

THÈSE

UNIVERSITE DE PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR

Ecole doctorale des sciences exactes et leurs applications (ED SEA)

Présentée et soutenue le 14 septembre 2016

Par **Théophile MERTZ**

Pour obtenir le grade de docteur

De l'Université de Pau et des Pays de l'Adour

En mécanique des fluides, énergétique, thermique, combustion, acoustique

Spécialité : Énergétique

OPTIMISATION SIMULTANÉE DE LA CONFIGURATION ET DU DIMENSIONNEMENT DES RÉSEAUX DE CHALEUR URBAINS

MEMBRES DU JURY

RAPPORTEURS

- Mme Catherine AZZARO-PANTEL PR / ENSIACET-LGC
- M. Assaad ZOUGHAIB MC HDR/ Mines ParisTech

EXAMINATEURS

- M. Marc CLAUSSE PR/ INSA Lyon- CETHIL
- M. Philippe LAGIERE MC / NOBATEK-INEF4

DIRECTEURS

- M. Jean-Michel RENEAUME PR / UPPA-ENSGTI-LaTEP

Co-ENCADRANTS

- M. Sylvain SERRA MC/ UPPA-ENSGTI-LaTEP



ÉPIGRAPHE

"I used to think the top global environmental problems were biodiversity loss, ecosystem collapse and climate change. I thought with 30 years of good science we could address those problems, but I was wrong. The top environmental problems are selfishness, greed and apathy - and to deal with these we need a spiritual and cultural transformation and we scientists don't know how to do that."

Gus Speth, professeur en droit et ancien administrateur du programme de développement aux Nations Unies



Illustration de l'édition spéciale Mon quotidien 2015-2016, participation ADEME et VIASEVA

REMERCIEMENTS

Un grand merci à Mme C. Azzaro-Pantel, M. A. Zoughaib et M. M.Clausse d'avoir évalué mon travail, dans un temps imparti afin de clôturer en 3 ans ces travaux, ainsi que pour leurs remarques constructives.

Je suis reconnaissant envers Sylvain et Jean-Michel, pour votre suivi, vos encouragements, votre rigueur et votre disponibilité. En bref, « en essayant continuellement, on finit par réussir. Donc : plus ça rate, plus on a de chance que ça marche. »

À mes collègues de labo, JC pour avoir établi un horaire pour les blagues au bureau, Lorenzo pour ta conception de la vie en confrontation avec ma rigueur allemande alsacienne et au Kdo accroché au bureau qui a égayé les pauses, à Éric qui « ne mange pas de viande le soir, juste du poulet ou de la dinde », à Adrien notamment pour Antidote, le fameux logiciel de correction orthographie...qui sert jusque dans les mails « il semble que vous vouliez joindre un document, or aucun fichier n'est joint », à Fabien un bureau plus loin, mais enfin un copain avec qui parler de GAMS, merci pour les données thermo, les discussions-rêveries des sorties dans nos belles Pyrénées et votre accueil inconditionnel à toi et Julie lors de mes passages sur Pau. Mais aussi aux collègues, anciens profs à GTI, j'ai adoré découvrir le côté obscur de la salle de convivialité, forcément, si j'en suis là, c'est en partie grâce à vous, merci et longue vie à GTI.

À NOBATEK de m'avoir aussi bien accueilli et de la confiance que vous m'avez accordée depuis mon stage de fin d'études à mon embauche actuelle en CDI, Aurélien pour tes relectures...mon style et esprit de synthèse (même si on peut toujours s'améliorer) t'en sont reconnaissant. À Jérôme et Philippe, que je sollicitais au moins 2 fois par an pour confirmer les orientations du travail, merci pour votre suivi. Merci Ruby et Coralie, pour les nombreux échanges, sur tout sur rien et surtout les RCU, les crapahutages dans les galeries du RCU de l'IUT ! Batiste, tu y as loupé, j'étais en pleine rédaction...merci bien pour tes relectures de chapitres et les récents échanges sur le code ! Merci Stéphanie pour nos discussions en interne pour mieux discerner l'optimisation multiobjectif de l'aide à la décision multicritère et la découverte de l'outil xdat. Fabien, pour ton 2ème écran en héritage qui m'a sauvé pour la rédaction et la programmation depuis mon ptit bureau douillet, les réflexions (avec Steph aussi) sur le logiciel de suivi de bibliographie. À Jeremy pour son entrain quotidien et son brin de folie qui pimente la vie, Batiste et Paul pour m'avoir allumé... la station de calcul ou me redonner le code d'accès. Merci Julie pour les cours de langue et les astuces de grand-mères : « ton thé t'a-t-il ôté ta toux ». Jlaf, pour sa communication sur GIT...un logiciel de suivi de version de code. Mais comment aurais-je pu faire sans !? Aux autres doctorants et les échanges, entre autres initiés aux Noktoriales. Et à tous ceux que j'oublie, je suis ravi de venir travailler le matin, partager un café ensemble, râler à la pause, projeter des trails, des WE dans les Pyrénées, s'arracher les cheveux sur un projet, faire des plans sur la comète « nearly zero energy ».

À mes amours de colocs, de Pau et de Bordeaux, pour votre soutien quotidien, ma famille « adoptive » comme j'ai l'habitude de dire. Merci à Johannes, pour ta relecture avec ta formation Sciences Po option géopolitique de l'eau...et le gerмоir de graine ! Juju, mon partenaire de grimpe de la belle époque fluo...qui est depuis infidèle en préférant la slack. Merci pour le réveil matinal en music. Mimi, ta bonne humeur est communicative, hééééé ptit chat, ne part pas !!!! Sarah, entrepreneuse à tes heures perdues, une vision formation géographe et gestion des risques, que la sérénité de la forêt t'accompagne. Nono, le doyen, le mentor du trail, une carrière post thèse de rêve et ton soutien durant ma traversée des Pyrénées, si je n'ai pas abandonné à la 2ème semaine, c'est grâce à toi. Mamar, une ancienne aussi, toujours le smile, qu'on revoit toujours avec « Plaisir » à Lescun. Laura coloc intermédiaire et intrépide-imprévisible-irrésistible colibri. Coco, l'ancienne, la prochaine, Mme touche à tous les sports, une hygiène de vie irréprochable, elle nous entraîne même dans les bars espagnols...pour suivre les matchs ! Axel, le fromager, un palois d'adoption, la taillante s'en rappelle.

Je suis également reconnaissance pour les échanges avec d'autres doctorants d'horizons différents, croisé au gré des conférences: Jaques notamment pour les échanges sur solveurs GAMS, Blanche pour m'avoir conseillé de faire l'université d'été à Helsinki, Charlotte pour son état de l'art des RCU et son entrain de Lausanne à Séoul, à Jakob, Fabien et Pablo pour avoir refait le monde depuis Lausanne, ainsi qu'à JB à ECOS, François, Anaïs pour les réflexions en début de thèse à Roskoff, à Sophie pour l'échange entre approche par SIG et optimisation. Bon courage à ceux qui n'ont pas fini et longue vie aux autres.

Loin des yeux, proche du cœur...merci au soutien inconditionnel de ma famille, allant de mes convictions que j'essaye tant bien que mal d'appliquer aussi bien dans ma vie privée que dans mon travail, jusqu'à mes aspirations personnelles vers des sommets enneigés. À mes parents qui ont toujours œuvré depuis mon plus jeune à âge à mon bonheur, mon épanouissement, mes études, mes amours, mes emmerdes (pour la chanson !). À mes frères & sœurs, pour m'avoir agacés, écoutés, taquinés, soutenus. À mon frère qui rêvait d'être masseur, mais c'est finalement ma sœur qui est devenue kiné, félicitation. Courage doudou pour la PSI*, que l'étoile te guide. Evelyne, avec ou sans b(l)ague, ici ou là-bas, à Cham ou en Lozère.

Aux Alsaciens qui se reconnaîtront, je suis toujours ravi de vous retrouver en Alsace ou ailleurs. Mais il faut que je l'écrive, l'Alsace, c'est loin depuis le sud-ouest, mais toujours aussi accueillant, faut y faire un tour !

Aux GTlens m'ayant vu mûrir, aux copines et plus si affinités pour partager notre amour de la vie avec JPB (de Jurançon à Paris voire jusqu'à Bruxelles), mais aussi avec JMR (toujours de Jurançon avec un détour par Martigues pour finir à Rennes) et à MP (Marseille pour revenir à Pau au WE des anciens). Je pense avoir fait le tour des copains originaires, passant ou bossant dans ces villes-là et remercié aux passages des personnages emblématiques de l'école.

Aux amoureux de la montagne et de la vie, hors catégorie et soutien indiscutable, depuis...un certain temps bien avant la traversée des Pyrénées (merci encore pour les ravitaillements), Hadelin, mon mentor accompagné de sa princesse pour les plans loose depuis toujours et à jamais, Audrey connue expatriée heureusement réadoptée ajoutant définitivement du piquant quant à météo...ce qui augmente considérablement l'incertitude du degré plan loose, Hugo, Elena & Boston sans qui la transition Pau-Bdx aurait été compliqué, l'arrêt au stand était une étape salvatrice pour bien finir cette course d'endurance en 3 ans. Pauline et Alexia, ravi d'avoir pu échanger sur la thématique des réseaux et la passion de la grimpe !

Toute l'équipe GP65, avec qui j'ai vécu parmi les plus beaux moments de ma vie, mais aussi un épisode sacrément terrifiant. Une belle leçon de vie permise grâce au CAF, mais plus particulièrement à l'oncle Dav pour ses conseils aussi bien « taquetique que téquenique », à Eric pour son dévouement à toute épreuve, ainsi qu'aux copains de l'équipe avec qui nous avons passé une bonne partie de nos WE et vacances à crapahuter, douter, prendre confiance, rigoler, grimper, skier, cuisiner...on prend les mêmes et on recommence !?

À Balavoine, « et pourtant il faut vivre ou survivre, sans poème, sans blesser tous ceux qu'on aime, être heureux, malheureux, vivre seul ou même à deux... » Je suis définitivement plus chercheur que chanteur !

J'aimerais finir par une citation de René Char, que plusieurs d'entre vous m'ont partagé ces derniers temps : « L'essentiel est sans cesse menacé par l'insignifiant ».

RESUME EN FRANÇAIS ET ANGLAIS

Résumé : L'objectif de ces travaux est de développer une méthode d'aide à la conception des réseaux de chaleur urbains (RCU). Cette méthode utilise un modèle de type MINLP (Mixed Integer Non Linear Programming) pour l'optimisation simultanée de la configuration et du dimensionnement d'un RCU. Aux variables continues pour l'aide au dimensionnement (température, vitesse, diamètre, aire des échangeurs), s'ajoutent des variables binaires aidant à définir la configuration du réseau (maillage et choix des technologies). La fonction objectif à minimiser est le coût total (capex et opex), qui est soumise à un ensemble de contraintes non linéaires (p. ex. pertes thermiques et de charge, bilans).

La méthode développée dans ce manuscrit offre la possibilité de connecter en cascade des consommateurs n'ayant pas les mêmes besoins en température, et de réaliser des réseaux bouclés (une canalisation par tranchée). Elle permet aussi de choisir : les consommateurs à connecter au RCU, le ou les sites de production ainsi que le type de technologie utilisée. Enfin la bonne prise en compte de la physique permet de choisir le meilleur compromis entre pertes thermiques et pertes de charge, sur une large gamme de température. Cette formulation permet donc d'optimiser des réseaux de 4^{ème} génération et de démontrer la rentabilité de l'intégration d'EnR&R sur le long terme (30 ans).

Un premier travail est réalisé afin de proposer une méthodologie de résolution en plusieurs étapes permettant l'obtention de l'optimum global. Différents cas d'études académiques sont utilisés pour présenter les intérêts multiples de cette formulation. Enfin la comparaison avec un réseau existant a permis de démontrer la cohérence des résultats du modèle et a servi de base pour l'optimisation d'un cas d'étude de grande dimension. Plusieurs études de sensibilité post-optimale sont réalisées afin de démontrer l'intérêt de cet outil pour l'aide à la conception initiale ou l'extension de RCU existants.

Mots-clés : Réseau de chaleur urbain (RCU), aide à la conception optimale, optimisation combinatoire non linéaire (MINLP), intégration d'EnR&R, analyse en coût global.

Abstract: The aim of this thesis is to develop a method that provides design assistance for District Heating Network (DHN). This tool allows simultaneously the optimization of the configuration and its sizing, thanks to an MINLP formulation (Mixed Integer Non-Linear Programming). Binary variables help to choose the optimal configuration (network layout and technologies of production), whereas continuous variables help DHN sizing (temperature, diameter, velocity, heat exchanger area, thermal generating capacity ...). The objective function to minimize is the total cost (capex and opex), subjected to numerous nonlinear constraints (e.g. thermal losses, pressure drop, energy balance).

This method enables to design temperature cascade between consumers, when consumer temperature requirements are different, and also looped network (only one pipe in one trench). It helps also the decision to connect (or not) consumers to the main network and also the location(s) and type(s) of the heating plant. Moreover, the arbitrage between heat losses and pressure drops is taken into account thanks to physical considerations (non-linear equations). Eventually, it is possible to design 4th generation DHN and prove their financial profitability over the long terms (30 years).

First a multi-step resolution strategy is proposed to ensure finding global optimum of the complex MINLP problem. Then academic study cases are analyzed to underline the numerous assets of the formulation. Finally, the optimal design compared to an existing DHN ensures the consistency of the method and allows to build a study case at a wider scale, which can be solved thanks to the comprehensive strategy developed. The design assistance method is available for initial design as well as for extension of existing DHN.

Keywords: District Heating Network (DHN), optimal design assistance, Mixed integer non-linear programming (MINLP), Renewable Energy Sources (RES), wasted heat, total cost analysis.

SOMMAIRE GENERAL

INTRODUCTION GENERALE	21
CHEPITRE 1. PARTICIPATION DES RCU A LA TRANSITION ENERGETIQUE ET LEURS CONCEPTIONS 25	
1.1 CONTEXTE ENERGETIQUE, ENVIRONNEMENTAL ET SOCIETAL	28
1.2 LES RESEAUX DE CHALEUR URBAINS (RCU) : DESCRIPTION, AVANTAGE ET CONCEPTION.....	36
1.3 ETAT DE L'ART DES TRAVAUX SCIENTIFIQUES D'OPTIMISATION APPLIQUES AUX RCU	55
1.4 CONCLUSION ET POSITIONNEMENT	69
CHEPITRE 2. FORMULATION DU PROBLEME 71	
2.1 ILLUSTRATION DES ALTERNATIVES STRUCTURELLES	74
2.2 NŒUD CONSOMMATEUR	86
2.3 NŒUD PRODUCTEUR.....	93
2.4 LES CANALISATIONS	98
2.5 FONCTION OBJECTIF	104
2.6 DONNEES DE SORTIES DE L'OUTIL.....	109
2.7 COMPLEXITE DE LA FORMULATION.....	109
2.8 CONCLUSION DU CHAPITRE	112
CHEPITRE 3. RESOLUTION 115	
3.1 ENVIRONNEMENT ET METHODE CHOISIS	117
3.2 STRATEGIES CLASSIQUES DE RESOLUTION DE PROBLEME MINLP	120
3.3 STRATEGIE DE RESOLUTION « EN PLUSIEURS ETAPES INTERMEDIAIRES »	125
3.4 STRATEGIES DE L'EXPERT ADAPTEES AU RCU	136
3.5 CONCLUSION DU CHAPITRE	145
CHEPITRE 4. RESULTATS..... 147	
4.1 AVANTAGE DE LA CASCADe ET DES RESEAUX BOUCLES.....	150
4.2 APPROVISIONNEMENT CENTRALISE/DECENTRALISE/ISOLE DU CONSOMMATEUR ELOIGNE ET INTEGRATION D'ENR&R	158
4.3 OPTIMISATION DU RESEAU SUR L'ILoT EXISTANT C1C7	167
4.4 CAS DETUDE DE TAILLES CONSEQUENTES	169
4.5 CONCLUSION DU CHAPITRE	173
CONCLUSION ET PERSPECTIVES..... 175	
CONCLUSIONS DES TRAVAUX DE THESE	175
PERSPECTIVES	179
CHEPITRE 5. ANNEXES I	

LISTES

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Le temps de retour sur investissement énergétique, analyse par (BIHOUIX 2014)	29
Figure 1-2 Échelles des choix énergétiques (MOSSERI et JEANDEL 2013)	29
Figure 1-3 Scenario tendanciel de la consommation d'énergie primaire par usages en France (NEGAWATT 2003).....	31
Figure 1-4 Scénario tendanciel de la consommation d'énergie primaire par ressources en France (NEGAWATT 2003).....	31
Figure 1-5 Utilisation de l'énergie primaire (Gtep), détail par secteur, source : AIE, analyse par (BIHOUIX 2014)	32
Figure 1-6 Illustration de la démarche Négawatt.....	33
Figure 1-7 Scénario Négawatt de consommation d'énergie primaire par usages	34
Figure 1-8 Scénario Négawatt de consommation d'énergie primaire par ressources.....	34
Figure 1-9 Comparaison de différentes solutions approvisionnement de chaleur.....	36
Figure 1-10 Illustration schématique des éléments constitutifs des RCU (VIA SEVA et ADEME 2015)	37
Figure 1-11 Comparaison des statistiques des RCU en Europe (adapté des statistiques d'Euroheat & Power EHP 2011 (EHP 2013)).....	38
Figure 1-12 Comparaison des 4 générations de RCU (LUND et al. 2014)	39
Figure 1-13 : Part de marché des réseaux de chaleur sur le marché de la production de chaleur. (SIA Partners 2012)	41
Figure 1-14 Illustration de l'effet de foisonnement grâce à la mixité d'usage des bâtiments (CEREMA et BOURRAT 2014)	42
Figure 1-15 Illustration de la complémentarité entre réseaux, via la méthanation (NEGAWATT 2013a)	45
Figure 1-16 Exemples de cartographie issue de SIG pour quantifier et localiser le besoin thermique sur un territoire, ici la métropole de Bordeaux et Mérignac (étude A'Urba (ROSENER et HARROIS 2013) de l'ALEC 33).....	48
Figure 1-17 Répartition de la résolution des problèmes sur les réseaux d'eau mono ou multi-polluants (BOIX 2011)	55
Figure 1-18 Optimisation de la distribution de gaz, illustration (GROSSMANN 2012) exemple par (YOU et al. 2011)	58
Figure 1-19: Superstructure autorisée (MOLYNEAUX et al. 2010).....	60
Figure 1-20 Décomposition suivant la linéarité ou non du problème selon (WEBER 2008)	60
Figure 1-21 Représentation spatiale (à gauche) des sites consommation (C) ainsi que des sites potentiels producteurs (S supply) et de stockage (ST storage). La représentation du réseau (à droite) (SODERMAN et PETTERSSON 2006).....	61
Figure 1-22 Superstructure du RCU et du bâtiment selon (BOJIC et al. 2000).....	65
Figure 1-23 Répartition du nombre de publications d'optimisation appliquée sur les RCU en différenciant les méthodes stochastiques, déterministes et de contrôle.....	68
Figure 1-24 Répartition des travaux d'optimisation de RCU, selon le détail des méthodes déterministes : MILP, NLP et LP (d'après une recherche Scopus)	68
Figure 2-1 Schéma du cas de base P1 – C1.....	74
Figure 2-2 Illustration de l'approvisionnement en parallèle (gauche) en cascade (droite)	74
Figure 2-3 Illustration de la combinatoire et des possibilités de connexion sur un cas simple P1C2... ..	75
Figure 2-4 Illustration de la combinatoire dès l'introduction d'une éventuelle 2 ^{ème} chaufferie P2 (les connexions en cascade ne sont pas représentées X2 et ni la connexion directe depuis P2)	76

