

LE RENDEZ-VOUS INTERNATIONAL
CONFÉRENCES | ATELIERS | EXPOSITION

THE INTERNATIONAL MEETING
CONFERENCES | WORKSHOPS | EXHIBITION

HPC
SIMULATION
BIG DATA

Forum Teratec

Unlock the future!

11 & 12 JUIN 2019
JUNE 11 & 12

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
PALAISEAU-FRANCE

PLATINUM SPONSORS

Atos

DELL
Technologies

Hewlett Packard
Enterprise

intel

GOLD SPONSORS

BECHTLE

cea

CRAY

DDN
STORAGE

Mellanox
TECHNOLOGIES

SILVER SPONSORS

arm

AEMPO

2crsi

FUJITSU

GENCI

Microsoft

NVIDIA

Western Digital

XILINX

PARTENAIRE
CAFÉ EUROPÉEN
DE LA RECHERCHE

Inria
inventeurs du monde numérique

AVEC LE SOUTIEN DE

PARIS
REGION
Ile de France

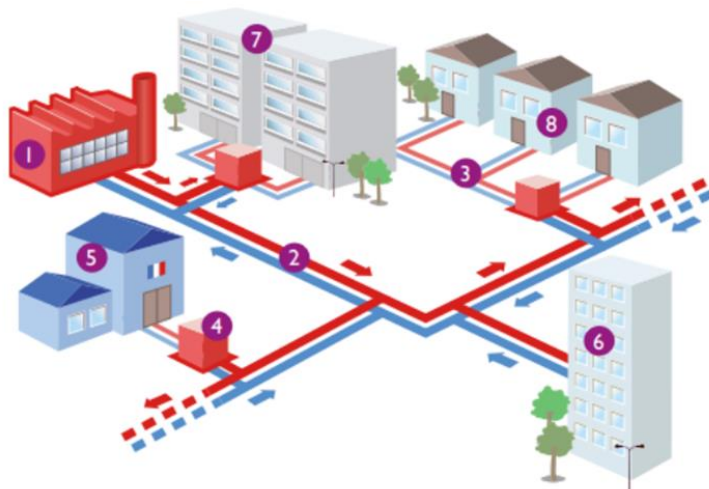
Outil d'aide à la décision au service de la transition énergétique

La simulation numérique au service de la planification des réseaux de chaleur et de froid

Réseaux de chaleurs urbains

Contexte

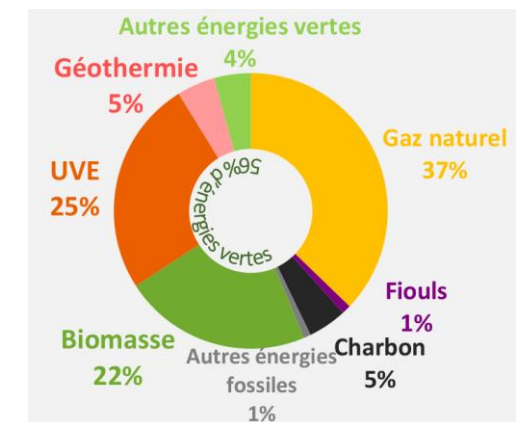
- Quelques Chiffres (France 2017) [SNCU2018]
 - > 5 397 kilomètres de réseaux de chaleur
 - > 761 réseaux de chaleur dans 350 villes (38 212 bâtiments)
 - > 25 millions de MWh d'énergie thermique livrée (5% du besoin en chauffage)
 - > 56 % d'énergies renouvelables et de récupération dans le mix énergétique:



- ① Unité de production de chaleur
- ② Réseau de distribution primaire
- ③ Réseau de distribution secondaire
- ④ Sous-station
- ⑤ Bâtiment public
- ⑥ Immeuble de bureau
- ⑦ Logements collectifs
- ⑧ Logements individuels

Illustration d'un réseau de chaleur (source: [SNCU2018])

Composition du mix énergétique des réseaux de chaleurs en France (source: [SNCU2018])



