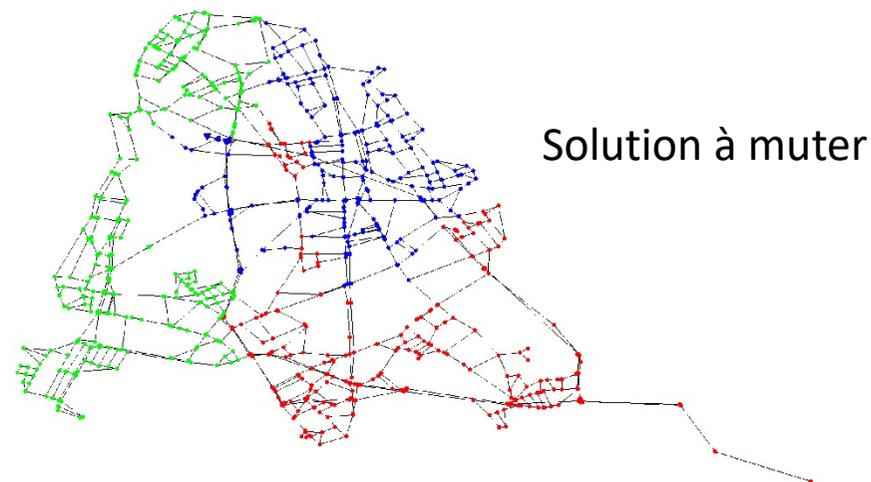


3. Algorithmes

3.2. Evolution des secteurs (GA)

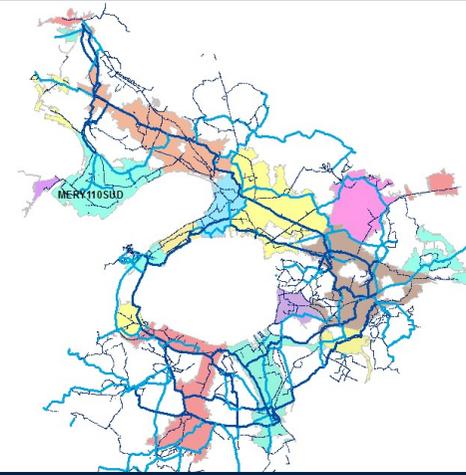
o Étape de mutation

- Grignotage : superposition
 - Solution à muter
 - 1 jeu de communautés tiré aléatoirement
 - Choix d'une communauté à cheval sur deux secteurs
- Fusion de secteurs
- Fission de secteurs

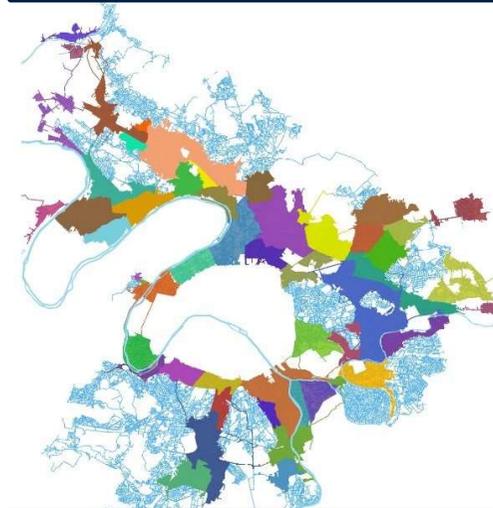


4. Conclusion

- Étapes suivantes
 - Validations hydrauliques
 - Minimisation du nombre de vannes
 - Test de défense incendie
 - Analyse des pertes de charge
 - Travaux de mise en œuvre
- Principaux chiffres
 - Aujourd'hui
 - Linéaire moyen : 200 km
 - 40 étages de pression
 - Demain
 - Linéaire moyen : 110 km
 - 36 secteurs créés
 - Des fuites détectables entre 3 et 120 m³/h selon le secteur
- Apports et limitations
 - Approche Monte-Carlo pour le PPDFD
 - Croisement et mutation spécifiques au problème
 - Limites d'un algo génétique : lent
 - Objectifs pas forcément contradictoires



Première sectorisation à dire d'experts

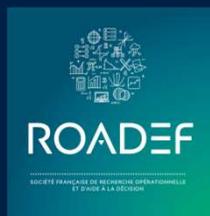


Plan de sectorisation final



Merci de votre attention

Pierre.mandel@veolia.com



GDR ROD, Journée Optimisation dans les réseaux hydrauliques