Figure 2-5 Illustration de la combinatoire lors de l'ajout d'une production individuelle potentielle (les cas où la localisation P2 est sélectionnée à la place de P1 ne sont pas représentés).....	76
Figure 2-6 Illustration des structures alternatives de la Figure 2-4 si les canalisations ne sont pas AR (connexions parallèles non représentés X2).....	77
Figure 2-7 Illustration du choix du type de technologie de production sur 2 sites différents.....	78
Figure 2-8 Caractéristique (épaisseur d'isolant et diamètre intérieur) d'une gamme de tubes (RAUTHERMEX 2012)	83
Figure 2-9 Superstructure d'un nœud consommateur	87
Figure 2-10 Représentation des courants avec leurs températures dans un échangeur de chaleur contre-courant.....	90
Figure 2-11 Superstructure d'un nœud producteur.....	93
Figure 2-12 Schéma d'une canalisation XZ : variables continues (verts), binaires (orange) et les données d'entrée (bleu)	98
Figure 2-13 Canalisation en détail : variables, les données d'entrée et résistances thermiques	100
Figure 2-14 Schéma de mise en relation des facteurs de capacité et de simultanéité pour le dimensionnement de la puissance des échangeurs et des chaufferies	106
Figure 2-15 Exemple P1C2 canalisations aller ou retour.....	107
Figure 2-16 Exemple P1C2 AR	107
Figure 3-1 Localisation du cas d'étude P2k3C4 : 2 potentiels lieux de production (sur P1 la technologie k1 est autorisée et sur P2 les technologies k2 et k3 sont disponibles) et 4 consommateurs	115
Figure 3-2 Structure de la méthode OA	118
Figure 3-3 problème maître : sous-estimation de la fonction objectif convexe en linéarisant à la solution (en x^{1*} et x^{2*}) précédemment trouvée dans le problème primal	118
Figure 3-4 Problème maître : sur-estimation en linéarisant le domaine de recherche à la solution du problème primal (x^{1*} et x^{2*})(GROSSMANN 2007).....	118
Figure 3-5 Problème maître : linéarisation à la solution du problème primal excluant la solution optimale $f(x^*)$ d'une fonction objectif non convexe	119
Figure 3-6 Problème maître : linéarisation excluant la solution optimale $f(x^*)$ du domaine de recherche non-convexe (fonction concave)	119
Figure 3-7 Illustration de la plage de borne possible (p. ex. T_{max}) sur le cas P2k3C4 avec tous les consommateurs 70/50°C	120
Figure 3-8 Exemple de stratégie de résolution d'un problème MINLP appliquée au réseau d'échangeur de chaleur (KORAVIYOTIN et SIEMANOND 2015).....	125
Figure 3-9 Organigramme général de la stratégie de résolution en 3 étapes intermédiaires.....	126
Figure 3-10 Ordinogramme de la stratégie d'initialisation « liaison de 3 modèles »	127
Figure 3-11 L300 P1k1P2k3	128
Figure 3-12 L662 P1k1	128
Figure 3-13 L676 P1k1P2k2	128
Figure 3-14 L300 P1k1-P2k2k3	128
Figure 3-15 L662 P1k1P2k2	128
Figure 3-16 L556 P2k2k3	128
Figure 3-17 Ordinogramme de la structure des tests des minima locaux	130
Figure 3-18 Influence de la borne T_{max} , pour l'init_Y5 (L662-p1k1).....	131
Figure 3-19 Influence de la borne T_{max} , pour l'init_Y3 (L300-P1k1-P2k2k3), seules les résolutions ayant convergées vers L300-P1k1-P2k2k3 sont représentées	132
Figure 3-20 Résultats de l'analyse simultanée avec 8 bornes aléatoires pour une initialisation (init_Y5)	133
Figure 3-21 Toutes les solutions (en trait bleu les résultats à écarter, facilement identifiable à cause d'un maillage différent observable à Ltot)	134
Figure 3-22 Différenciation du coût (après avoir éliminé les minima locaux précédents de la Figure 3-21), la solution optimale est représentée en trait gras bleu).....	135

Figure 3-23 Résultats pour différentes bornes maximales renseignées pour les pertes de charge (entre 0,1 et 2 kPa/m).....	138
Figure 3-24 Résultats pour différentes bornes maximales renseignées pour les pertes de thermique rapportées à 100m de canalisation (entre 0,5 et 2 °C/100m)	139
Figure 3-25 Exemple de résolution en 2 sous-parties du réseau	141
Figure 3-26 Agrégation des différents quartiers	141
Figure 3-27 Pré-structure (dire feeder) établie	141
Figure 4-1 Comparaison des ambitions du chapitre 3 par rapport au chapitre 4.....	147
Figure 4-2 Données d'entrée du cas 1 (P1k1C3)	150
Figure 4-3 Config. opt. L300-par.....	151
Figure 4-4 Config. opt. L300-cascade	151
Figure 4-5 Config. opt. L217-bouclé	151
Figure 4-6 Résultats optimaux (représentés à C-tr =300€/m) de l'analyse de sensibilité sur le cas 1 (P1k1C3).....	156
Figure 4-7 Localisation cas 2.....	158
Figure 4-8 Localisation cas 3.....	158
Figure 4-9 Localisation cas 4 et 5	158
Figure 4-10 Configuration optimale L662-P1k1 du cas 2 (les canalisations sont aller-retour, seulement celles aller sont représentées).....	159
Figure 4-11 Analyse en coût global des résultats du cas 1, à la configuration optimale (L662-P1k1)	160
Figure 4-12 Analyse en dimensionnement des résultats du cas 2 à la configuration optimale (Figure 4-10).....	161
Figure 4-13 La structure optimale pour le cas 3 (L662-P1k1-P2k2)	162
Figure 4-14 Comparaison de la répartition des coûts à 30 ans (investissement représenté actualisé à 30 ans), de la solution de référence du cas 2 avec celle du cas 3.....	162
Figure 4-15 Configuration optimale L300-P1k1- P2k2k3.....	163
Figure 4-16 Résultat de l'analyse de sensibilité sur le cas 4, à Capex-tr=800€/m et Opex-k2=4ct€/kWh	163
Figure 4-17 L556-P2k2k3	165
Figure 4-18 L1276-P2k2k3	165
Figure 4-19 Résultat de l'analyse de sensibilité sur le cas 5, à Capex-k2=800€/kW et Opex-k2=2ct€/kWh	166
Figure 4-20 Comparaison à différent horizon temporel pour 3 éloignements du lieu de production P2 (à P2, 3X plus loin et 5X plus loin), à Capex-k2=800€/kW, Capex-tr=800€/m et Opex-k2=2ct€/kWh	166
Figure 4-21 Localisation du cas 6 P1k1C7.....	167
Figure 4-22 Configuration optimale L1440-P1k1 du cas 6	167
Figure 4-23 Répartition des coûts de la solution optimale (Figure 4-22).....	167
Figure 4-24 Configuration optimale du cas 6 agrémenté de l'ajout potentiel de P2k2 pour C7	168
Figure 4-25 Configuration optimale du cas 6 agrémenté de l'ajout potentiel de P2k2 pour l'îlot C1C7	168
Figure 4-26 Répartition des coûts de la solution optimale représentée sur la Figure 4-24.....	168
Figure 4-27 Répartition des coûts de la solution optimale représentée sur la Figure 4-25.....	168
Figure 4-28 Localisation du cas 8 (P1k1 -C19)	169
Figure 4-29 Configuration optimale du cas 6	170
Figure 4-30 Configuration sous-optimale , néanmoins proche de la configuration optimale (Figure 4-29), en trait pointillé vert toutes les canalisations ayant changées (le sens étant important).....	170
Figure 4-31 Configuration optimale du cas 8 pour la création du réseau P1k1C19.....	171
Figure 4-32 Configuration optimale du cas 8 (P2k2k3C19_L2470) lors de l'extension du réseau P1k1C7	172

Figure 4-33 Intégration des travaux de thèse dans les diverses briques de développement du projet THERMENERGY, fonction principale, possible association méthodologique et perspectives envisagées (en jaune)	181
Figure 5-1 Dépendance à la température de la pression de vapeur saturante	v
Figure 5-2 Dépendance à la température de la masse volumique (μ) de l'eau liquide	v
Figure 5-3 Dépendance à la température de la capacité thermique massique de l'eau liquide	vi
Figure 5-4 Dépendance à la température de la masse volumique de l'eau liquide.....	vi
Figure 5-5 Schéma d'une tranche élémentaire de canalisation pour l'écriture de bilan.....	vii
Figure 5-6 Illustration de la méthodologique de comparaison en coût global et principe d'actualisation	
Source : figure 11 (MEDDE 2009)	xi

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 Abréviation des termes énergétiques utilisés	16
Tableau 1-2 Abréviation Anglais/Français spécifiques au domaine de l'optimisation	17
Tableau 1-1 Comparaison des objectifs chiffrés suivant l'échéance considérée (2020, 2030 ou 2050)	34
Tableau 1-2 Analyse SWOT des RCU (ADEME et al. 2008) partie C12 sur les microréseaux de chaleur et review (REZAIE et ROSEN 2012).....	40
Tableau 1-3 Synthèse de la classification des problèmes d'optimisation.....	53
Tableau 1-4 Type de fonction objectif considérée dans les travaux scientifiques identifiés.....	66
Tableau 2-1 Récapitulatif et dénombrement des structures autorisées suivant les fonctionnalités ...	79
Tableau 2-2 Liste des fonctionnalités.....	79
Tableau 2-3 Récapitulatif de toutes les hypothèses	81
Tableau 2-4 Liste des données d'entrée pour un nœud consommateur.....	87
Tableau 2-5 Détails des bornes inférieures ou supérieures ainsi que des valeurs d'initialisation des variables spécifiques au nœud consommateur.....	92
Tableau 2-6 Liste des données d'entrée d'un nœud Producteur Pi.....	94
Tableau 2-7 Détails des bornes inférieures ou supérieures ainsi que des valeurs d'initialisation des variables spécifiques au nœud consommateur.....	97
Tableau 2-8 Liste des données d'entrée relatives à une canalisation.....	98
Tableau 2-9 Détail du calcul du coût de tranchée, que les canalisations soient AR, ou non	107
Tableau 2-10 Comparaison du nombre de variables et de contraintes (égalités et inégalités) entre 4 modèles avec comme données d'entrées 2 producteurs, 3 technologies et 4 consommateurs	110
Tableau 2-11 Comparaison du nombre de variables et de contraintes (égalités et inégalités) entre le modèle le plus complet (MINLP_aller_Cp(T)) et le modèle le plus simple (MILP) pour différentes données d'entrée en nombre de producteurs, de technologies et de consommateurs	111
Tableau 2-12 Listes et illustrations des données d'entrée – sorties de l'outil développé	113
Tableau 3-1 Synthèse de la définition des bornes (inférieures et/ou supérieures).....	121
Tableau 3-2 Liste de solveurs MINLP disponibles sous GAMS, dernière colonne pour l'efficacité du solveur à résoudre notre problème.....	124
Tableau 3-3 Liste de solveurs NLP disponibles sous GAMS.....	124
Tableau 3-4 Récapitulatif des générations utiles à l'initialisation du cas d'étude P2k3C4	128
Tableau 3-5 Plage de variations pour le test des bornes « numériques »	133
Tableau 3-6 Détails des différents modèles, classé par type de problème d'optimisation (lignes grisées jamais retenues)	137
Tableau 3-7 Énumération des 4 modèles différents étudiés (9 modèles disponibles)	137
Tableau 3-8 Plusieurs topologies de réseaux différentes, suivant la distance maximale (entre consommateurs) servant de borne : en haut 61m et en bas 183m. Les configurations sont	

optimales si les régimes de températures coïncident et s'il n'y a pas de restriction sur la distance.....	140
Tableau 3-9 Analyse des 7 résultats obtenus avec des fonctions objectifs différentes.....	143
Tableau 3-10 Comparaison des résultats obtenus en fonction de différents horizons temporels (de 1 à 30 ans) testés	144
Tableau 3-11 Comparaison de la répartition CAPEX/OPEX.....	144
Tableau 4-1 Synthèse des ambitions des cas d'étude réalisés dans ce chapitre	148
Tableau 4-2 Résultats optimaux, selon 2 niveaux de température du consommateur C1 (lignes) et selon les 5 modèles (colonnes) du cas d'étude P1k1C1	151
Tableau 4-3 Dimensionnement et indicateurs de sortie des solutions optimales du cas d'étude P1k1C3 (les écarts relatifs sont valables par rapport au modèle précédent).....	154
Tableau 4-4 Récapitulatif des conditions sur les données d'entrée pour obtenir une configuration ramifiée classique (L300) ou un réseau bouclé (L217)	157
Tableau 4-5 Analyse du coût global à 15 ans (moyenne en fonction du coût de la tranchée), suivant le niveau régime de température requis par le consommateur (Treq) et l'épaisseur d'isolant (tk-insul).....	157
Tableau 4-6 Récapitulatif des ambitions des cas d'étude de la section 4.2.....	158
Tableau 4-7 Récapitulatif des conditions sur les données d'entrée différenciant les 2 solutions optimales obtenues : une production centralisée fossile classique (L662-P1k1) ou une production isolée à base d'EnR&R en C4 (L300-P2k2k3).....	164
Tableau 4-8 Localisation en fonction de l'éloignement du lieu de valorisation de la chaleur fatale..	164
Tableau 4-9 Récapitulatif des conditions sur les données d'entrée différenciant les 3 solutions optimales obtenues pour le cas 5	165
Tableau 4-10 Localisation et besoin thermique nominal des consommateurs du cas 6	167
Tableau 4-11 Données d'entrée des cas 7 et 8 (basés sur un réseau existant)	169
Tableau 4-12 Configuration et dimensionnement optimal du cas 7.....	170
Tableau 4-13 Configuration et dimensionnement optimal du cas 8.....	171
Tableau 4-14 Comparaison de réduction du coût global entre le cas 7 et 8, suivant l'horizon temporel et si une création ou extension est considérée	172
Tableau 5-1 Propriété de l'eau à saturation (LEMMON et al.) et vérification de l'Hypothèse# 2 en calculant l'écart aux propriétés de l'eau prises à la température 80°C.....	iv
Tableau 5-2 Synthèse année par année des coûts et somme à l'année N.....	xii
Tableau 5-3 Liste des options génériques utilisées.....	xii
Tableau 5-4 Liste des options utilisées dans le solveur DICOPT	xii

LISTE DES FONCTIONNALITES

Fonctionnalité# 1 Diamètre variable.....	79
Fonctionnalité# 2 Température et vitesse en variables.....	79
Fonctionnalité# 3 Plusieurs nœuds de production possibles.....	79
Fonctionnalité# 4 Production individuelle autorisée	80
Fonctionnalité# 5 Plusieurs technologies de production disponibles.....	80
Fonctionnalité# 6 Un nœud peut être alimenté par plusieurs courants	80
Fonctionnalité# 7 Approvisionnement en cascade potentiellement autorisée.....	80
Fonctionnalité# 8 Une canalisation n'est pas forcément aller et retour, mais il est obligatoire qu'une canalisation sorte du nœud	80
Fonctionnalité# 9 L'ajout de nœud non consommateur (une bifurcation) est possible	81

LISTE DES HYPOTHESES

Hypothèse# 1 L'eau ne peut être que liquide	81
Hypothèse# 2 Caractéristique physique (capacité thermique, viscosité...) de l'eau constante sur (60-100°C).....	81
Hypothèse# 3 Estimations des caractéristiques thermiques du sol et de l'influence de la canalisation retour sur celle aller.....	82
Hypothèse# 4 Epaisseur d'isolant constante	82
Hypothèse# 5 Epaisseur du tuyau constante	83
Hypothèse# 6 Régime permanent.....	83
Hypothèse# 7 Circulation du fluide à sens unique dans une canalisation	84
Hypothèse# 8 Échangeur à plaque contre-courant	84
Hypothèse# 9 Coefficient d'échange thermique constant dans l'échangeur et dans les canalisations, coefficient de perte de charge constant dans l'échangeur	84
Hypothèse# 10 Modélisation de la consommation avec une loi d'eau	84
Hypothèse# 11 Toutes les bifurcations sont renseignées en données d'entrées.....	84
Hypothèse# 12 Les données d'entrée (et de sortie) ne sont pas localisables sur une carte ou (schéma) automatiquement.....	84
Hypothèse# 13 Le stockage n'est pas envisagé dans l'optimisation.....	85
Hypothèse# 14 Aucune technologie de production en cascade n'est envisagée	85

ABREVIATIONS

Les abréviations utilisées dans ce manuscrit sont détaillées dans le Tableau 1-1 pour les termes spécifiques à l'énergétique et dans le Tableau 1-2 pour les termes spécifiques à l'optimisation.