Réseaux de chaleurs urbains

Principaux enjeux des opérateurs

- Étendre les réseaux de chaleurs
- Optimiser le déploiement des réseaux
 - > Déployer 1 mètre linéaire de réseau de chaleur coûte entre 300€ et 1300€
 - > Réseaux de plusieurs dizaines de kilomètres
 - ➔ Investissements de plusieurs dizaines de M€
 - Objectif: Rentabiliser le déploiement du réseau
 - Raccorder un maximum de stations avec un minimum de linéaire
 - Forcer le raccordement à certains bâtiments ciblés
- Tester leur business model sous différentes hypothèses
 - > Envisager plusieurs tracés alternatifs (aménagements, objectifs, ...)
 - > Impact du réchauffement climatique sur la consommation
 - > Évolutions urbaines
 - Dé-constructions de bâtiments énergivores
 - Constructions mieux isolées

Réseaux de chaleurs urbains

Contraintes opérationnelles

- Déploiement à l'échelle d'une ville
 - > Grand nombre de stations potentielles
- Contraintes principales:
 - > Intégration à un réseau/point de production existant
 - > Contraintes spatiales: utilisation du réseau routier, contournement d'obstacles, Géo-barrières
 - > Rentabilité du réseau déployé (notion de densité thermique linéaire: critère métier)
- Autres contraintes potentielles:
 - > Densité du sous-sol (Impacte le coût des travaux)
 - > Possibilité de mutualisation des travaux

Réseaux de chaleurs urbains

Conception actuelle des tracés

Fonctionnement « manuel »:

- Opération sous un logiciel de SIG:
 - > Pas de notions métier nativement
 - > Aucune capacité d'optimisation automatisée
- Quelques tracés intuitifs envisagés
 - > Principes empiriques: raccorder d'abord les gros consommateurs
 - > Très largement sous optimal
- Très difficiles à maintenir et à faire évoluer dans le temps

Objectif pour le tracé :

1. Raccorder un **maximum de clients (maximisation de la consommation raccordée)**
2. **Minimiser la longueur globale** du tracé
3. Respecter les **contraintes locales de rentabilité minimale** de chaque segment de raccordement.
4. Contraintes spatiales (réseau routier, obstacles)

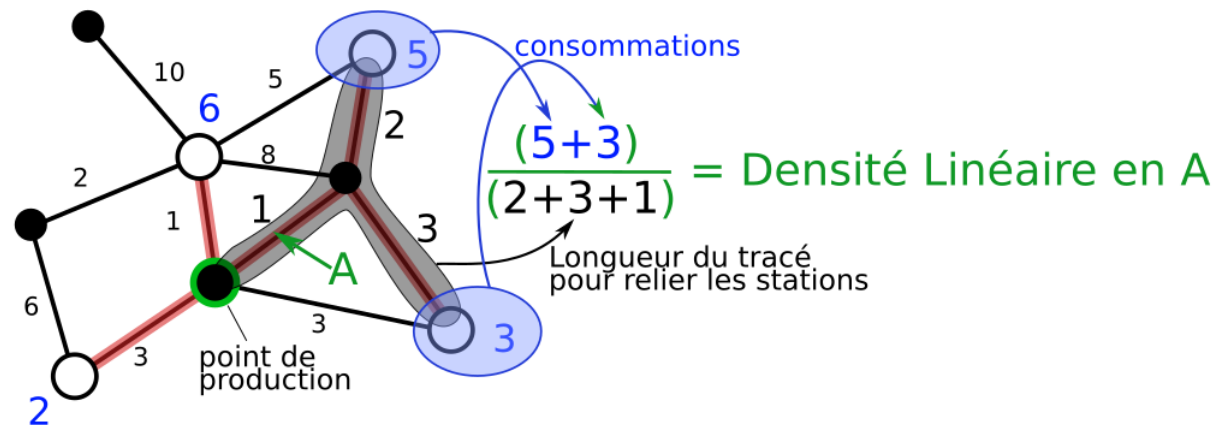
➡ **Problème bi-objectif (1 et 2) sous contraintes (3 et 4)**

Modélisation

Notion de densité thermique linéaire

- Notion de densité thermique linéaire (ou densité linéaire):
 - > Définie sur chaque tronçon de l'arbre solution
 - > Nécessite un point de raccordement initial (i.e. le point de production)
 - > Définition récursive, dans l'arbre dont la racine est le point de raccordement

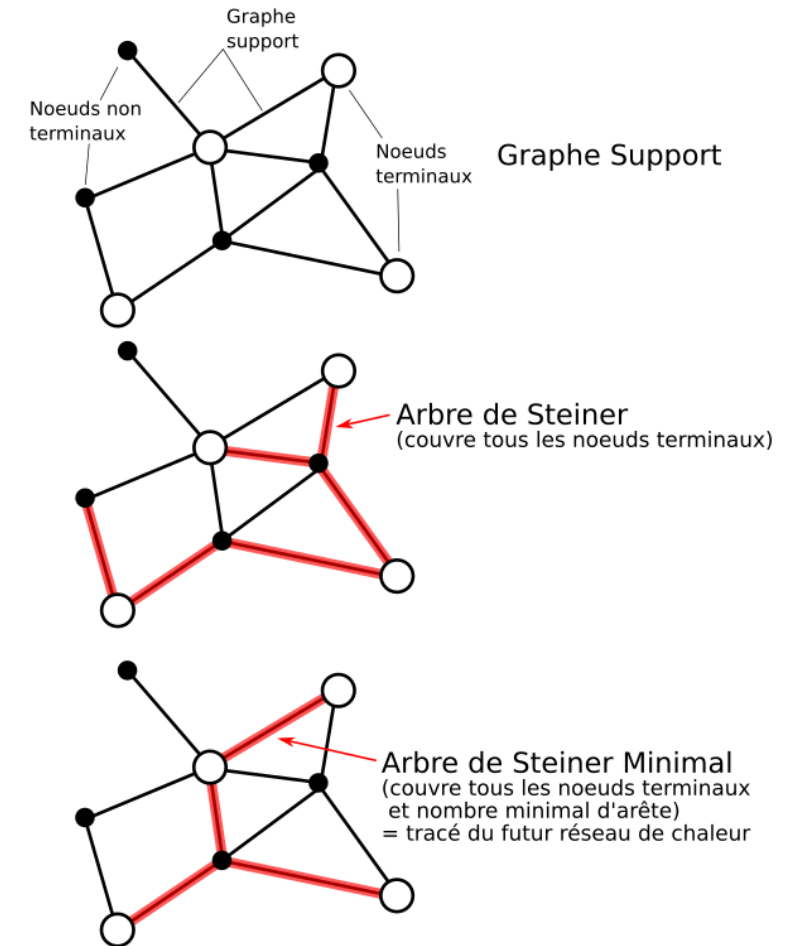
$$DL = \frac{\text{Somme des consommations raccordées en aval}}{\text{Somme des longueurs des tronçons en aval}}$$



Modélisation

Théorie des graphes – Quelques définitions

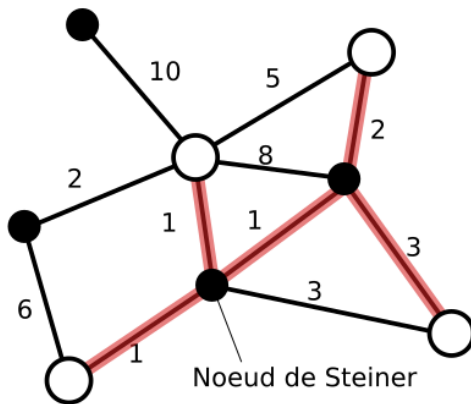
- **Grphe support:**
 - > nœuds = intersections réseau routier
 - > nœuds terminaux = stations
 - > arêtes = routes et chemins de raccordement
 - poids des arêtes: longueur des routes
- **Arbre de Steiner:**
 - > Arbre couvrant tous les nœuds terminaux
- **Arbre de Steiner Minimal:**
 - > Arbre couvrant tous les nœuds terminaux, s'appuyant sur le graphe support et de poids minimal