Tableau 1-1 Abréviation des termes énergétiques utilisés

Abréviations	Significations
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AIE	Agence Internationale de l'Energie
ALEC	Agence Locale de l'Energie et du Climat
AMORCE	Association nationale des collectivités, des associations et des entreprises pour la gestion des déchets, de l'énergie et des réseaux de chaleur
CESER	Conseil Economique Social et Environnemental Régional
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CHP	Combined Heat and Power, qui est le terme anglais pour cogénération
COP	Conférence des parties (ou coefficient de performance lors de l'utilisation sur des pompe à chaleur)
CPCU	Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain
CRT	Centre de Ressources Technologiques
DES	Distributed Energy System, utilisé pour désigner des réseaux de distribution multiénergie
DN	Diamètre Nominal
DNTE	Débat National sur la Transition Energétique
DRIEA	Direction Régionale et Interdépartementale de l'Equipement et de l'Aménagement d'Ile-de-France
DRIEE	Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Energie
ECS	Eau Chaude Sanitaire
EE	Efficacité énergétique
EHP	Euroheat & Power association
EnR&R	Energie Renouvelable et de Récupération. Cette abréviation n'inclut pas, pour ce manuscrit en tout cas, la cogénération.
GES	Gaz à Effet de Serre
HEN	Heat Exchanger Network, c'est-à-dire un réseau d'échangeur de chaleur
HX	Heat Exchanger, c-a-d un échangeur de chaleur
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
IESF	Ingénieurs et scientifiques français
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
ITE	Institut pour la Transition Énergétique
PAC	Pompe A Chaleur
PCET	Plan Climat Energie territorial
PV	Photovoltaïque
RCU	Réseau de Chaleur Urbain
RT	Règlementation Thermique
SIG	Système d'Information Géographique
SRCAE	Schéma Régional Climat Air et Energie
SWOT	Analyse stratégique : Strength, Weakness, Opportunity and Threat
UE	Union Européenne
UIOM	Usine d'Incinération d'Ordure Ménagère
WEF	World Economic Forum

Tableau 1-2 Abréviation Anglais/Français spécifiques au domaine de l'optimisation

Abr.	Anglais	Signification française
BB	Branch and Bound	Méthode d'évaluation et séparation progressive
GBD	Generalized Bender Decomposition	Décomposition de Bender Généralisé
GRG	Generalized Reduced Gradient	Gradient Réduit Généralisé
LP	Linear programming	Programmation linéaire
MIDO	Mixed integer dynamic optimization	Problème d'optimisation dynamique avec des variables mixtes
MILP	Mixed Integer linear programming	Problème d'optimisation linéaire avec des variables mixtes
MINLP	Mixed Integer Non Linear Programming	Problème d'optimisation non linéaire avec des variables mixtes
NLP	Non Linear Programming	Programmation non linéaire
OA	Outer Approximation	Approximation extérieure
SQP	Sequencial quadratic programming	Programmation quadratique séquentielle

NOMENCLATURE

INDICE

i	Indice des nœuds producteurs de 1 à n_i
j, o	Indice des nœuds consommateurs de 1 à n_j
k	Indice des technologies de production de 1 à n_k
k_RES	Indices des technologies de production parmi 1 à n_k étant des EnR&R
r	Indices des régimes de température de 1 à n_r

ABREVIATIONS EN INDICES

C	Relatif au consommateur
ext	Extérieur
heat	Relatif à la chaleur consommée
hx	Echangeur de chaleur (<i>heat exchanger</i>)
in	Entrant dans le système (<i>inlet</i>)
inst	Installé
insul	Isolation (<i>insulation</i>)
int	Intérieur
lineXZ	Relatif à la connexion reliant un nœud X (P ou C) à un nœud Z (C ou P), la direction est gérée avec les indices (i, j ou o). Connexions entre 2 consommateurs (CC) autorisées, entre deux producteurs (PP) exclus. Il y a également une information supplémentaire pour les canalisations entre consommateurs pour différencier l'approvisionnement parallèle ou en cascade
out	Sortant du système (<i>outlet</i>)
P	Relatif au producteur
pipe	Relatif à la canalisation (matériau et tranchée)
req	Requis (<i>required</i>)
spec	Spécifique (par unité de surface, de puissance,...)
tot	Total
tr	Tranchée (<i>trench</i>)

LETTRES ROMAINES

A	Aire d'échange à l'échangeur de chaleur en sous-station	m^2
annee	Horizon de temps (calcul d'amortissement)	an
Capex	Coût relatif à une dépense d'investissement	€
Cp	Capacité thermique massique	$\text{J}/(\text{kg.K})$
D	Diamètre de la canalisation	m
Dist _{xz}	Distance entre un nœud X et un nœud Z (donnée d'entrée)	m
DT	Différence de température à l'échangeur de chaleur	$^\circ\text{C}$
Eff	Rendement	%
F	Facteur constant (pour analyse en coût global, prise en compte capacité ou effet de foisonnement)	%
GES	Gaz à Effet de Serre	kgCO_2
H	Puissance	W
K _{hx}	Coefficient d'échange thermique dans les échangeurs de chaleur	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$

L	Longueur de canalisation (line) entre deux nœuds. Egale dist _{xz} si la canalisation existe, sinon égale à 0 m.	m
LMTD	Différence logarithmique de température à l'échangeur de chaleur	°C
M	Débit massique (mass flow rate)	kg/s
Opex	Coût relatif à une dépense de fonctionnement	€
P	Pression dans la canalisation	Pa
period	Période caractéristique (calcul puissance-énergie)	heure
Psat	Pression de vapeur saturante	Pa
R	résistance thermique surfacique	m ² .K/W
rate_a	Taux actualisation	%
rate_i	Taux d'inflation du cours de l'énergie	%
T	Température	°C
Text	Température extérieure de référence suivant la période	°C
tk	Epaisseur (d'acier ou d'isolant, suivant l'indice)	m
x	Abscisse d'un nœud	m
Y	Variable binaire d'existence	-
z	Ordonnée d'un nœud	m

LETTRES GRECQUES

α	Coefficients nécessaires pour calculer les pertes de charge hydraulique. Le calcul est détaillé en (Annexe D), les coefficients sans unités sont des exposants	-
β		
γ		Pa.s.m ³ /kg
μ	Viscosité dynamique de l'eau	Pa.s
ρ	Masse volumique de l'eau	kg/m ³
λ	Conductivité thermique	W/(m.K)

Ainsi les cas d'étude sont décrits $P_i K_k C_j$, soit un exemple avec n_i lieu de productions potentielles, avec n_k technologies disponibles, sur un quartier avec n_j consommateurs.

INTRODUCTION GENERALE

Le changement climatique est un phénomène physique dont l'origine anthropique n'est désormais plus remise en cause dans nos sociétés. Des politiques de développement durable sont initiées et des conférences sur le climat rassemblent des experts à l'échelle mondiale. La question centrale de la transition énergétique est de savoir comment produire et distribuer de l'énergie à la population, afin de satisfaire les besoins, tout en garantissant du mieux possible un avenir décent aux prochaines générations.

La solution technologique des réseaux de chaleur urbains (RCU) est une solution permettant d'approvisionner en chaleur (chauffage, eau chaude sanitaire ou usage thermique industriel) plusieurs bâtiments à partir d'une production de chaleur centralisée ou plusieurs productions de chaleur décentralisées. Cette solution possède comme principal avantage le fait de pouvoir faire des économies d'envergure - en récupérant de la chaleur fatale qui serait autrement gaspillée - ainsi que des économies d'échelle - en mutualisant les équipements - ce qui permet de réduire les coûts, mais aussi d'intégrer plus facilement des énergies renouvelables (EnR). Les réseaux de chaleur permettent donc de réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), de sécuriser l'approvisionnement de chaleur en diversifiant le mix énergétique et de limiter la pollution atmosphérique urbaine (contrôle centralisé en chaufferie, limitation des îlots de chaleur urbains, etc.). Les politiques environnementales, notamment en France dans le plan bâtiment durable, placent les RCU comme une pierre angulaire de la transition énergétique. Même si la rénovation énergétique doit intervenir en première étape pour réduire le besoin, tout le parc immobilier ne pourra être rénové, même à l'horizon 2050. La technologie des RCU permet de satisfaire dès aujourd'hui les besoins thermiques d'une zone urbaine. Il est également possible de les étendre ou de les densifier, qui plus est dans un espace urbain où la contrainte foncière est élevée. Enfin ils permettent de concilier également le potentiel à long terme pour envisager de diversifier d'autant plus leur mix énergétique, d'intégrer des solutions de stockage et de travailler en synergie avec les autres réseaux d'énergie.

Dans le domaine de l'approvisionnement thermique (chauffage ou refroidissement, utilités chaudes ou froides) d'ensembles de bâtis, il existe peu d'outils d'aide à la décision à disposition des maîtres d'ouvrage. La structure d'un réseau et sa gestion ne sont pas forcément optimales (au sens rigoureux du terme), la plupart du temps les études sont basées sur des approches par simulation. Toutefois, de telles méthodes d'optimisation existent dans d'autres champs d'application tels que l'industrie. Il pourrait alors être envisagé d'en tirer profit dans le domaine des RCU.

Actuellement, les études d'opportunités énergétiques s'appuient majoritairement sur des ratios de densité thermique ou sur des cartes de système d'information géographique (SIG). Ainsi des zones à forte demande énergétique et/ou à fort potentiel d'exploitation d'énergie renouvelable ou de récupération (EnR&R) sont identifiées, mais peu de propositions existent pour relier ces zones. L'objectif de ce travail est de fournir, à ce stade dans les études d'opportunité d'approvisionnement énergétique, une première esquisse du maillage de réseau et de choix de technologie de production. À ces résultats sur la configuration, l'objectif est également de proposer des résultats sur les aspects principaux de dimensionnement (régime de distribution en température et vitesse d'écoulement dans le réseau primaire, choix du diamètre des canalisations, dimensionnement de la puissance à installer en chaufferie et dimensionnement de l'aire d'échange de l'échangeur en sous-station).

Ces travaux de thèse sont financés par l'institut de transition énergétique (ITE) INEF4 avec le soutien d'un financement CIFRE de la part de l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie

(ANRT). Ils s'intègrent dans le projet précompétitif amont THERMENERGY, porté par l'ITE INEF4, dans lequel Nobatek et le LaTEP travaillent en collaboration.

- **INEF4** est un Institut National d'Excellence Facteur 4 pour la Transition Énergétique (ITE), dans le cadre du programme d'investissement d'avenir. Cet institut a une activité collaborative mutualisée de recherche appliquée et d'innovation pour le secteur de la réhabilitation et la construction durables. Nobatek en est l'opérateur.
- **NOBATEK** est un Centre de Ressources Technologiques (CRT) qui développe ses activités de recherche appliquée et ses prestations de service dans les domaines de l'aménagement et de la construction durables, ceux-ci incluant les questions d'approvisionnement énergétique à l'échelle d'un quartier.
- Le Laboratoire de Thermique Energétique et Procédés (**LaTEP**) a deux pôles de recherche intitulés « procédés pour l'environnement » et « ENERGIE 20³ », ce dernier étant celui impliqué dans le projet THERMENERGY et la thèse. Les compétences scientifiques développées par le LaTEP portent notamment sur le stockage et la distribution de l'énergie. De nombreuses études sont menées par le LaTEP aussi bien en termes de modélisation thermodynamique que de méthodes d'optimisation énergétique de procédés.

L'enjeu du projet **THERMENERGY** est de développer des compétences, des méthodes et des outils dans le domaine de l'utilisation intelligente de l'énergie thermique à l'échelle de groupes de bâtiments ou de quartiers (approche de type SMARTGRID électrique transposée à la chaleur). Il s'agit in fine de proposer des solutions pour l'aide à la décision, l'aide à la conception et à l'optimisation de réseaux de chaleur urbains (RCU), existants ou neufs, en intégrant des outils de conception et de simulation de besoins énergétiques et des outils d'optimisation de réseau. Ce travail de thèse concerne essentiellement la partie du projet THERMENERGY dédiée à l'optimisation de réseaux de chaleur urbains (RCU).

L'enjeu des travaux de **thèse** est de s'inspirer de méthodes d'optimisation développées dans le domaine du génie des procédés pour les adapter au contexte de l'approvisionnement en chaleur de bâtiments. On s'intéresse particulièrement à l'optimisation simultanée de la configuration et du dimensionnement de RCU. La programmation du modèle (ou formulation) de RCU a lieu sous l'environnement GAMS, afin de pouvoir facilement faire appel à des solveurs existants (algorithmes d'optimisation déjà programmés). La fonction objectif à minimiser est le coût global du RCU à long terme (horizon temporel choisi maximum de 30 ans). Celui-ci inclut deux familles de coûts : les investissements (à l'année initiale) de la puissance à installer en chaufferie, des échangeurs de chaleur en sous-station et les canalisations (tranchée et matériaux), ainsi que les coûts de fonctionnement (intervenant chaque année, dépendant du cours économique des sources d'énergie) de pompage et des combustibles.

Le manuscrit est scindé en 4 chapitres qui s'articulent de la façon suivante :

- Le Chapitre 1 intitulé « participation des RCU à la transition énergétique et leurs conceptions » permet d'inscrire les travaux de thèse dans un contexte énergétique, environnemental et sociétal. Il décrit la solution technologique des RCU, leurs nombreux avantages (valorisation de chaleur fatale, intégration d'énergie renouvelable, sécurisation de l'approvisionnement et

Introduction générale

faible impact environnemental) ainsi que leurs points sensibles (p. ex. investissement conséquent et multiplicité des acteurs). Ce chapitre continue sur « l'état de l'art des méthodes de conception des RCU ». Les méthodes classiques de conception (par cartographie ou simulation numérique) sont rapportées. L'intérêt de travailler par une approche d'optimisation mathématique est ensuite explicité. La classification des types de problèmes et leurs méthodes de résolution respectives sont synthétisées. Finalement un état de l'art est réalisé sur les travaux scientifiques d'optimisation appliqués aux RCU ou à une thématique proche.

- Le Chapitre 2 détaille la formulation de notre problème d'optimisation MINLP développé pour l'optimisation des RCU, en explicitant les variables, les contraintes, la fonction objectif, les bornes, les initialisations et les indicateurs de sortie. Un exemple illustratif de base (nombre de producteurs et de consommateurs limités à deux) appuie notre discours.
- Le Chapitre 3 s'attèle à expliquer la résolution d'un tel problème MINLP. Les stratégies de résolution classiques sont détaillées, elles sont nécessaires à la convergence. Mais elles ne sont pas suffisantes, pour la convergence et pour éviter de tomber dans des minima locaux, c'est pourquoi nous avons proposé une stratégie de résolution en « plusieurs étapes intermédiaires ». Il est possible de compléter cette stratégie avec des stratégies d'un « expert en optimisation » pour la résolution des problèmes plus complexes (notamment en taille de quartier à approvisionner).
- Le Chapitre 4 porte sur les résultats d'un cas d'étude de base, afin d'illustrer l'avantage de proposer d'optimiser simultanément la configuration et le dimensionnement, notamment pour l'approvisionnement en cascade entre consommateurs, mais aussi pour l'approvisionnement du consommateur éloigné (rélié au réseau principal ou production isolée et potentiel d'intégration d'EnR&R). Ce chapitre se clôture en proposant une étude sur une taille de quartier conséquente, basée sur un réseau existant, aussi bien pour la création que pour l'extension de RCU.

Chapitre 1. PARTICIPATION DES RCU A LA TRANSITION ENERGETIQUE ET LEURS CONCEPTIONS

Ce premier chapitre permet de comprendre le positionnement des travaux de thèse. Il définit le rôle des RCU dans la transition énergétique et propose différentes méthodes pour aider à leurs conceptions. Les termes spécifiques à l'optimisation sont explicités avant de proposer un état de l'art de l'optimisation appliquée aux réseaux de chaleur urbains (RCU).

Une réflexion générale est menée sur le contexte environnemental actuel section 1.1. Ces considérations, parfois en dehors du domaine scientifique, permettent de positionner les travaux de recherche au mieux dans le débat public des questions énergétiques. Des aspects physiques sont également développés dans le cadre du Débat National sur la Transition Energétique (DNTE).

Les RCU sont présentés section 1.2 comme une solution pertinente pour approvisionner de la chaleur à l'échelle de plusieurs bâtiments (quartier ou ville), d'autant plus si leur conception est bien pensée.

Et la dernière section 1.3 est focalisée sur l'état de l'art des travaux scientifiques d'optimisation appliquée aux RCU, ce qui permet de conclure sur le positionnement de nos travaux.

SOMMAIRE DU CHAPITRE

1.1	CONTEXTE ENERGETIQUE, ENVIRONNEMENTAL ET SOCIETAL	28
1.1.1	<i>Interaction et dépendance de la question énergétique avec un contexte plus global ...</i>	28
1.1.2	<i>Evolution des modes de productions et de consommations</i>	30
1.1.3	<i>Augmentation de la production et de la consommation d'énergie</i>	30
1.1.4	<i>Scénario de transition énergétique</i>	32
1.1.5	<i>Avenir des RCU : besoin de chauffage élevé malgré les politiques environnementales.</i>	34
1.2	LES RESEAUX DE CHALEUR URBAINS (RCU) : DESCRIPTION, AVANTAGE ET CONCEPTION.....	36
1.2.1	<i>La solution technologique des RCU</i>	36
1.2.2	<i>Les RCU : quelques points à éviter pour profiter de nombreuses opportunités</i>	39
Analyse SWOT	39	
Les 5 principes fondamentaux	40	
Chaleur fatale.....	41	
Cogénération	42	
Effet foisonnement et mixité d'usage.....	42	
Faible impact environnemental et diversité des ressources	43	
Sécurité de l'approvisionnement et compétitivité	43	
Synergie entre réseaux d'eau, d'électricité, de chaleur et de froid.....	44	
1.2.3	<i>Aide à la conception classique des RCU.....</i>	46
Indicateurs spécifiques aux RCU	46	
Différents niveaux de projets et différentes finalités :	47	
Conception classique : cartographie et approche par simulation	48	
Approches par cartographie : identification et localisation des besoins.....	48	
Approches par simulation.....	48	
L'étude du dimensionnement en régime stationnaire ou dynamique ?	50	
En stationnaire.....	50	
Étude dynamique.....	50	
Positionnement: prétraitement des appels dynamiques, en amont de l'optimisation réalisée en régime permanent	50	
1.2.4	<i>Intérêt de l'optimisation et définition des termes.....</i>	51
Optimisation versus Simulation	51	
Caractérisation d'un problème d'optimisation et définition des termes spécifiques.....	52	
Les types de variables et d'équations.....	52	
Prise en compte du temps	52	
Le ou les objectifs	53	
Superstructure.....	53	
Ensemble de définition et domaine de recherche	53	

Convexité du problème.....	53
Méthodes de résolution.....	54
1.3 ETAT DE L'ART DES TRAVAUX SCIENTIFIQUES D'OPTIMISATION APPLIQUES AUX RCU	55
1.3.1 <i>Problèmes se rapprochant des réseaux de chaleur.....</i>	55
Réseau d'eau industriel.....	55
Réseau d'échangeurs de chaleur	56
Réseau de froid	56
Réseau d'électricité.....	57
Procédés.....	58
1.3.2 <i>Les 3 finalités des problèmes d'optimisation des RCU</i>	59
Optimisation de la configuration	59
Optimisation du dimensionnement	62
Optimisation de la gestion	63
1.3.3 <i>Optimisation de problèmes incluant des RCU</i>	64
Optimisation des RCU et des bâtiments	64
Optimisation de réseaux de distribution de fluide	65
1.3.4 <i>Synthèse de l'état de l'art.....</i>	66
Fonctions objectif considérées	66
Méthodes d'optimisation employées	67
1.4 CONCLUSION ET POSITIONNEMENT	69

1.1 CONTEXTE ENERGETIQUE, ENVIRONNEMENTAL ET SOCIETAL

1.1.1 INTERACTION ET DEPENDANCE DE LA QUESTION ENERGETIQUE AVEC UN CONTEXTE PLUS GLOBAL

Les questions énergétiques sont liées aux questions environnementales, économiques, réglementaires et sociétales, elles ne sont pas uniquement des considérations techniques. Les politiques environnementales dépendent également des Pays (par exemple en France avec la filière nucléaire ou au Danemark avec sa filière éolienne), des époques (pic pétrolier ou au contraire un baril bas) et des imprévus (accident de centrale nucléaire). Et les politiques dépendent des arbitrages entre finalités souhaitées, certains prônent l'urgence de réduire nos émissions de gaz à effet de serre (GES), d'autres militent pour une indépendance énergétique afin de sécuriser leur approvisionnement. Enfin d'autres défendent la diminution des consommations énergétiques dans la société de consommation, avant de s'attaquer aux aspects d'efficacité énergétique (dans la production, le transport ou l'utilisation) ou encore de la production d'énergie renouvelable (EnR). Le problème peut - devrait - être considéré selon le point de vue plus global du développement durable, qui intègre 3 piliers (l'écologie, le social et l'économie).