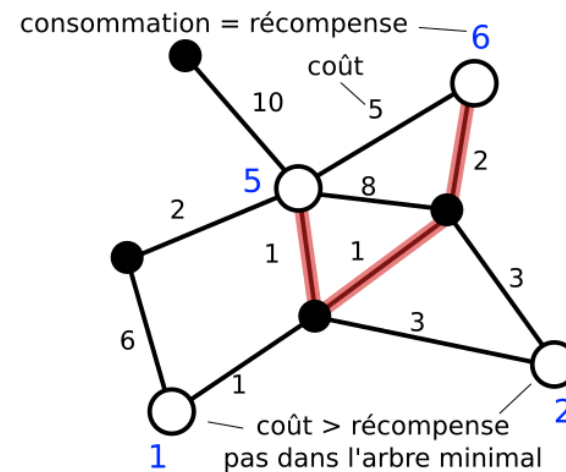
Modélisation

Prize-Collecting Steiner Tree Problem (PCST)

- Généralisation du problème de l'arbre de Steiner:
 - > Dans le problème PCST, les nœuds terminaux (les stations) ont un "prize" qui récompense le fait de connecter ces nœuds.



Arbre de Steiner Minimal
Minimisation Longueur



Solution optimale du Prize-Collecting Steiner Tree (PCST)
Maximisation Gain

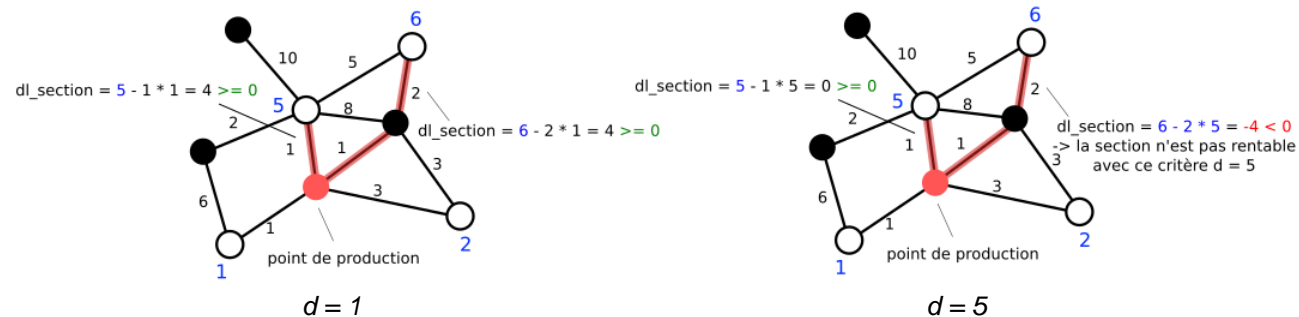
- **Gain = Récompenses - Coûts**
 - > Agrégation des deux objectifs
- **Maximisation du gain:** il n'est pas nécessaire de raccorder tous les nœuds terminaux

Modélisation

Prize-Collecting Steiner Tree Problem (PCST)

- Ce que fait PCST:
 - > Prise en compte de la contrainte de densité linéaire (d):
$$\frac{\text{consommations raccordées}}{\text{coûts de raccordement}} \geq d$$
 - > Pour l'objectif du problème d'optimisation, le gain est donc redéfini comme:
$$\text{consommations raccordées} - d \times \text{coûts de raccordement}$$

➔ **Un nœud terminal rentable respecte la densité linéaire**



- Ce que ne fait pas PCST:
 - > Ne maximise pas la consommation rentable raccordée