L'épigraphhe résume également la **nécessité d'ouvrir le débat de la transition énergétique des scientifiques aux chercheurs en sciences sociales**.

Au lieu de ne considérer que les aspects énergétiques, l'organisme mondial de l'économie (World Economic Forum WEF) met en **relation directe l'approvisionnement en énergie avec l'approvisionnement en eau et en alimentation** dans son rapport sur les risques mondiaux (WEF 2011). Ce triptyque (eau-énergie-alimentation) subit les événements extérieurs comme l'accroissement démographique, les pressions environnementales, les disparités économiques et les problèmes de gouvernance. Le risque lié au changement climatique ou à l'approvisionnement énergétique peut conduire à un risque de conflit géopolitique. (BARNETT et ADGER 2007) appuient cette hypothèse que le changement climatique peut conduire à un conflit, mais pour eux il est plus probable que ce conflit soit interne à un état (avec la population confrontée à la restriction des ressources ou à un évènement climatique extrême) qu'à un conflit entre États. D'un autre côté, cette « société de risque » peut aussi être saisie comme une opportunité, pour pousser les politiques à changer leurs habitudes (BECK 2014).

Sur les questions énergétiques, on constate une augmentation de certaines consommations. Par exemple, la consommation d'électricité spécifique unitaire (kWh/m^2) a augmenté de 75 % entre 1980 et 2005 en France (ADEME 2013) alors que la consommation unitaire pour le chauffage a diminué de 40 % sur cette période. Cela traduit à la fois une croissance d'appareils électroménagers et de la pénétration des moyens de chauffage électrique.

La tendance est à l'augmentation de la consommation des ressources primaires, aussi bien en énergie primaire (telle que le gaz, le pétrole ou l'uranium) qu'en matériau de fabrications de ces équipements technologique (entre autres cuivre, nickel ou titane) et pour tous les usages. Ceci mène au « **peak everything** ».. Ce pic arrivera inéluctablement pour des ressources fossiles pour lesquelles le niveau de consommation anthropogène atteint sur quelques siècles n'est pas négligeable par rapport à la quantité de ressource exploitable. Les conditions d'exploitation peuvent elles-mêmes varier, d'autant plus lorsque le taux de retour énergétique (abrégé EROI de l'anglais Energy Returned On Energy Invested) se dégrade avec le temps. Ceci est particulièrement vrai pour le pétrole. Ainsi selon les

technologies et les zones d'installation, les EnR telles que l'éolien ou le photovoltaïque sont dans des EROI comparables au pétrole de schiste, au gaz et au nucléaire (Figure 1-1).

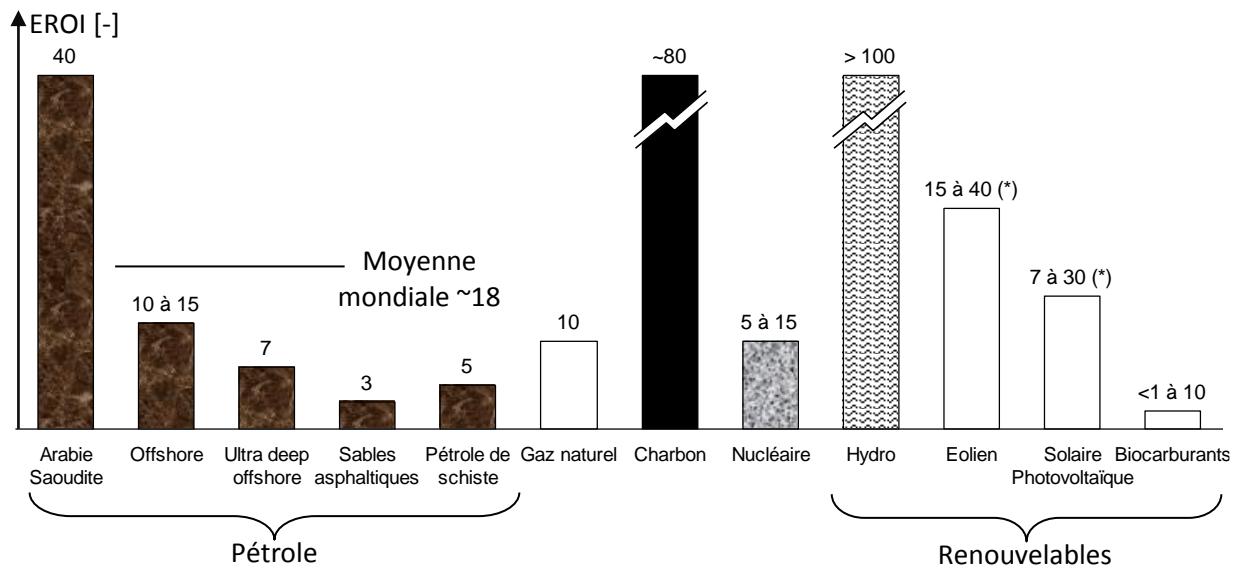


Figure 1-1 Le temps de retour sur investissement énergétique, analyse par (BIHOUIX 2014)

Les choix énergétiques dépendent de différentes échelles (Figure 1-2). Chaque citoyen choisit sa consommation en fonction de son niveau de vie et de sa conscience environnementale pour répondre à ses besoins. Au contraire, les choix pour la durabilité des ressources et de la sécurité d'approvisionnement se font à une échelle plus nationale, voire mondiale.

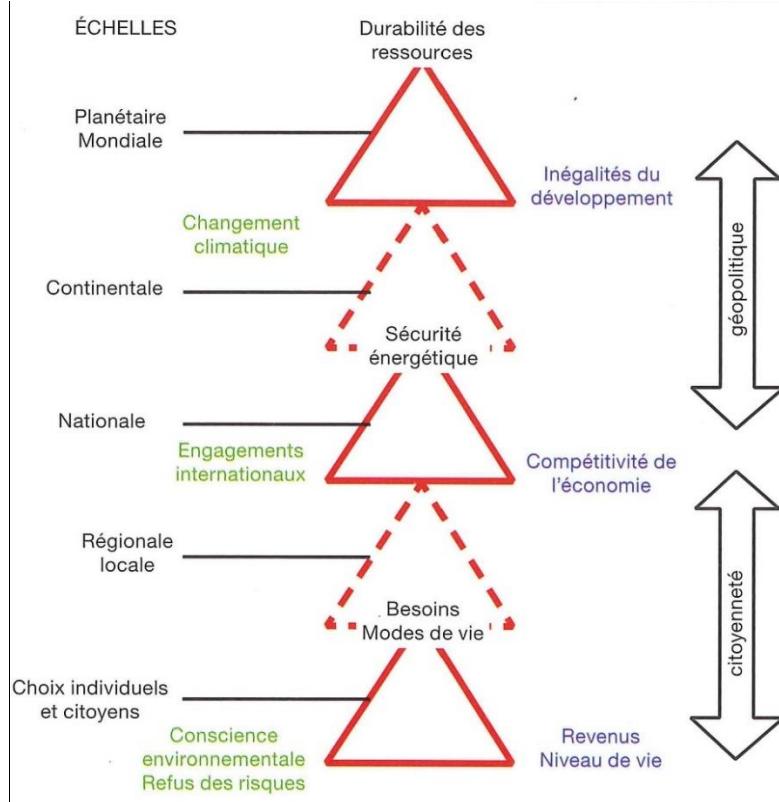


Figure 1-2 Échelles des choix énergétiques (MOSSERI et JEANDEL 2013)

1.1.2 EVOLUTION DES MODES DE PRODUCTIONS ET DE CONSOMMATIONS

Le 1^{er} levier d'action d'un scénario de transition énergétique ambitieux, tel que le scénario Négawatt développé sous-section (1.1.4), est basé sur la sobriété énergétique. Or la modification des comportements, individuels et collectifs, n'est pas évidente et nécessite du temps. Ce changement de consommation risque d'être forcé à plus ou moins long terme. D'ailleurs, **l'agence internationale de l'énergie (AIE) établit désormais que 50 % des solutions devront provenir de l'évolution de nos modes de vie et de nos comportements.** Dans le mouvement des villes en transition, le terme résilience est utilisé pour illustrer le fait qu'une communauté met en place des mesures afin d'augmenter sa résistance aux changements inévitables à venir. À noter également que la résistance au changement vient aussi certainement en partie à cause de la réduction du terme « sobriété » au terme « privation ». *Or « le gaspillage énergétique n'augmente en rien notre confort : ce n'est en aucun cas un signe de progrès »* (NEGAWATT 2013b).

Soulignons que de plus en plus de communications préfèrent **mettre en avant les bonnes actions**, plutôt que de pénaliser les mauvaises. Le livre « 80 hommes pour changer le monde » (DARNIL et LE ROUX 2005) est source d'inspiration (note de la rédaction :avis personnel). Tout comme le dernier rapport de l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), « la vie happy, changer les comportements pour changer le monde » (ADEME *et al.* 2016) qui est une invitation aux changements. Solange Martin, sociologue à l'ADEME, partage la vision des consommateurs engagés (13 % du total tout de même) : « *Ceux qui modifient volontairement leur mode de vie fondent leur bonheur sur autre chose que l'accumulation matérielle ou l'intérêt individuel : les bénéfices sont le lien social, la recherche de sens, l'harmonie avec les autres et l'environnement* ».

De nombreuses alternatives fleurissent, en passant par la création de coopérative de production d'énergie renouvelable, des associations d'habitants pour aider à la rénovation énergétique, des fournisseurs d'énergie proposant de l'électricité 100 % d'origine renouvelable tels Enercoop ou encore des rapports d'organismes étatiques tels que l'ADEME prônant la réduction de notre empreinte environnementale grâce à « une évolution profonde des modes de production et de consommation » (ADEME 2014).

1.1.3 AUGMENTATION DE LA PRODUCTION ET DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE

Au niveau mondial, les statistiques de l'AIE (AIE 2014) sont sans appel : **la production d'énergie primaire est en constante augmentation.** Elle a doublé en 40 ans (de 6 106 en 1971 à 13 371 Mtep en 2012). Chaque ressource est de plus en plus employée, sans exception. Par contre, l'évolution du mix (en %) change. Le charbon, le gaz et le nucléaire représentent des parts plus importantes en 2012 qu'en 1971. À l'inverse, la part du pétrole a été légèrement diminuée. Les énergies fossiles représentent l'écrasante majorité (86,5 %).

Quant à la consommation d'énergie, primaire et finale, elle est également en constante augmentation au niveau mondial. Par définition, l'énergie primaire est l'énergie telle que l'on peut la trouver sur Terre. Alors que l'énergie finale est celle livrée à l'utilisateur, celle qu'il paie. **La différence entre l'énergie primaire et l'énergie finale peut être grande, car elle dépend de transformations énergétiques ayant des pertes.**

La différence entre énergie primaire et énergie finale est d'autant plus importante en France, dont la majorité de l'électricité est produite à partir d'énergie nucléaire. Comme nous détaillerons sous-section 1.2.2 paragraphe sur la cogénération, seule une partie (environ un tiers) de l'énergie primaire

est transformée en électricité, le reste étant perdu en chaleur, ce que l'on peut constater sur le diagramme de Sankey (AIE 2013) quels que soient les pays. Cette forte pénétration du nucléaire en France explique environ 75 % des écarts entre bilan en énergie primaire et énergie finale. Le quart restant provient des consommations des industries de l'énergie (principalement raffinerie et usine d'enrichissement d'uranium) et des usages des produits fossiles à des fins non énergétiques (principalement industrie chimique et goudron) (SIEDLER 2009). Ainsi le coefficient pour passer d'énergie finale à énergie primaire est de 1,1 pour le gaz et le fioul, afin de tenir compte de l'énergie pour l'extraction, raffinage et transport. Alors que pour l'électricité en France il est d'usage d'utiliser 2,58. Toutefois comme le souligne (SIEDLER 2009), ce coefficient ne correspondrait pas à la réalité physique, la situation française serait davantage autour de 3,23.

Un exemple de bilans de consommation en énergie primaire est visible sur la Figure 1-3, avec le détail par secteur, uniquement sur le contexte français et en perspective. Les pertes (perte de chaleur, perte électrique et autoconsommation) sont clairement représentées, ce qui n'aurait pas été possible si comme classiquement, le bilan de consommation avait été en énergie finale. Sur la Figure 1-4 par ressource, avec une même échelle en ordonnée (3000 TWh en l'an 2000, 4500 TWh en 2050), le mix énergétique est réparti par ressource. Une particularité de la France est d'avoir une petite part issue du charbon et une part significative d'uranium.

À l'échelle mondiale, le bilan de consommation en énergie primaire (Figure 1-5) a été fait par (BIHOUIX 2014) à partir des données de l'AIE. Cette analyse permet de confirmer qu'en **termes d'énergie primaire utilisée, la production d'électricité (et de chaleur) est le premier secteur** consommant 5,1 Gtep. Le charbon et le pétrole sont des ressources toujours fortement mobilisées (ce qui n'est pas le cas en France). Le secteur des transports et les usages non énergétiques comme la chimie sont dépendants à écrasante majorité du pétrole. Le secteur du bâtiment est également dépendant du pétrole et du charbon, à hauteur d'environ 1/3, (ce qui n'est pas le cas en France).

Les questions énergétiques sont donc bien dépendantes des états et de leurs politiques.

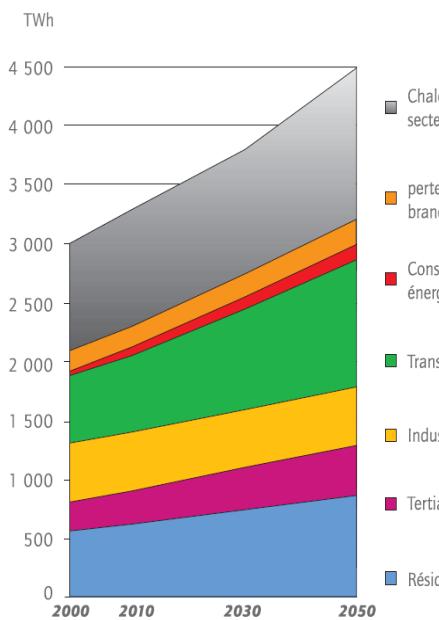


Figure 1-3 Scénario tendanciel de la consommation d'énergie primaire par usages en France (NEGAWATT 2003)

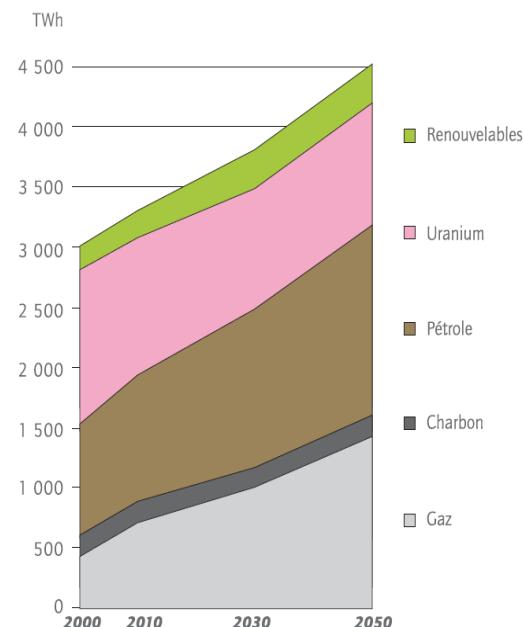
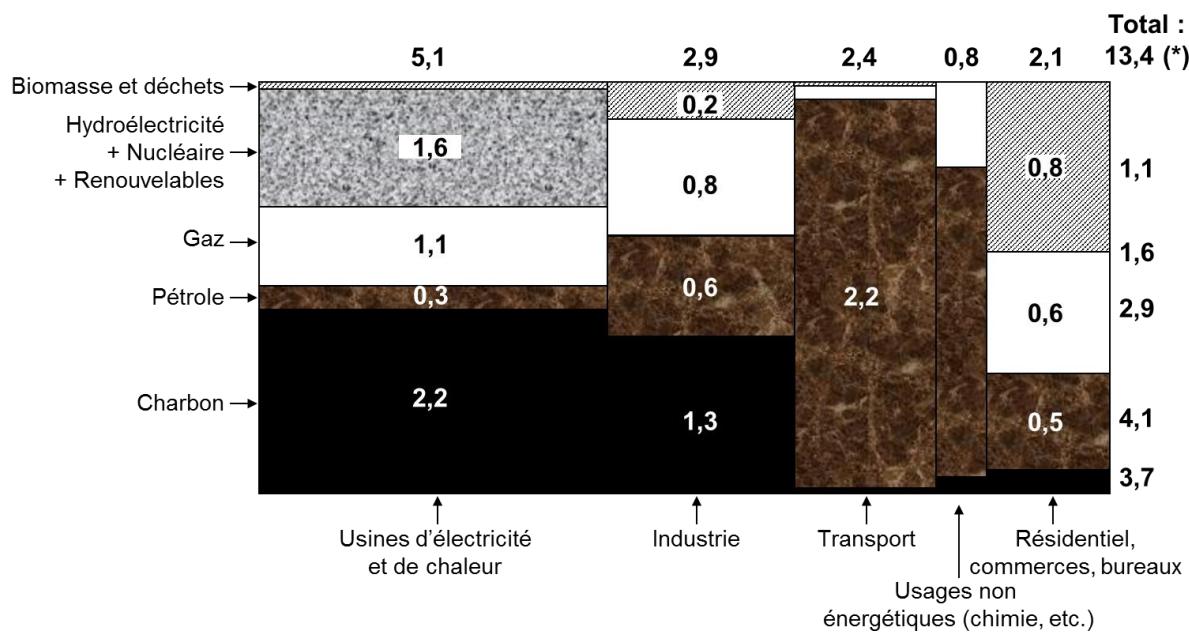


Figure 1-4 Scénario tendanciel de la consommation d'énergie primaire par ressources en France (NEGAWATT 2003)



[Figure 1-5 Utilisation de l'énergie primaire \(Gtep\), détail par secteur, source : AIE, analyse par \(BIHOUIX 2014\)](#)

1.1.4 SCENARIO DE TRANSITION ENERGETIQUE

D'un point de vue de la production, la réflexion pourrait être basée sur les investissements à réaliser afin de répondre à l'augmentation des besoins. Cette approche est adoptée en France par exemple par le Conseil Economique Social et Environnemental Régional (CESER), avec des rapports d'étude de potentiel de développement en Aquitaine (CESER 2012). Mais le problème peut être aussi abordé d'un point de vue de la consommation, **pourquoi ne pas mieux consommer pour ne pas avoir à investir dans de nouveaux moyens de production d'énergie et des infrastructures de transport, ou les rénover.**

Après un constat sur l'augmentation de la consommation d'énergie et ses conséquences sur le climat et la société dans les sous-sections précédentes, abordons désormais cette section sur la présentation d'une ébauche de solution à la transition énergétique.