Modélisation

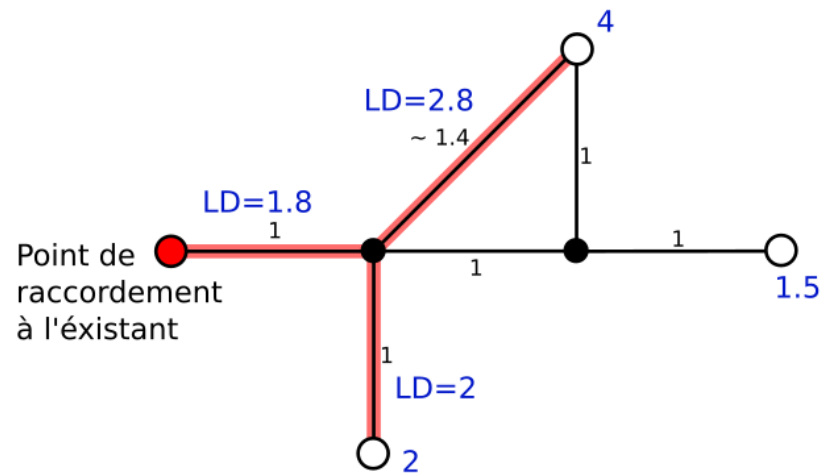
Gains constatés

- Optimalité vérifiée sur les cas de référence de **Zuse Institute Berlin (ZIB)** : <http://steinlib.zib.de>
- Gains par rapport aux tracés manuels
 - > Comparaisons difficiles
 - > Retours d'expérience clients:
 - En moyenne, 10% d'économies par rapport aux tracés
 - Gains de temps très importants

Modélisation

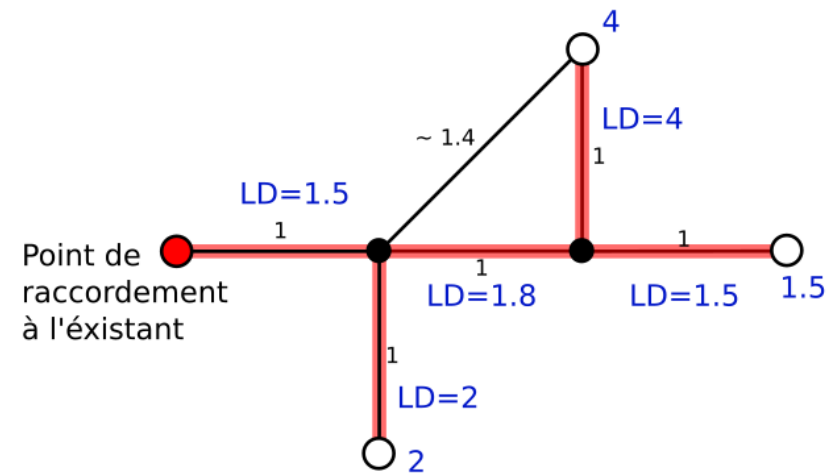
Maximisation de la consommation raccordée

- PCST maximise le “gain” → Choix solution 1 (gain 2.6 > 2.5) pour $d=1$
- Solution désirée: Solution 2 (Consommation totale 7.5, contraintes de rentabilité satisfaites)



Solution 1

$$\text{Gain} = 6 - 3.4 = 2.6$$



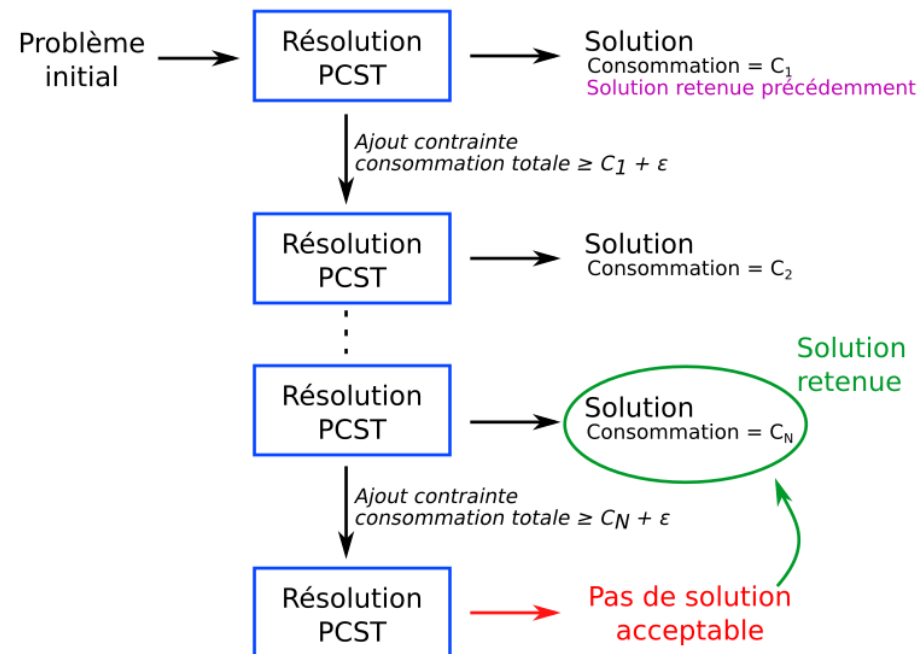
Solution 2

$$\text{Gain} = 7.5 - 5 = 2.5$$

Modélisation

Maximisation de la consommation raccordée

- Principe: forcer PCST à raccorder plus de stations, i.e. augmenter la consommation rentable raccordée.



- > PCST donne à chaque itération le tracé optimal en gain, pour une consommation minimum donnée
- > Augmentation de la consommation minimale d'un epsilon arbitraire à chaque itération
- > Vérification à chaque itération que la contrainte de densité linéaire est vérifiée
- > Arrêt quand plus d'amélioration possible
- > **Note:** La plupart des calculs sont mutualisés entre les itérations.