Le scénario Négawatt base sa réflexion sur un questionnement de nos besoins avant de parler d'efficacité énergétique (de la production à la consommation en passant par la distribution) ou d'EnR.

D'autres organismes proposent également des scénarios basés sur le changement de comportement. Citons par exemple en France les trois scénarios de (ANCRE 2013) : sobriété renforcée, décarbonations par l'électricité et vecteurs diversifiés. Ces scénarios, produits par le rassemblement de 400 experts, permettent de **remplir les objectifs de division par 4 des émissions de GES pour 2050 et la réduction à 50% de la part du nucléaire dans le mix électrique pour 2025**. Ils soulignent plusieurs leviers : un investissement important pour les options d'efficacité et d'EnR (de l'ordre de mille milliards d'euros d'ici 2050), des ruptures technologiques (capture et stockage de CO₂, effacement de la demande électrique ou stockage massif inter-saisonnier d'électricité) et des évolutions de comportements. Dans le cadre d'une contribution au groupe d'experts sur le Débat National sur la Transition Energétique (SALOMON 2013), Thierry SALOMON compare les émissions de GES entre les différents scénarios, d'après lui seuls 2 scénarios sur 11 (le scénario Négawatt et le scénario ADEME 2050) atteignent le facteur 4.

Le scénario Négawatt ne repose que sur des technologies « éprouvées et matures ». Le scénario Négawatt peut être synthétisé par le triptyque : sobriété, efficacité et renouvelables (Figure 1-6).

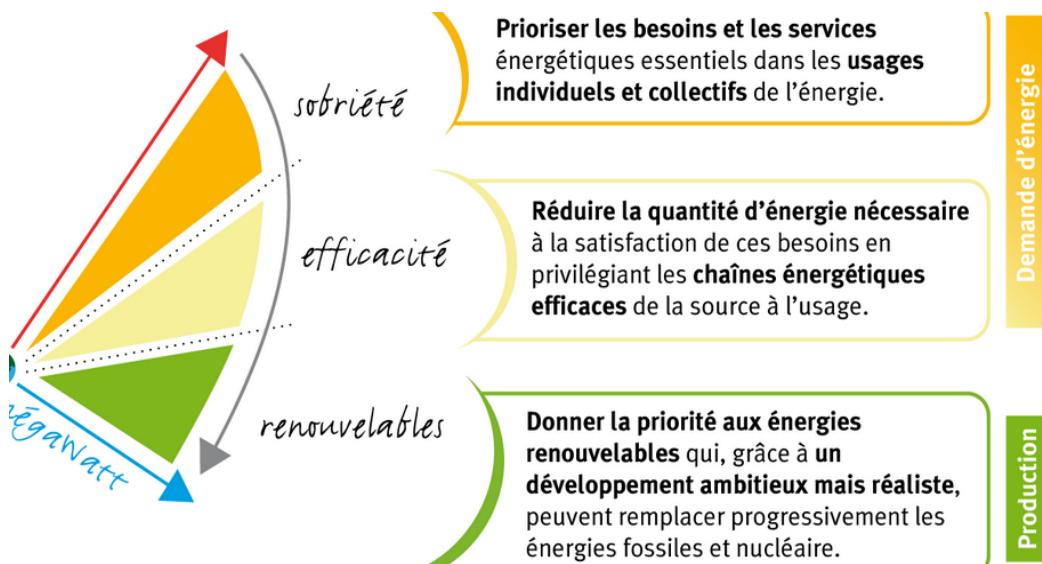
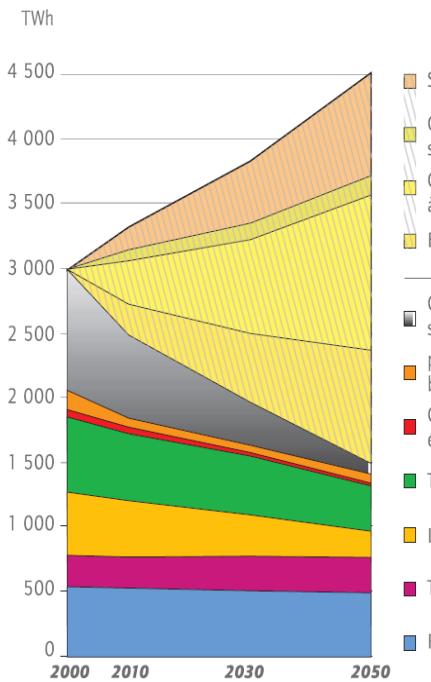


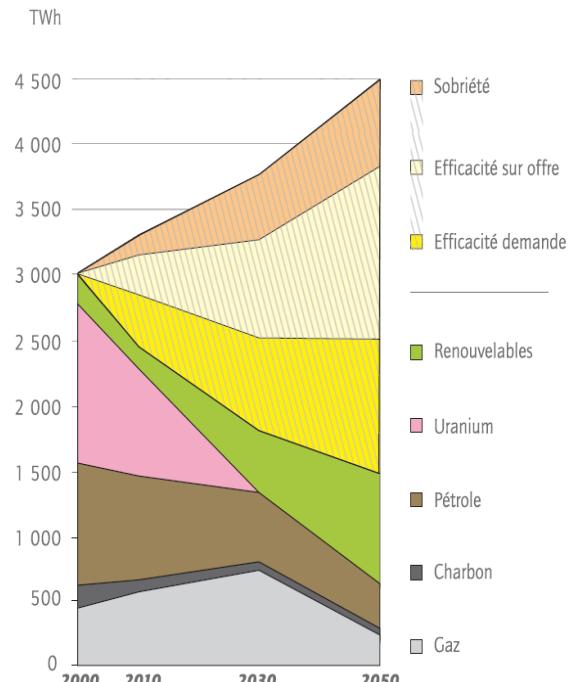
Figure 1-6 Illustration de la démarche Négawatt

Revenons sur le principe du scénario Négawatt qui est basé sur le « **gisement de Négawatt** », c'est-à-dire toutes les consommations qui pourraient être évitées grâce aux actions de sobriété et d'efficacité énergétique. Le terme d'efficacité énergétique est bien connu, cela consiste à produire, distribuer, consommer de l'énergie avec le moins de perte possible. La sobriété quant à elle est plutôt « *une réflexion et une redéfinition de nos besoins en matière d'énergie permettant ainsi une modération de nos consommations* » (NEGAWATT 2013b).

Cette réflexion sur les besoins de services énergétiques est détaillée dans leur scénario selon 3 usages (la chaleur, la mobilité et l'électricité spécifique) et aussi selon 5 secteurs d'activités (habitat, tertiaire, transports, industrie et agriculture). C'est cette réflexion globale qui permet au scénario Négawatt de **répondre au besoin de réduction des risques et des impacts liés à notre modèle énergétique**. Il est essentiel de noter que le débat n'est pas restreint à la lutte contre le réchauffement climatique. En effet, les contraintes sur l'eau, les matières premières ou l'usage des sols sont prises en compte. D'ailleurs, le scénario Négawatt est couplé depuis 2013 avec le scénario Afterres2050 sur l'alimentation, l'agriculture et l'usage des sols, réalisé par l'association Solagro. L'évolution de la consommation (divisée par deux) est détaillée par usage (Figure 1-7) et par ressource (Figure 1-8). Les énergies fossiles voient leur part (en %) se réduire dès à présent et diminuer (en valeur absolue) dès 2030. Un planning de fermeture des centrales nucléaires est fourni, nous ne rentrerons pas dans ce débat.



[Figure 1-7 Scénario Négawatt de consommation d'énergie primaire par usages](#)



[Figure 1-8 Scénario Négawatt de consommation d'énergie primaire par ressources](#)

1.1.5 AVENIR DES RCU : BESOIN DE CHAUFFAGE ELEVE MALGRE LES POLITIQUES ENVIRONNEMENTALES

L'habitat n'est pas un bien de consommation classique (notamment par sa durée de vie longue et l'attachement des habitants), néanmoins il représente le 1^{er} poste de dépense des Français (25 % : loyer, dépense d'énergie, meubles et électroménager).

Avec le paquet énergie climat, l'Union Européenne s'est fixée 3 objectifs, qui sont de réduire les gaz à effet de serre (GES), d'améliorer l'efficacité énergétique (EE) et d'augmenter la part d'énergie renouvelable et de récupération (EnR&R) dans la consommation finale d'énergie. Les objectifs chiffrés sont détaillés dans le Tableau 1-1, conforme au site internet de l'Union Européenne (UE 2014) et à l'ADEME (ADEME 2015b). La feuille de route climat de l'UE vers une économie à faible intensité de carbone à l'horizon 2050 est moins précise quant à la progression des EnR&R. Au contraire, les schémas régionaux climat air et énergie (SRCAE) sont plus précis sur les objectifs. Une comparaison intéressante de 3 Plans Climat-Energie Territorial (PCET) sur les villes de Paris, du grand Lyon et de Nantes Métropole est par exemple réalisée en annexe 2 de la thèse (MARGUERITE 2014).

[Tableau 1-1 Comparaison des objectifs chiffrés suivant l'échéance considérée \(2020, 2030 ou 2050\)](#)

	plan 2020, pris 2007		2030, pris COP 21 dec 2014	2050
	UE	Fr	UE	UE
GES	-20 % (/1990)	-14 % (/2005)	> - 40%	-80 % (/1990)
EE	-20 %	-38 % bâtiment	> - 27%	-30 % (/2005)
EnR&R	+20 %	+23 %	> 27%	pas d'objectif

Ces ambitions se traduisent pour la France(ADEME 2015b) :

- L'EE est principalement axée sur le secteur du bâtiment. Celui-ci représente le 1^{er} poste (44 % en 2012) de la consommation d'énergie finale. La loi de programme relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement prévoit une diminution de 38 % de la consommation d'énergie dans les bâtiments existants d'ici 2020. Dans ce plan de rénovation énergétique de l'habitat, 500 000 logements, soit près de 1 % du parc, seront rénovés chaque année à partir de 2017.
- L'objectif d'intégration d'EnR&R est ciblé à 23 % dans un plan national en faveur des EnR, décliné par filière en énergie finale : 33% de renouvelables dans la consommation de chauffage et de climatisation, 50% d'augmentation de la chaleur renouvelable (solaire et géothermie), 10% de biocarburants dans la consommation d'énergie des transports et 27% de consommation d'électricité produite à partir d'EnR.

Dans le processus d'aide à la décision dans la rénovation énergétique des bâtiments, il faudrait procéder à la rénovation énergétique de l'enveloppe du bâtiment (pour réduire ses besoins en chauffage) avant d'envisager de changer son système de production de chaleur (pour mieux produire, c'est-à-dire meilleur rendement et/ou diversification du mix énergétique). Autrement « on tue le gisement » (SIEDLER et ENERTECH 2012).

Cette règle est valable théoriquement. Mais la réalité économique et le raisonnement à court terme mènent à la procrastination ou à l'abandon de ces travaux. De plus, celui qui paie la rénovation n'est pas forcément celui qui vit dans le logement et donc celui qui gagne en confort tout en payant moins de charges. Pourtant entretenir son patrimoine permet de conserver voire même de gagner en valeur.

En perspective, malgré une politique de rénovation énergétique du secteur du bâtiment :

- En 2020, 45 % du bâti datera d'avant 1975 (période à laquelle aucune réglementation thermique - RT - n'existe) et 90 % d'avant la RT 2012.
- En 2050, 70 % auront été construits avant 2010 et encore 30-40% datera d'avant 1975.

Pour répondre à l'approvisionnement énergétique conséquent, les réseaux de chaleur (et de froid) remplissent 4 critères nécessaires :

- ils peuvent mobiliser massivement des EnR&R ;
- ils sont compatibles avec la contrainte des villes (3/4 de la population vit en zone urbaine en France en 2010 selon l'INSEE) ;
- ils représentent une solution mature applicable dès maintenant pour les objectifs 2020 ;
- ils ont un potentiel de développement pour répondre aux objectifs 2050.

Ainsi les RCU sont parties prenantes des scénarios de transition énergétique, examinons dans la section suivante les éléments constitutifs d'un RCU, leurs avantages et leurs conceptions.

1.2 LES RESEAUX DE CHALEUR URBAINS (RCU) : DESCRIPTION, AVANTAGE ET CONCEPTION

1.2.1 LA SOLUTION TECHNOLOGIQUE DES RCU

Un réseau de chaleur urbain est une solution technologique permettant d'approvisionner en chaleur (pour le chauffage, de l'eau chaude sanitaire ECS et/ou un besoin industriel) un ensemble de bâtiments (quartier, ville ou territoire) et d'industries. C'est une solution permettant de saisir l'opportunité de relier des zones potentielles de production de chaleur (zone industrielle rejetant de la chaleur, territoire à potentiel d'EnR&R, maison à énergie positive) à d'autres zones de consommation. **Un RCU permet donc de décorrélérer la production de la consommation, en jouant sur la mutualisation des équipements, l'accès aux ressources, l'inertie (du réseau et des bâtiments) et le stockage thermique.** Un RCU est également l'outil idéal pour créer des synergies entre les autres réseaux (électricité, gaz et eau), pour préserver la qualité de l'air des villes, pour limiter les effets « îlots de chaleur » ou encore pour limiter l'appel à des pics de production (les plus polluants et les plus chers).

Une description technique des organes et fonctionnement d'un RCU est disponible dans les techniques de l'ingénieur (NARJOT 1985). Une vision synthétique (Figure 1-10) a été proposée par Via SEVA et l'ADEME dans le journal « Mon quotidien » (VIA SEVA et ADEME 2015). Tous les éléments constitutifs des RCU sont présents et définis, du lieu de production au lieu de livraison, en passant par les canalisations. La multiplicité des sources d'énergie ainsi que les différents usages des bâtiments sont également illustrés (plus approfondi prochaine sous-section 1.2.2). La Figure 1-9 propose une comparaison des solutions d'approvisionnement de chaleur et aide à définir les termes. Notons que si un seul lieu de production est retenu (P1), on parle d'une production centralisée, sinon de plusieurs productions décentralisées (P2 et P3). Une chaufferie dédiée à approvisionner le réseau primaire, reliant les chaufferies aux sous-stations, est qualifiée de chaufferie communautaire. Au contraire, on parle de chaufferie collective si elle approvisionne un immeuble, ou alors de chaudière individuelle si celle-ci est propre à chaque logement. Il se peut aussi que certains consommateurs ne soient pas reliés au réseau, par exemple, s'ils sont éloignés de celui-ci, on parle alors d'une production isolée (du réseau principal).