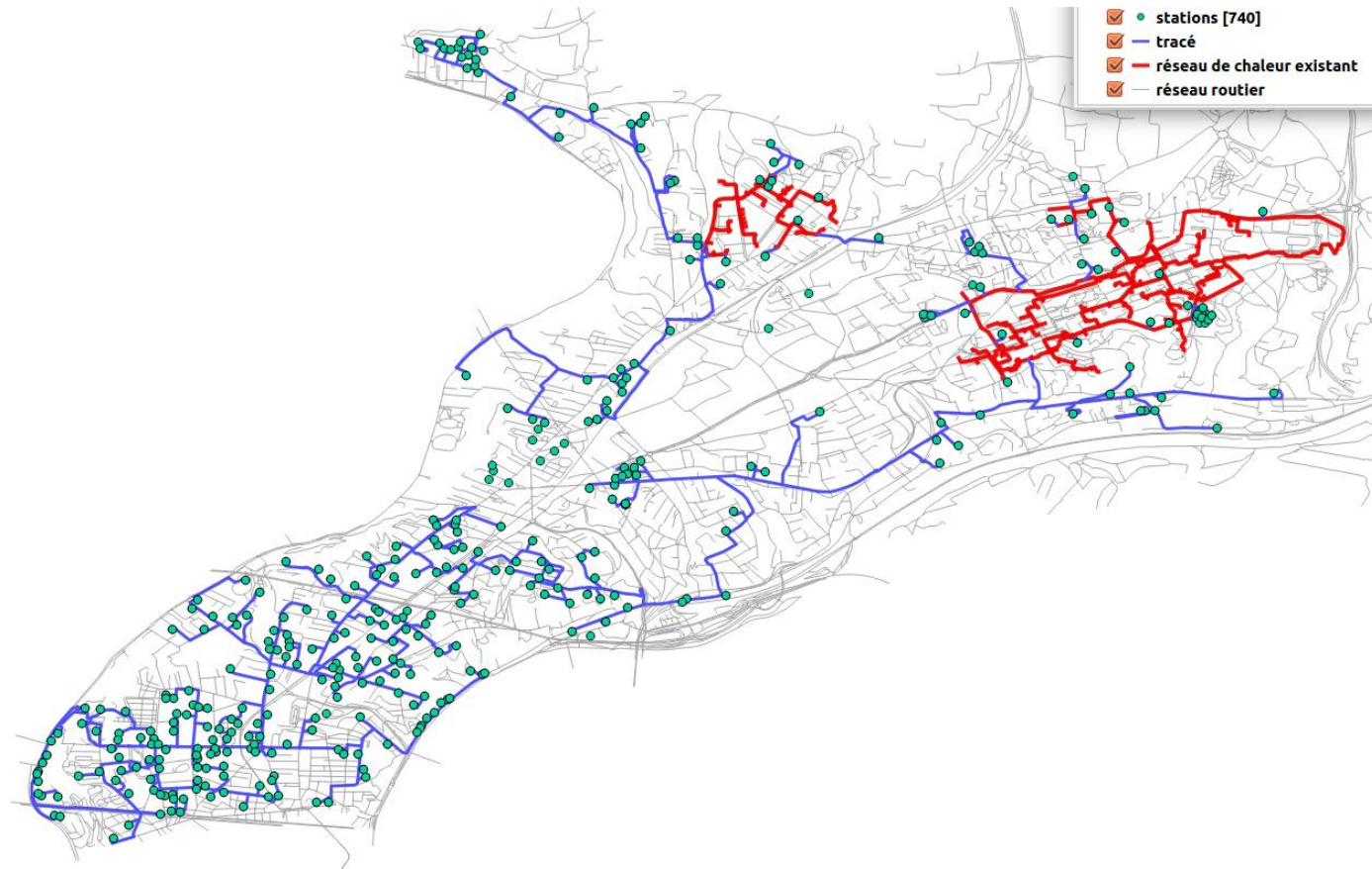
Modélisation

Comparaison des résultats sur cas réel

Algorithme	Longueur Réseau (m)	Densité Linéaire Minimum (MWh/m)	Densité Linéaire Moyenne (MWh/m)	Consommation (MWh)	Gain (Conso-LD*Longueur) (Mwh)	Nombre stations raccordées
Minimum Linear Density = 1.5						
PCST	5,650.95	1.73	3.07	17,600.00	9,123.57	40.00
PCST-conso	5,650.95	1.73	3.07	17,600.00	9,123.57	40.00
Minimum Linear Density = 2						
PCST	4,556.92	2.30	3.39	15,600.00	6,486.16	34.00
PCST-conso	4,865.88	2.12	3.29	16,200.00	6,468.25	36.00
Minimum Linear Density = 2.5						
PCST	3,990.69	2.60	3.56	14,300.00	4,323.28	32.00
PCST-conso	3,990.69	2.60	3.56	14,300.00	4,323.28	32.00
Minimum Linear Density = 3						
PCST	1,495.87	3.77	5.38	7,400.00	2,912.40	15.00
PCST-conso	1,495.87	3.77	5.38	7,400.00	2,912.40	15.00

Modélisation

Exemple de tracé



Merci de votre attention

Modélisation

Temps de calcul – Avant amélioration

- Cas réels

Nb arêtes	Nb nœuds	Nb SST étudiées	Contrainte de densité linéaire (MWh/m)	Densité linéaire atteinte (MWh/m)	Temps de calcul (s)	Nb SST Raccordées	Consommation (MWh/an)	Longueur réseau final (m)
424	334	27	4,5	4,81	3,85	11	5400	1122
569	449	31	1,5	1,95	9,73	14	6565	3361
323	267	26	3	3,68	4,53	17	8200	1929