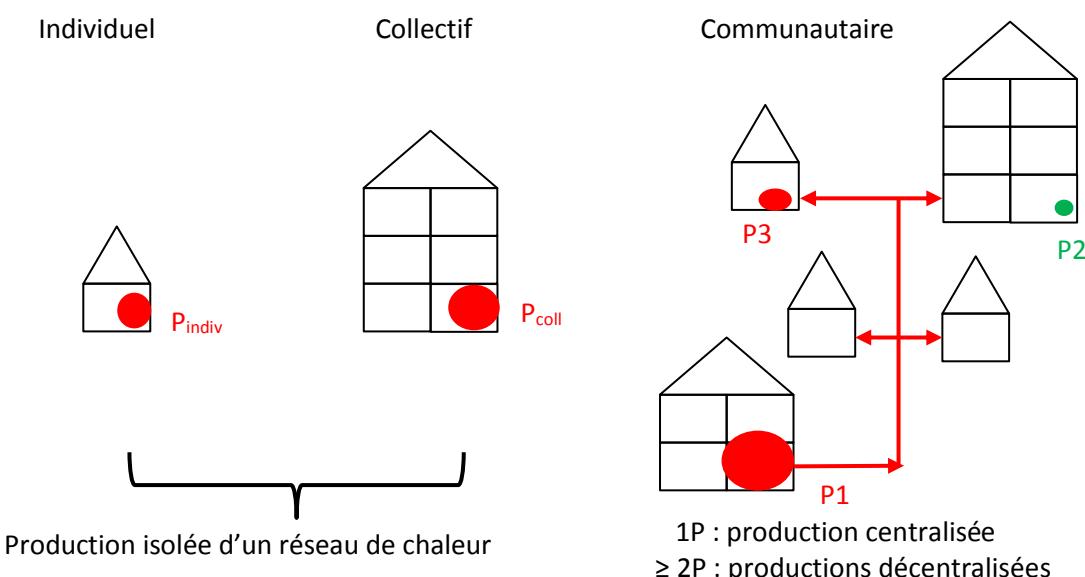


Figure 1-9 Comparaison de différentes solutions approvisionnement de chaleur

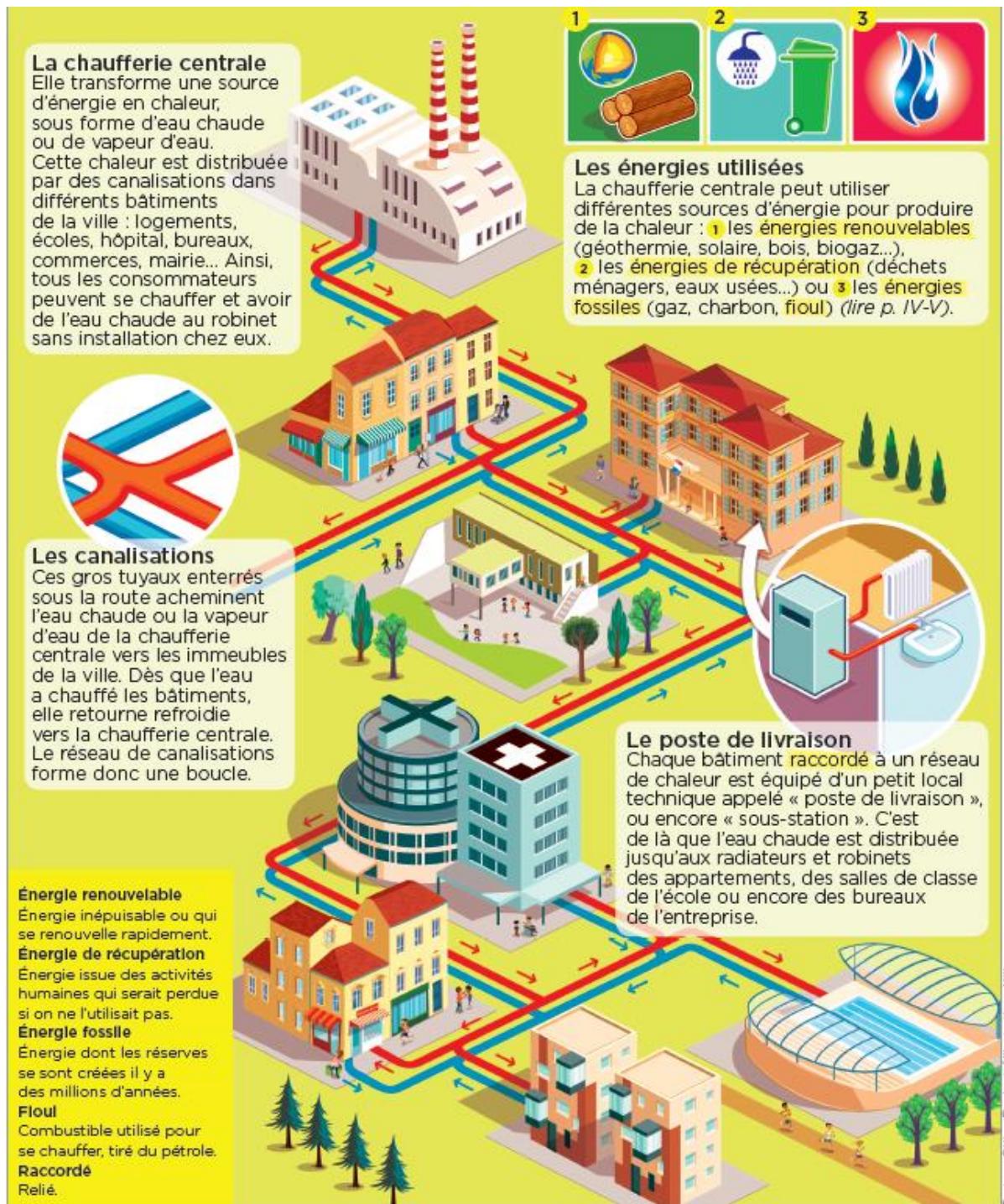


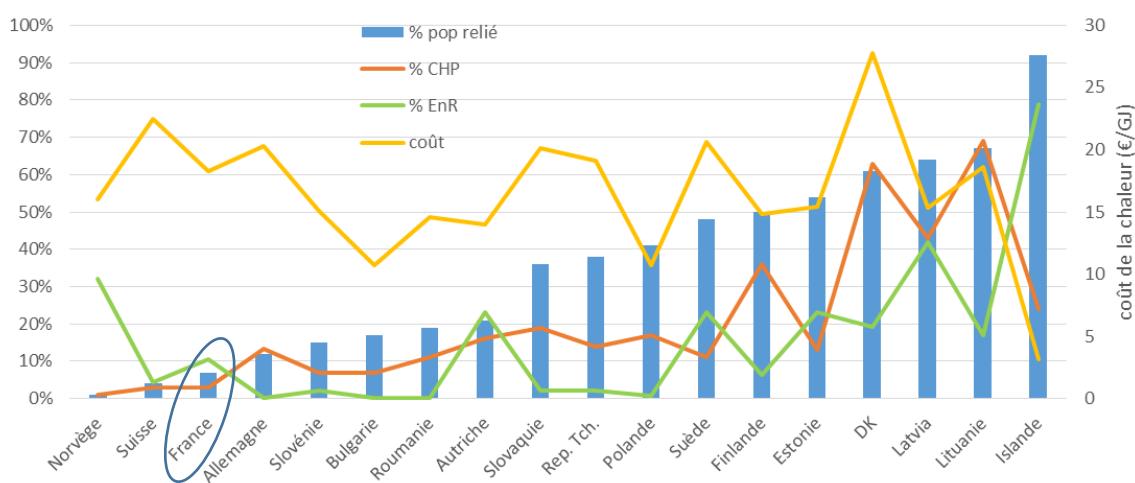
Figure 1-10 Illustration schématique des éléments constitutifs des RCU (VIA SEVA et ADEME 2015)

Dans les sous-stations, des échangeurs de chaleur transmettent la chaleur à livrer dans les bâtiments dans un réseau qualifié de secondaire. Il peut y avoir plusieurs départs en sous-station pour approvisionner différentes parties du bâtiment et/ou pour différencier le besoin de chauffage du besoin d'ECS. En effet, l'ECS est souvent distribuée via un ballon tampon et est distribuée à un régime de température différent (au moins à 60 °C), car une réglementation particulière existe pour éviter tout risque de contamination par légionellose. Alors que pour le chauffage, cela dépend de la technologie, pour de vieux radiateurs en fonte, l'eau est distribuée autour de 70 °C et pour une nouvelle technologie comme un plancher chauffant plutôt autour de 35 °C. En France, une sous-station peut alimenter plusieurs bâtiments, ce qui n'est pas toujours le cas suivant la législation des pays. Au sens juridique du terme, la dénomination RCU est utilisée si le réseau dessert au moins 2

1.2 : Les réseaux de chaleur urbains (RCU) : description, avantage et conception

consommateurs différents, autrement le terme de réseau technique est juridiquement exact. Dans ce manuscrit cette distinction n'est pas utilisée, la conception du réseau étant la même.

La technologie des RCU n'est pas nouvelle. Néanmoins son développement est plus ou moins étendu suivant les pays. On constate un faible pourcentage en France de population reliée à des RCU (7 %), comparé à d'autres pays européens, notamment en Scandinavie (50-60%) (Figure 1-11) (EHP 2013). De plus, certains réseaux sont plus vertueux du point de vue environnemental que d'autres (intégration d'EnR&R et/ou de cogénération - abrégée CHP de l'anglais Combined Heat and Power). Certes, les RCU de l'Europe de l'Est ont un faible taux d'EnR&R, mais ils possèdent l'avantage d'une bonne intégration de la cogénération. Le coût n'est pas directement proportionnel à la part d'EnR&R et/ou de cogénération, car il peut y avoir une part importante de taxes, p. ex le Danemark a son prix du gaz incluant 31% de taxes SoeS 2014). **Le potentiel de développement des RCU est grand en France, en comparaison avec ses homologues européens.**



[Figure 1-11 Comparaison des statistiques des RCU en Europe \(adapté des statistiques d'Euroheat & Power EHP 2011 \(EHP 2013\)\)](#)

En France, on distingue 4 grandes périodes de développement des RCU.

- 1) Les 1^{er} apparaissent avant 1950 dans certaines grandes villes avec de grands besoins de chaleur (Paris, Grenoble ou Strasbourg).
- 2) Dans les années 1960 des réseaux sont créés en lien avec les grandes politiques d'urbanisation.
- 3) Les années post choc pétrolier sont prospères au développement de nouveaux RCU, notamment basé sur la géothermie ou la récupération de chaleur sur des incinérateurs de déchet (UIOM).
- 4) Un regain d'intérêt récent pour les RCU voit le jour depuis les années 2000-2010, comme en témoignent p. ex. le nombre de publications scientifiques et les récentes politiques environnementales.

L'avenir est aux réseaux dits de 4^{ème} génération. Ce concept, illustré fFigure 1-12, sous-entend entre autres les tendances suivantes : diminution du besoin de chaleur des nouveaux bâtiments performants, passage à la très basse température, la valorisation de potentiel d'EnR&R, interconnexion de plusieurs RCU entre eux, synergie entre réseaux de gaz, électricité, d'eau et de froid, stockage d'énergie.

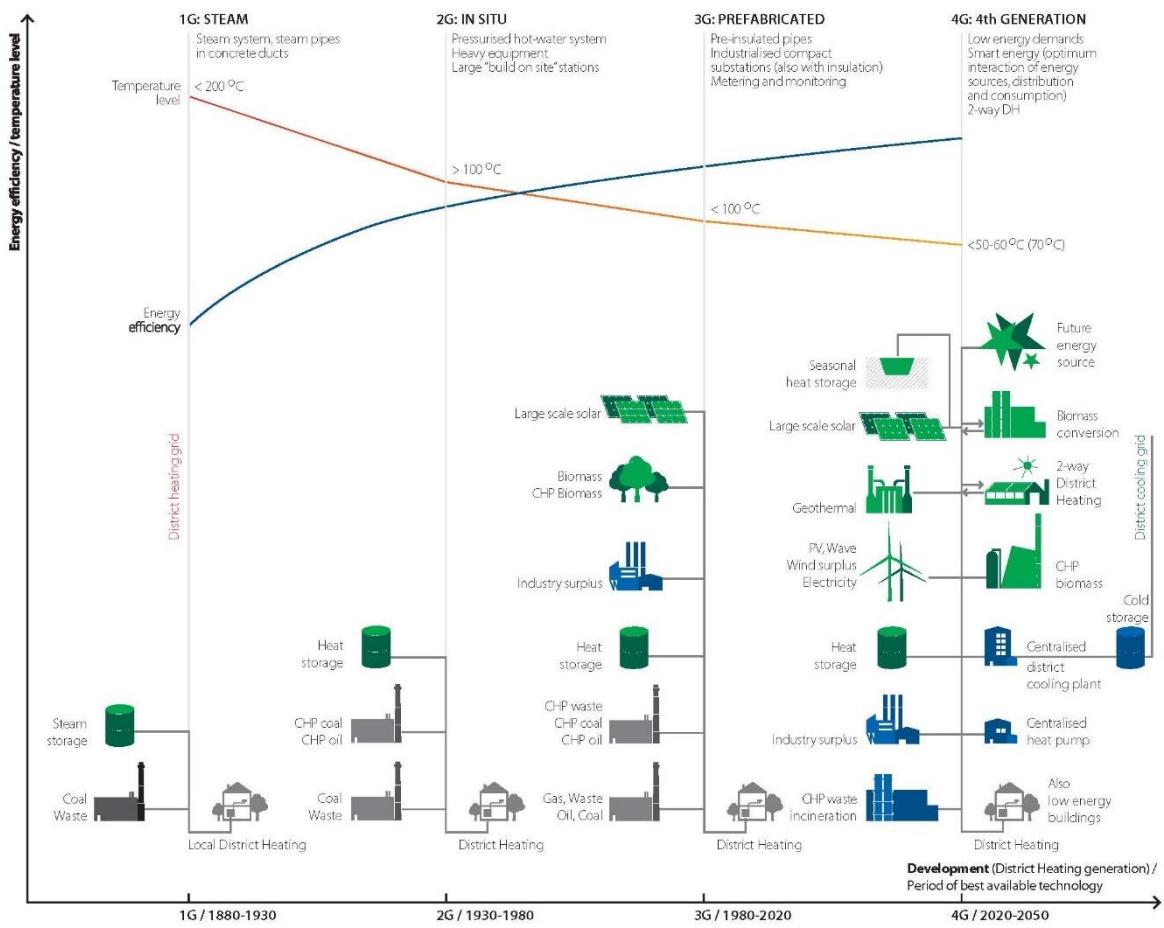


Figure 1-12 Comparaison des 4 générations de RCU (LUND et al. 2014)

1.2.2 LES RCU : QUELQUES POINTS A EVITER POUR PROFITER DE NOMBREUSES OPPORTUNITES

Maintenant que la technologie des RCU a été décrite, détaillons ses avantages et inconvénients.

ANALYSE SWOT

Comme le soulignent (REZAIE et ROSEN 2012), les RCU ont des avantages indéniables, aussi bien à l'échelle du territoire, que pour les utilisateurs ou encore des opérateurs. Le Tableau 1-2 (SWOT est l'acronyme anglais de *Strengths Weaknesses Opportunities Threats*) ne sépare pas les avantages selon les bénéficiaires, mais il réalise une étude stratégique de la solution d'approvisionnement de chaleur par un RCU par rapport aux autres solutions (chaudière individuelle ou collective, ainsi que le réseau d'électricité et de gaz). Certes des faiblesses et menaces existent, mais cette solution d'approvisionnement n'est pas nouvelle, la technologie est mature et offre un fort potentiel pour répondre aux objectifs du développement durable. En France le (PLAN BATIMENT DURABLE 2016) vient de proposer 34 propositions pour aider le développement des réseaux de chaleur et de froid. 4 ensembles de propositions se démarquent :

- amélioration de la connaissance des réseaux en France ;
- amélioration des RCU les moins performants ;
- formation des acteurs de leur conception à leur réalisation et maintenance ;
- soutien des subventions pour augmenter le nombre d'usagers raccordés à un réseau vertueux.

1.2 : Les réseaux de chaleur urbains (RCU) : description, avantage et conception

Tableau 1-2 Analyse SWOT des RCU (ADEME et al. 2008) partie C12 sur les microréseaux de chaleur et review (REZAIE et ROSEN 2012)

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> - Valorisation d'EnR, de récupération de chaleur fatale et de la cogénération. - Coût opérationnel plus faible que les systèmes classiques. - ECS disponible instantanément et en grande quantité. - Sécurité dans le logement : pas de risque d'intoxication au monoxyde de carbone ou explosion de chaudière individuelle. - Pas de soucis d'entretien d'équipement individuel. - Pas de connexion à un réseau de gaz, mais à un réseau de chaleur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Montage difficile, car implique de nombreux acteurs. - Investissement important. - Contrat souvent à long terme, pas possible de revenir en arrière. - Système centralisé qui nécessite un local technique : espace au sol, émission localisée de polluant, impact visuel pour les riverains (NIMBY). - Panne sur le réseau implique une panne pour tous les bâtiments connectés. - Installation des réseaux : contraintes en termes de prise d'espace, de maintenance, d'espace disponible dans les galeries techniques.
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> - Prise de conscience privée et publique du changement climatique. - Développement de service chauffage et ECS, plutôt que fioul, gaz et électricité. - Politique aménagement local qui privilégie la concentration de l'habitat (haute densité thermique). - Rénovation énergétique pouvant amener des réflexions plus globales sur le mode de production de chauffage et d'ECS. - Aide des pouvoirs publics. - Création d'emplois locaux. - Solution mature pour les objectifs 2020 et aussi avec du potentiel à l'horizon 2050. 	<ul style="list-style-type: none"> - Équipements individuels performants. - Réhabilitation faisant diminuer la rentabilité des RCU. - Bâtiment avec un chauffage tout électrique : pas de réseau secondaire pour distribuer l'eau chaude dans le bâtiment, donc le raccord à un RCU n'est pas rentable. - Réseaux d'énergie (gaz ou électricité).

LES 5 PRINCIPES FONDAMENTAUX

(FREDERIKSEN et WERNER 2013) insistent dès l'introduction de leur livre sur les **5 principes fondamentaux des réseaux de chaleur et de froid : économie d'envergure, économie d'échelle, flexibilité, faible impact environnemental et sécurité d'approvisionnement**. Ces principes vont être détaillés ci-dessous. Un dernier point est ajouté pour clôturer ce chapitre sur le rôle central des RCU permettant de créer des synergies entre les réseaux d'électricité et de gaz.

À noter d'ores et déjà que l'économie d'envergure est différenciée de l'économie d'échelle. Cette dernière est bien connue : un bien a un coût unitaire plus faible si celui-ci est produit à grande échelle. C'est déjà le cas des chaudières collectives. L'économie d'envergure, quant à elle, est vraiment le concept clé des réseaux de chaleur urbains. Elle permet de valoriser des effets de synergie. **Certaines ressources (notamment la chaleur fatale et la cogénération) ainsi que les synergies entre les réseaux (chaleur, gaz et électricité) offrent des contextes favorables aux économies dites d'envergures.**

Chaleur fatale

La chaleur fatale est définie par (ADEME 2015a) comme étant « la chaleur générée par un procédé qui n'en constitue pas la finalité première, et qui n'est pas récupérée. Ainsi, la chaleur issue de la cogénération — dont le but est de produire simultanément de la chaleur et de l'électricité à partir de combustibles — n'est pas considérée comme une chaleur de récupération ».

La chaleur fatale perdue est doublement chère, car elle a à la fois un coût dû à sa production, mais aussi un coût pour son rejet à l'ambiance (le plus souvent, les rejets thermiques sont réglementés).

Différentes sources de chaleur fatales sont disponibles : sites industriels, raffineries, sites de production d'électricité (centrales nucléaires et thermiques), sites tertiaires (hôpitaux, data center) ou des sites d'éliminations (usines d'incinération des ordures ménagères UIOM). La chaleur fatale ne pourra être récupérée que par une technologie adaptée au type de rejet (liquide, gazeux, diffus) et suivant son niveau de température. Typiquement, les rejets sont entre 30-90°C dans l'industrie agroalimentaire, papier-carton et la chimie. Alors que la gamme de température est plus élevée (130-500°C) dans l'industrie des métaux, verre, ciment, tuiles et briques.

Évidemment avant d'établir un contrat pour acheter de la valeur fatale, il faudra que des actions d'efficacité énergétique aient été réalisées. Autrement le risque est que la quantité de chaleur disponible à faible coût se tarisse à l'avenir.

L'association européenne Euroheat & Power EHP estime que la quantité de chaleur gaspillée dans la production électrique, l'incinération et l'industrie serait équivalente à 500 milliards d'euros au niveau européen, soit mille euros par habitant (SIA Partners 2012). Pourtant on constate sur les Figure 1-11 et Figure 1-13 que dans les pays de l'ancien bloc soviétique et certains pays du nord, les réseaux de chaleur sont bien développés : la part de marché des réseaux de chaleur sur le marché de la production de chaleur est supérieure à 40 %. Il y a donc une **belle marge de progression en France**, ainsi que dans des zones de développement urbain rapide, telles qu'en Afrique ou en Chine (CNRS 2016).

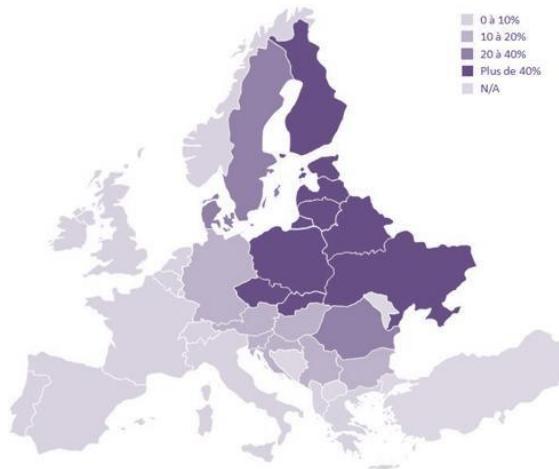


Figure 1-13 : Part de marché des réseaux de chaleur sur le marché de la production de chaleur. (SIA Partners 2012)

En France depuis le 1^{er} janvier 2015, l'étude de valorisation de la chaleur fatale via un réseau de chaleur est obligatoire pour les ICPE (installations classées pour la protection de l'environnement) d'une puissance thermique supérieure à 20 MW (Décret du 14 novembre 2014 transposant l'article 14.5 de la directive européenne 2012/27/UE sur l'efficacité énergétique.)

L'ADEME (ADEME 2015a) estime que le gisement de chaleur fatale industrielle pour les RCU existants est de l'ordre de 10,2 TWh, soit 20 % du gisement national. En comparaison d'ordre de grandeur, l'industrie est le 3^{ème} secteur de consommation d'énergie avec 310 TWh en 2012, dont 271 TWh (environ 70 %) servent directement à l'alimentation des fours et séchoirs et 44 TWh pour les raffineries.

Cogénération

Il est physiquement impossible d'obtenir une transformation énergétique avec 100 % d'efficacité. Avec les méthodes conventionnelles de production séparée d'électricité et de chaleur, seulement 30 à 45 % sont effectivement transformés en électricité, donc entre 55 % à 70 % de l'énergie primaire est perdue en chaleur (IESF 2010). Le meilleur rendement (55 %) pour produire uniquement de l'électricité est obtenu avec une turbine à gaz à cycle combiné. Les rendements de production électrique des centrales nucléaires sont plus faibles (entre 32 et 35 % suivant la taille du réacteur, calcul à partir des caractéristiques des puissances électriques et thermiques des réacteurs (IAEA 2010)). La cogénération consiste à récupérer au mieux cette énergie thermique lors de la production d'électricité. Le rendement global (électricité produite et chaleur récupérée, ou inversement suivant le point de vue chaleur produite et électricité co-générée) est bien meilleur, de l'ordre de 80 à 90 %. Mais il faut alors une production locale et de petite dimension car la chaleur récupérée est moins facilement transportable que l'électricité. **La cogénération est adaptée et pertinente avec le développement des RCU.**

En 2012 en France, les centrales de cogénération ont produit 4,4 Mtep de chaleur, dont 1,6 Mtep a été vendu à des utilisateurs tiers. Tout le reste, soit 63 % de la chaleur produite par cogénération, a été autoconsommé (SoeS 2015). D'après le scénario Négawatt, en France il y a environ 950 TWh (soit 82 Mtep) de besoin de chaleur en énergie finale, soit la cogénération ne répond qu'à une très faible partie (5 %). Ainsi, **la cogénération est en France « une filière prometteuse, mais dans une situation paradoxale »** (IESF 2010), avec une politique d'obligation d'achat contraignante et pas assez attractive.

Effet foisonnement et mixité d'usage

Il est avantageux de mutualiser la production de chaleur, d'autant plus lorsque les usages des bâtiments sont diversifiés : différents niveaux de température dans les réseaux secondaires (intérêt de l'approvisionnement en cascade de température des consommateurs) et différents pics d'appels de puissance. Cet effet de foisonnement est dû à 2 causes, parfois liées, la mixité des usages et le nombre de consommateurs :

- La mixité est illustrée sur la Figure 1-14 grâce à un exemple théorique simple comprenant 2 bâtiments, l'un est un bureau (vert) et l'autre une résidence (jaune). Chacun ayant un besoin d'appel de puissance maximal de 100 kW. Si chaque bâtiment doit avoir sa propre chaufferie collective, elle devrait donc être dimensionnée pour satisfaire l'appel maximal soit 200 kW à installer par tranche de 100 kW. Rappelons que l'investissement d'une chaudière est lié à la puissance à installer. Or grâce à la solution technologique des RCU, la puissance à dimensionner serait moindre. En effet, les consignes de chauffage n'interviennent pas au même moment de la journée. La mixité d'usage fait que la puissance à installer (p. ex. environ 120 kW) est inférieure à la somme des puissances des technologies isolées (p. ex. 2 x 100 kW).
- Le nombre de consommateurs à approvisionner implique forcément des comportements d'usagers différents : puisage d'ECS, présence dans le logement (personnes âgées, enfant bas âge, chômeurs), ou encore horaire de travail.

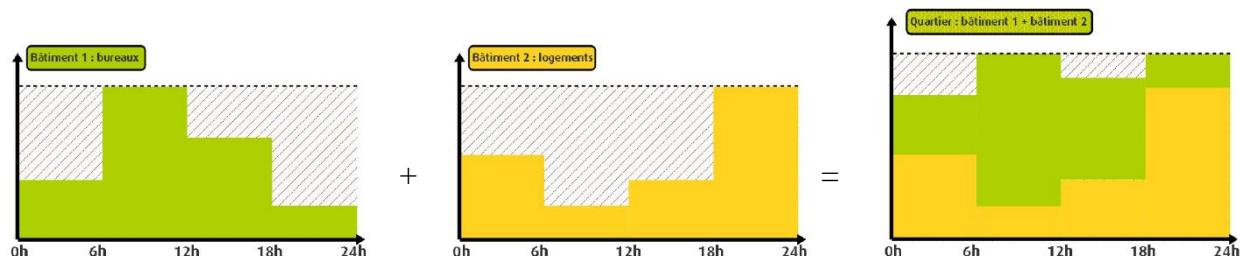


Figure 1-14 Illustration de l'effet de foisonnement grâce à la mixité d'usage des bâtiments (CEREMA et BOURRAT 2014)

Faible impact environnemental et diversité des ressources

Un réseau de chaleur a l'avantage de pouvoir relier sur un territoire des zones de production (idéalement des gisements d'EnR&R) avec des zones de consommation (quartier avec un besoin de chaleur à satisfaire). Autrement, une simple technologie de production isolée ne pourrait l'exploiter seule, à cause de l'éloignement, mais aussi parfois à cause de l'investissement initial conséquent.

La mutualisation des chaufferies améliore la maintenance et permet un meilleur contrôle de la pollution (certes localisée, mais ce qui peut être un avantage pour le captage de celle-ci). La qualité de l'air en ville est ainsi mieux préservée. De plus, par l'introduction croissante d'EnR&R dans le mix énergétique, la pollution est également diminuée par nature.

Du fait de la diversification du mix énergétique (énergie fossile laissant de plus en plus part aux EnR&R), l'impact environnemental des RCU ne cesse de diminuer. Ce caractère vertueux est d'ailleurs un de leurs atouts majeurs. Il peut être illustré par des facteurs de ressource primaire plus faibles (inférieurs à 1) que d'autres modes de chauffage (le gaz est plutôt vers 1,4 et le chauffage électrique à 2,69) (AMORCE 2010). Plusieurs technologies de production de chaleur sont disponibles pour approvisionner un RCU :

- les énergies renouvelables (solaire, biomasse, géothermie, gaz renouvelable...) ;
- les énergies de récupération (récupération sur des usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM), chaleur industrielle, récupération de chaleur sur eau de mer, lac, rivière, eaux usées...) ;
- la cogénération ;
- les énergies fossiles conventionnelles (gaz, fuel ou charbon) ;
- l'électricité (via des pompes à chaleur).

Sécurité de l'approvisionnement et compétitivité

En France, la sécurité énergétique n'est pas – pour l'instant – l'argument majeur des RCU. Néanmoins un RCU est, comme le bâtiment, un patrimoine à valoriser à long terme. Il est nécessaire d'avoir une vision sur la volatilité du prix du baril de pétrole, les risques géopolitiques, l'inflation du prix unitaire des énergies fossiles. Ainsi, lorsque les utilisateurs finaux choisissent de se raccorder à un RCU, ils se garantissent de mieux maîtriser leur facture énergétique que s'ils étaient dépendants d'une production isolée souvent tributaire d'une seule énergie. Même si – pour l'instant – le prix de l'électricité en France est le plus bas de toute l'Europe et si le cours du gaz naturel est relativement bas suite à l'exploration des gaz de schiste aux États-Unis (SoeS 2014), il est fort à parier que l'énergie sera plus chère à l'avenir. **Diversifier son mix énergétique, ce qui est possible et encouragé avec les RCU, est une réelle solution pour sécuriser son approvisionnement énergétique.**

L'AMORCE a réalisé une enquête des prix de la chaleur (AMORCE 2010), en comparant selon de nombreux modes de chauffage (communautaire, collectif et individuel) et de sources d'énergie (fioul, gaz, électricité via des pompes à chaleur avec des coefficients de performance différenciés ou directement des radiateurs électriques). Il ressort de cette étude que **les RCU les plus vertueux (>50% d'EnR&R dans le mix énergétique) sont le système de chauffage le plus économique**. Mais également les RCU les moins performants et vertueux sont parmi les plus chers systèmes de chauffage. La monotone des prix moyens de la chaleur en 2012 est à 77,10 €TTC/MWh et 70 % des prix se situent dans une fourchette à +/- 30 % (entre 54 et 100 €TTC/MWh).

Dans le cas des bâtiments rénovés, les RCU peuvent être rentables, (AMORCE 2011), une étude au cas par cas est nécessaire, il est d'autant plus important que le mix énergétique soit diversifié et les EnR&R fortement valorisés. Il restera toujours un besoin thermique à approvisionner. Et imaginons également qu'à l'avenir, l'électricité soit réservée aux usages qui ne peuvent pas s'en passer. Cette idée n'est pas irréalisable, par exemple dans le projet européen (Celsius smart city Project 2016) des démonstrateurs

sont déjà opérationnels. Ces consommations pour chauffer l'eau des lave-linge et lave-vaisselle sont non négligeables et incompressibles même dans un contexte de bâtiments basse consommation ou passifs (5 et 10 kWh/m² par an).

SYNERGIE ENTRE RESEAUX D'EAU, D'ELECTRICITE, DE CHALEUR ET DE FROID

Les réseaux jouent un rôle central dans la transition énergétique, comme le souligne notamment le scénario Négawatt (Figure 1-15). Qui plus est, lorsque les réseaux sont interconnectés notamment grâce à la cogénération et à la méthanation.

Comme vu précédemment, la cogénération permet de valoriser la chaleur produite inéluctablement lors de la production d'électricité. Et la méthanation (ou power to gas) consiste à réaliser l'hydrolyse de l'eau pour produire du dihydrogène (à partir d'électricité, si possible issue d'EnR&R) puis ce dernier est couplé à du dioxyde de carbone (capturé sur des procédés) pour produire du méthane (qualifié de gaz renouvelable si l'électricité produite l'est). Ce gaz peut être injecté dans le réseau de gaz existant. Le rendement global (60 % pour produire du méthane) est assez faible comparé au rendement du stockage d'électricité (par batterie notamment, entre 75 et 90 %), mais cette solution a l'avantage de permettre de stocker et transporter de très grandes quantités d'énergie sur de très longues périodes (plusieurs mois) (REICH et GDF SUEZ DRI 2013).

L'aide à la conception des RCU gagnerait à prendre en compte les synergies avec les autres réseaux lors de la planification énergétique territoriale.

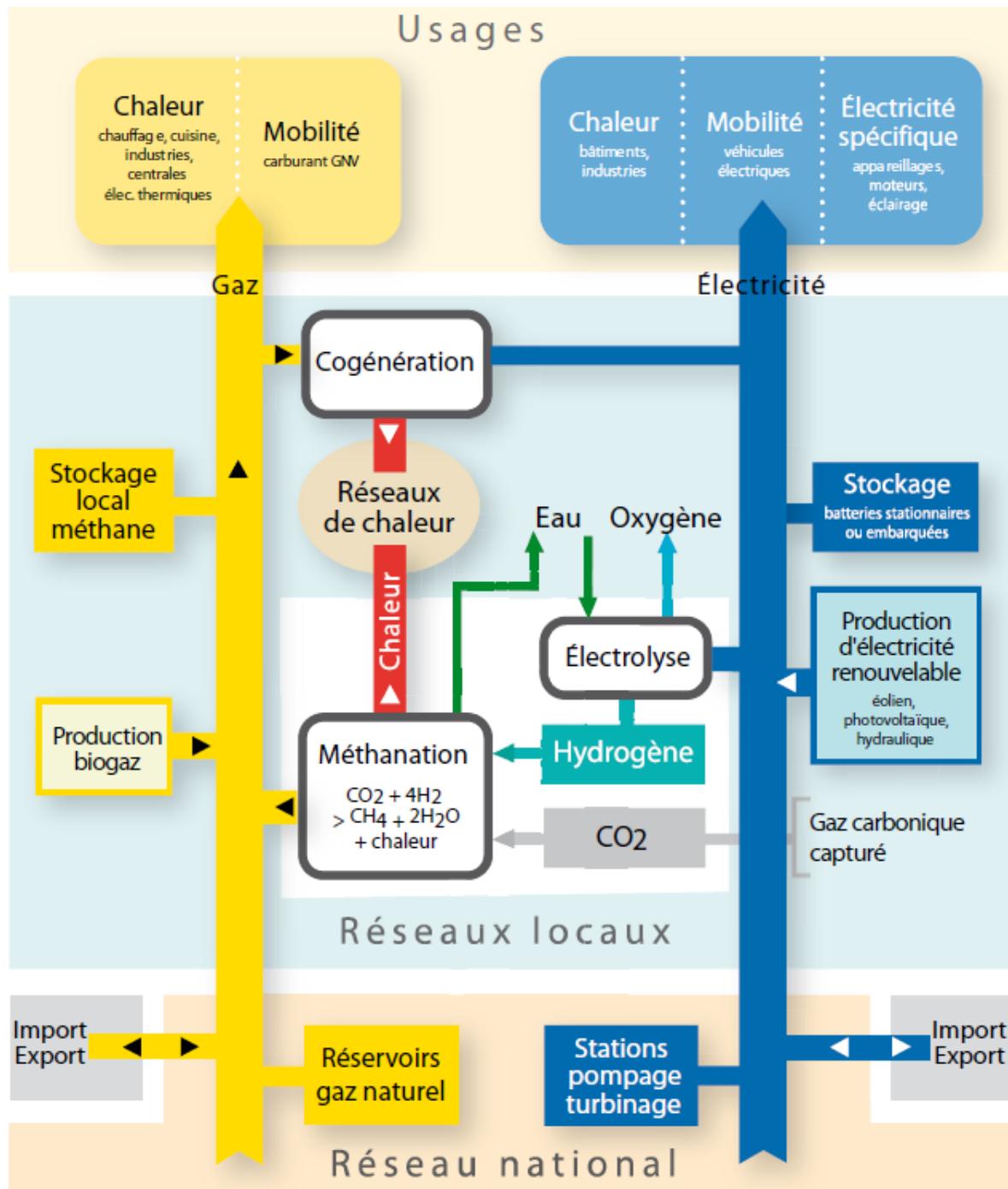


Figure 1-15 Illustration de la complémentarité entre réseaux, via la méthanation (NEGAWATT 2013a)

1.2.3 AIDE A LA CONCEPTION CLASSIQUE DES RCU

Nous abordons ici des méthodes de conception actuelle des RCU, afin de mieux comprendre la valeur ajoutée des méthodes d'optimisation mathématiques dans l'aide à la conception des RCU.

INDICATEURS SPECIFIQUES AUX RCU

L'utilisation d'indicateurs de performance sert pour tous les acteurs d'un projet de réseau de chaleur à avoir des critères de référence sur lesquels ils vont pouvoir se baser dans leurs échanges (CETE 2013). Définir la performance d'un réseau de chaleur permet d'analyser la situation existante de ce réseau, de mieux cibler les améliorations à faire, et globalement de définir un schéma directeur pour l'avenir du réseau. Ces indicateurs servent aussi pour le classement des réseaux de chaleur (CETE 2013).

Les critères permettant de décrire un RCU sont les critères de faisabilité et de performance. Nous ne distinguons pas les critères « théoriques », qui se calculent en amont avec des hypothèses, des critères « réels » en retour d'expérience. Détaillons par exemple deux critères déterminants (les plus communs) que sont le coût global et la densité thermique.

L'approche coût global, détaillée dans la sous-section (2.5) ainsi qu'en (Annexe E), permet de démontrer que malgré un investissement initial important, un réseau de chaleur doit au final coûter moins cher pour les usagers que des solutions d'approvisionnement individuelles, souvent alimentées par des énergies fossiles.

La densité thermique « théorique » d'un quartier correspond à la quantité totale de chaleur livrée en kWh sur une année par rapport à la superficie du quartier. La densité thermique « réelle » d'un RCU (ou taux de raccordement) est le rapport entre la quantité d'énergie distribuée annuellement par le réseau (en kWh) et la longueur totale de réseau (en m, parfois abrégé ml pour mètre linéaire) (CETE Ouest 2012a). Les réseaux les plus courants ont une densité thermique de l'ordre de 8 MWh/m de conduite. Cela va jusqu'à 20 MWh/m sur certains réseaux très denses des années 60-70. Une densité thermique de l'ordre de 3 MWh/m, soit environ 1 équivalent-logement pour 4 mètres de réseau, peut être retenue pour l'évaluation de la faisabilité économique d'un projet de réseau de chaleur. Par ailleurs, la limite basse retenue par l'ADEME pour l'accès au fond chaleur est de 1,5 MWh/m, ce qui permet de ne pas pénaliser les projets ruraux de plus petites tailles sur des territoires moins denses. A titre de comparaison, les valeurs moyennes de densité énergétique pour les réseaux d'électricité sont de 5,6 MWh/m sur le transport et 0,34 MWh/m sur la distribution (réseau basse tension). Pour le gaz, ces valeurs sont respectivement de 11 et 2,1 MWh/m.