Modélisation

Temps de calcul – Après amélioration

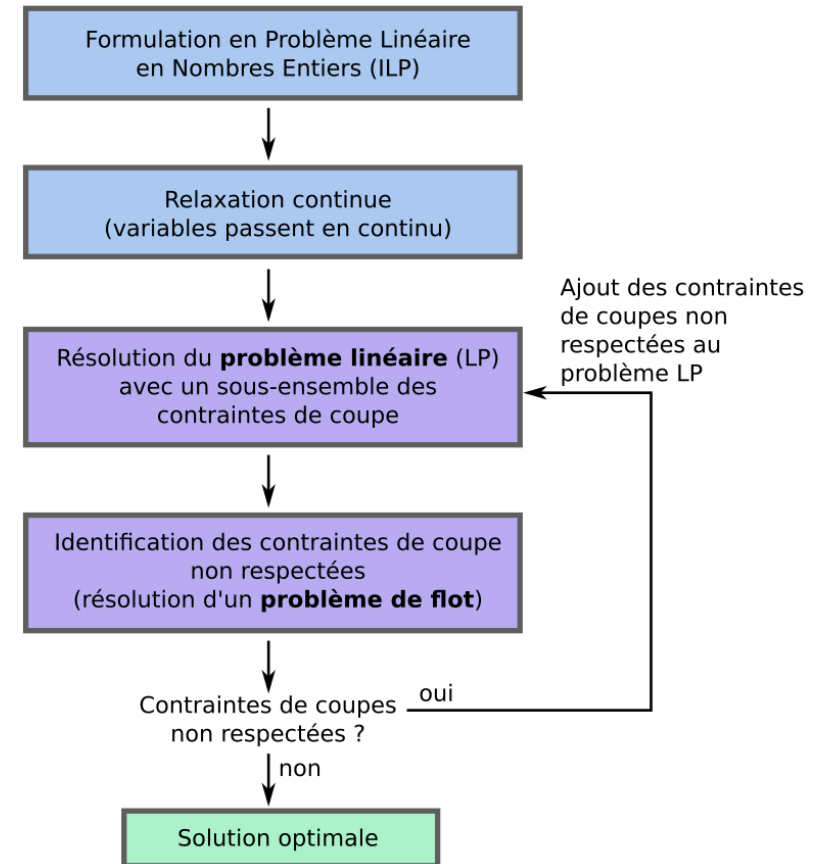
- Cas tests sans contraintes de densité linéaire

Nb arêtes	Nb nœuds	Nb SST étudiées	Temps de calcul (s)	Longueur réseau final (m)
527	434	8	4,47	4304
1288	1012	20	132,61	8559
570	477	20	41,52	9271
1268	703	100	69,88	16411
992	1268	8	22,33	5133
1446	1170	100	274,19	17084
635	523	50	94,35	10935
1097	863	50	137,07	15052
544	431	3	2,27	2268

Modélisation

Méthode de résolution / PCST

- Formulation sous la forme d'un **problème linéaire en nombres entiers**
 - > **Variables:** utilisation d'une arête du graphe ou non
 - > **Contraintes:**
 - Structure d'arbre (pas de boucles)
 - Connexité de la solution
 - Racine de l'arbre = point de production
 - > **Objectif:** Maximisation du gain
- Résolution par une méthode de **Branch&Cut:**
 - > Résolution de la relaxation continue
 - > Génération de coupe par un problème de flot



Modélisation

Bibliographie principale

- **[Ljubic2004]** Ivana Ljubić, René Weiskircher, Ulrich Pferschy, Gunnar Klau, Petra Mutzel, and Matteo Fischetti. Solving the prize-collecting steiner tree problem to optimality, 2004.
- **[Uchoa1999]** Eduardo Uchoa, Marcus Poggi de Aragão, and Celso Ribeiro. Preprocessing steiner problems from vlsi layout. NETWORKS, 40 :38–50, 1999

Modélisation

Données urbaines de base

- Utilisation d'une représentation numérique de la ville
- Données consolidées et enrichies par ForCity et ses partenaires
 - > Chemins potentiels pour les canalisations (généralement le long des routes)
 - Passages possibles à l'intérieur de certains espaces (friches, champs...)
 - > Données des stations:
 - Localisation (dans les bâtiments, sur les toits, à l'extérieur)
 - Données énergétiques (consommations, taux d'utilisation, type)
 - > Données clients
 - Localisation des réseaux de chaleur/froid existants
 - Localisation des points de production (incinérateurs, centrales)
 - > Données des obstacles naturels et artificiels:
 - Fleuves (infranchissables)
 - Bâtiments
 - Autoroutes, lignes de trains/métro/tram: très coûteuses à traverser
- Évolution des données dans le temps