Ces deux critères ne peuvent pas être les seuls critères de comparaison. Des paramètres environnementaux (rejets de CO₂, taux d'ENR&R, qualité de l'air, impact paysager/architectural...), économiques et sociaux (coût de la chaleur, stabilité de ce coût, acceptabilité des solutions...) doivent aussi être considérés (CETE 2012). Une liste plus exhaustive est disponible (IGD 2009).

Nous détaillerons à la fin de la formulation section (2.6), les indicateurs que nous avons retenus pour données de sortie de notre outil.

DIFFERENTS NIVEAUX DE PROJETS ET DIFFERENTES FINALITES :

Différentes étapes interviennent dans un projet relatif aux RCU, allant des études d'opportunités énergétiques jusqu'à la gestion opérationnelle de ce réseau, en passant par l'étude de faisabilité. A chaque étape, l'expert peut agir à différents niveaux :

- Etude d'opportunité énergétique à l'échelle d'un territoire : il s'agit de proposer une cartographie du territoire afin de sélectionner des zones urbaines où conjointement l'intégration des EnR&R serait possible et le besoin thermique des bâtiments élevé.
- Phase amont de conception : étude de faisabilité (établissement du CCTP) et réalisation de l'avant-projet sommaire (APS).
- Schéma directeur : il s'agit d'assurer à long terme de la faisabilité technico-économique d'un RCU.
- Demande de permis et phase avant-projet détaillé (APD).
- Signature de la convention de raccordement et réalisation de la phase exécution (EXE).
- Phase travaux : réalisation des travaux, essais et mise en service.
- Phase exploitation : études de monitoring pour vérifier le bon fonctionnement du réseau ou comprendre des anomalies détectées (par exemple : problème en bout de réseau pour satisfaire le besoin) et gestion de réseau.

Il est possible de travailler à trois finalités différentes sur un RCU :

- La question de sa configuration : tracé du réseau, localisation de la chaufferie, production centralisée ou non et enfin quelle (s) technologie (s) choisir ?
- Savoir quel dimensionnement choisir : quelle puissance à installer, à quelle température et quel débit nominal ou encore, comment choisir le diamètre des canalisations ?
- Savoir quelle vanne fermer, quand relancer la chaudière d'appoint, peut-on diminuer la température d'approvisionnement du réseau primaire ?

Par ailleurs, la création de réseau dans de nouveaux projets peut permettre de répondre aux obligations du Grenelle de l'environnement : « L'opportunité de création de réseaux de chaleur est étudiée systématiquement en aménagement de quartier. D'ailleurs cela permet de répondre à l'obligation introduite par le Grenelle 1 d'étude de faisabilité pour le développement des énergies renouvelables dans les nouveaux aménagements (art. L128-4 du Code de l'urbanisme applicable depuis juillet 2009). » Néanmoins dans ces études, trop souvent la solution de RCU est écartée sur le seul critère de densité thermique. De plus, l'état des lieux des potentiels de récupération de chaleur ou de valorisation d'EnR est réalisé, mais sans étudier la mise en relation des lieux potentiels de production avec les lieux potentiels de consommation. Cet état des lieux n'est pas réalisé en fonction des régimes de températures et des niveaux de puissances requis.

NOBATEK souhaite intervenir sur les études d'opportunité énergétique (mise en relation des zones à fort potentiel d'exploitation d'EnR&R avec les zones avec un besoin de consommation), les études de faisabilité et le schéma directeur. Nous travaillons donc à la conception de la configuration et du dimensionnement de RCU, aussi bien pour la création, la rénovation que pour l'extension de réseaux, sans aborder la thématique de gestion. .

CONCEPTION CLASSIQUE : CARTOGRAPHIE ET APPROCHE PAR SIMULATION

Approches par cartographie : identification et localisation des besoins

Des travaux de recherche sont réalisés afin de mieux cerner le potentiel de développement des RCU sur le territoire, par exemple (BUESSLER et WEBER 2014). Un système d'information géographique (SIG) aide à visualiser ces résultats, par exemple (CREM *et al.* 2013) ou la cartographie nationale (CEREMA 2015). Le potentiel des ressources ciblé sur un territoire est une étude notamment réalisée dans les SRCAE. Nous proposons un premier exemple en Ile de France sur la vision partagée pour le développement des RCU réalisé conjointement par la Direction Régionale et Interdépartementale de l'Equipement et de l'Aménagement d'Ile-de-France et la Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Energie (DRIEA et DRIEE 2013) et un deuxième exemple en Aquitaine sur la métropole de Bordeaux par l'Agence Local de l'Energie et du Climat - ALEC33 - (ROSENER et HARROIS 2013) représenté sur la Figure 1-16.

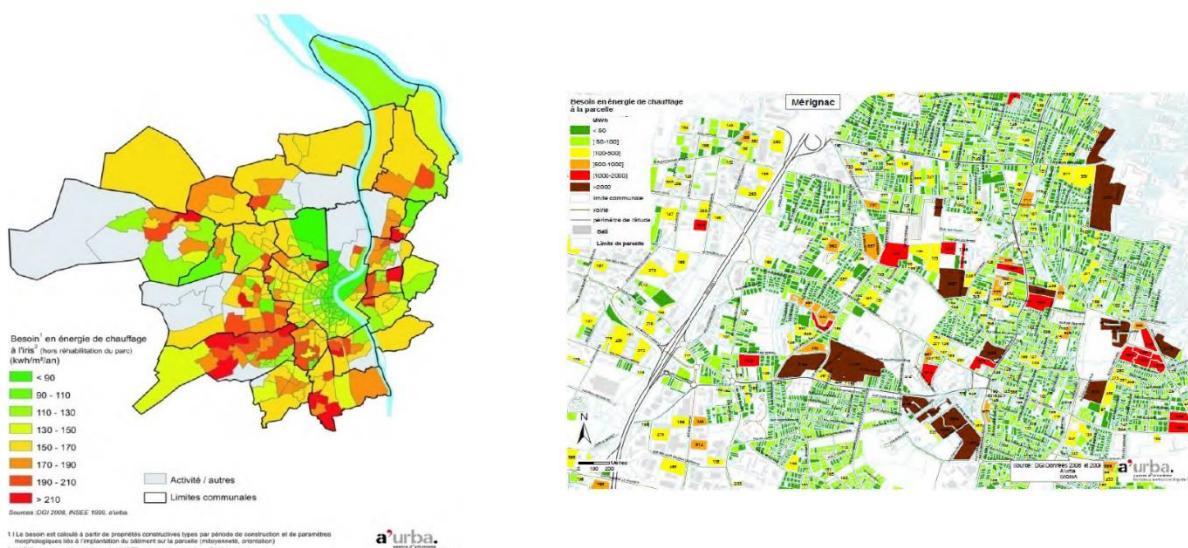


Figure 1-16 Exemples de cartographie issue de SIG pour quantifier et localiser le besoin thermique sur un territoire, ici la métropole de Bordeaux et Mérignac (étude A'Urba (ROSENER et HARROIS 2013) de l'ALEC 33)

De telles études cartographiques sont ensuite classiquement étudiées soit par des approches par simulation (à configuration fixée, en régime dynamique) ou encore avec des méthodes d'optimisation de programmation linéaire (outil de planification énergétique à échelle régionale).

Approches par simulation

(MARGUERITE 2014) a réalisé dans son état de l'art (section 4.2 de son manuscrit) un classement intéressant des objectifs de modélisation des RCU, suivant le choix : de la technologie (une seule ou plusieurs), de la finalité d'utilisation (dimensionnement des installations, planification à long terme ou gestion en temps), de l'horizon temporel, du modèle de simulation ou d'optimisation, de l'approche de modélisation (« boite noire » ou physique), de l'indicateur de performance ou de la fonction objectif (par exemple coût ou émission), etc. Elle cite (WERNSTEDT et DAVIDSSON 2003), qui différencie la modélisation des RCU selon 3 critères : la finalité d'utilisation (dimensionnement ou gestion), la prise en compte du temps (en régime permanent ou dynamique et sur quel pas de temps) et l'échelle spatiale. (MARGUERITE 2014) approfondit dans son état de l'art ce dernier critère. Elle s'intéresse à l'échelle macroscopique (l'échelle dite des systèmes énergétiques où des entités peuvent être

agrégées pour représenter un territoire plus grand) ou à l'échelle des réseaux, sans s'intéresser à l'échelle microscopique (les systèmes eux-mêmes). La grande partie des modèles s'intéressant à l'aide à la conception des réseaux sont des modèles à l'échelles macroscopiques et multi-énergie (par exemple les outils commercialisés TERMIS, sisHYD, MARKAL, EnergyPLAN ou BALMOREL). Néanmoins (CHINESE et MENEGHETTI 2004) soulignent qu'il existe peu de modèles traitant de la conception multi-énergie, alors que l'approche par simulation ou l'optimisation linéaire est adapté pour répondre à cette problématique multi-énergie. Concernant les outils pour le suivi de performance de réseau (configuration et dimensionnement fixé et reposant sur des données de fonctionnement du réseau existant), MODEST et MARTES sont les plus connus.

Un exemple d'approche par simulation pour l'aide à la conception (et au fonctionnement dans un 2^{ème} temps), (BASCIOTTI *et al.* 2011) modélise le réseau d'Altenmarkt en Autriche sous Dymola. Le besoin de chaleur de base est satisfait par une chaudière biomasse, couplée à un cycle de Rankine pour une production simultanée d'électricité et de chaleur. L'appoint est une seconde chaudière biomasse et enfin les besoins de pointe sont couverts par une chaudière gaz classique. Dans un 2^{ème} temps, ils montrent que la stratégie de contrôle permet de réduire les pics d'appel de puissance de l'ordre de 15%, de diminuer les pertes thermiques de 0,3%, de réduire les coûts de l'énergie fossile d'appoint de 2% et enfin de réduire de 20% les émissions de CO₂. Pour avoir un ordre de grandeur, la capacité de stockage thermique dans les canalisations elles-mêmes est d'environ 20 kWh/km.K (pour des diamètres 150 mm), avec comme limite une période stockage - déstockage limitée sur une période d'une heure. Rappelons qu'il est pertinent d'essayer de réduire les pics d'appels de puissance afin de limiter la puissance à installer et donc le coût d'investissement (CETE Ouest 2013).

Deux exemples d'approche par simulation et avec un complément d'optimisation :

- (GUELPA *et al.* 2016) réalisent la modélisation en régime dynamique de grands RCU (800 km et 1 500MW), afin d'aider au management du pompage. Ceci avec 3 objectifs : limiter les coûts de pompage qui peuvent représenter jusqu'à 10% du coût global d'un RCU pour des grands réseaux ou dans le cas des réseaux basse température, d'aider à l'intégration d'énergie renouvelable intermittente et de prévenir les dysfonctionnements (en chaudière, des pompes ou des canalisations). Grâce à un modèle réduit, un gain de temps de calcul de 90% est réalisé, avec une précision satisfaisante par rapport à un modèle CFD classique (écart relatif inférieur à 2%). Cela leur permet de réaliser l'optimisation avec un algorithme génétique. Le temps de calcul de l'optimisation ne représente que 4% du temps de calcul global.
- (PALZER et HENNING 2014) réalisent des simulations annuelles du système énergétique et de la production d'EnR, à un pas de temps d'une heure et à l'échelle d'un pays (l'Allemagne). Ils prennent en compte les programmes de rénovation énergétique de bâtiment. Une identification de meilleur paramètre est réalisée pour minimiser le coût global.

Nous travaillons à l'approvisionnement de chaleur, uniquement, avec une réflexion à long terme. L'échelle spatiale considérée est le quartier ou un îlot de bâtiment (pas un pays ou une région, ni une grande métropole). L'étude de conception est adaptée à la création de nouveau quartier, néanmoins il peut être également intéressant d'étudier le comportement du réseau lors de rénovation énergétique de bâtiment. Nous avons choisi de modéliser les phénomènes de manière physique. L'aide à la conception est basée sur des approches par optimisation (et non sur des simulations) de RCU. Avant de détailler les intérêts d'une approche par optimisation dans la section suivante, réfléchissons à la prise en compte de l'aspect dynamique.

L'ETUDE DU DIMENSIONNEMENT EN REGIME STATIONNAIRE OU DYNAMIQUE ?

En stationnaire

L'étude en régime permanent est un bon premier outil d'aide au dimensionnement. Cela permet d'éviter d'avoir de l'eau trop chaude, ce qui entraîne trop de pertes thermiques. Ou inversement, un régime de température d'eau trop froid, qui nécessite des débits plus importants donc des coûts hydrauliques plus grands.

Il y a beaucoup moins de variables en régime permanent qu'en régime dynamique. En effet, au niveau des sous-stations les vannes gèrent le débit circulant dans le réseau primaire. De plus, le régime permanent suppose des commandes constantes (sur une période), qui ne dépendent pas des fluctuations des conditions extérieures. Ainsi l'hypothèse de régime permanent permet de s'intéresser à des réseaux beaucoup plus complexes : tailles plus importantes, nombre de sous-stations plus important, et surtout introduction de plusieurs chaufferies dans le réseau.

Réaliser une étude en régime permanent permet ainsi d'introduire la possibilité d'optimiser la configuration du réseau. Il s'agit d'un aspect jusqu'alors non considéré, sauf par (WEBER 2008). Ainsi dans nos travaux, l'optimisation de la configuration va être ajoutée à l'optimisation (plus communément réalisée) du dimensionnement.

Étude dynamique

Une étude en régime dynamique permet de prendre en compte les pics d'appel de puissance qui interviennent :

- Le matin et le soir, avec des appels d'ECS et de relance du chauffage.
- En demi-saison, la demande des sous-stations étant alors faible. Il est alors généralement préférable que les chaufferies fonctionnent alternativement à régime nominal, donc à bon rendement, puis qu'elles s'arrêtent. La durée de ces plages de régimes dépend de la capacité de stockage thermique du réseau.
- En période de grand froid.

Positionnement : prétraitement des appels dynamiques, en amont de l'optimisation réalisée en régime permanent

Malgré l'intérêt de l'étude dynamique, l'approche par optimisation est réalisée en régime permanent dans ces travaux de thèse. Néanmoins, afin de considérer les effets de foisonnement et la cohérence entre une puissance nominale et une puissance maximale, respectivement un facteur de simultanéité [Eq 1-1] et un facteur de capacité [Eq 1-2] sont pris en compte.

Le coefficient de simultanéité est très utilisé pour les réseaux de gaz et d'électricité, mais encore très peu pour les réseaux de chaleur. Dans ce manuscrit, aucune étude n'illustre l'avantage de la diversité des usages pour la conception des RCU, ainsi le facteur de simultanéité est pris égal à 1. L'influence de celui-ci est étudiée dans le projet THERMENERGY, avec CHAMAN, un outil de Simulation Thermique Dynamique (STD) interne à NOBATEK. Il ressort que le coefficient de simultanéité peut diminuer jusqu'à 66% lorsque le parc est constitué à moitié de bâtiments résidentiels et pour l'autre moitié de bâtiments administratifs. Dans le cas de réseaux étendus, avec des horaires d'utilisation très différents, ce coefficient peut atteindre 50%. Mais dans le cas de la mixité enseignement/administration, le coefficient minimal est de 98%, car les scénarios de chauffage sont les mêmes.

	$F_{sim} = \frac{\sum_j H_{hxj}}{\sum_{i,k} H_{inst_{i,k}}}$	Eq 1-1
--	--	------------------------

De plus un facteur de capacité [Eq 1-2] est utilisé afin de dimensionner la puissance de l'échangeur en sous-station(H_{hx}), directement corrélé à l'investissement à réaliser, à partir de la puissance moyenne (ou nominale notée H_{req}). Ce facteur dépend de la typologie du bâtiment (résidentielle, administration, enseignement,...) et de son efficacité énergétique (exemple de consommation annuelle de chauffage pour le résidentiel, ancien entre 100-200 kWh/m², rénové vers 50-100 kWh/m² et récent 15-50 kWh/m²). Une étude avec CHAMAN à l'échelle de plusieurs bâtiments a été réalisée par NOBATEK. Pour le climat de Bordeaux, sur le secteur résidentiel indique un facteur de capacité pour le chauffage entre 0,26-0,30 pour l'ancien, 0,14-0,26 en rénovation et 0,05-0,14 pour le récent. Lorsque de l'eau chaude sanitaire est requise (valeur moyenne de consommation 33L/pers.jour), le facteur de capacité augmente de 0,02 dans les bâtiments récents. Et si la consommation d'ECS est moindre (jusqu'à 20L/pers.jour), le coefficient augmente uniquement de 0,01. Le facteur de capacité moyen dans la région Sud-Ouest de la France est de 0,18 pour le chauffage seul et de 0,33 pour l'approvisionnement en chauffage et en eau chaude sanitaire, d'après (FREDERIKSEN et WERNER 2013).

$\forall j \in \{1, n_c\}$	$F_{cap_j} = \frac{H_{req_j}}{H_{hx_j}}$	Eq 1-2
----------------------------	--	------------------------

1.2.4 INTERET DE L'OPTIMISATION ET DEFINITION DES TERMES

OPTIMISATION VERSUS SIMULATION

La simulation correspond à la résolution numérique d'un système d'équations. Le nombre de variables doit correspondre au nombre d'équations, le degré de liberté est nul. Cette approche par la simulation cherche à reproduire le comportement du système, à voir de quelle manière il est susceptible de réagir d'après la physique, puis à utiliser le modèle pour tester des scénarios (via une étude dite de sensibilité). Ce qui peut être utile, car on ne peut pas toujours tester directement sur un procédé l'influence de variation d'une donnée d'entrée sur la réponse pour des raisons de temps d'expérimentation, de coût, de risque ou d'endommagement matériel (IDD 2003).

L'optimisation est la résolution d'une formulation mathématique d'un problème borné sous d'éventuelles contraintes. Ce problème peut admettre une infinité de solutions acceptables. L'optimisation permet de ne sélectionner que la (respectivement les) meilleure solution en fonction de l' (respectivement. les) objectif fixé. Le nombre de variables doit être supérieur au nombre de contraintes saturées pour laisser un degré de liberté strictement positif. Une contrainte saturée est une égalité, ou alors une inégalité, dont la valeur à la solution finale est limitée à la borne (inférieure ou supérieure).

Grâce à la simulation, la prestation des bureaux d'étude est souvent une **démarche d'amélioration** même si souvent le terme d'optimisation est utilisé. C'est une démarche itérative, où peu de solutions sont testées et qui est fortement influencée par l'expérience.

Une telle démarche par l'expertise a de la valeur, le propos n'est pas là, mais les progrès dans l'informatique permettent désormais d'envisager des résolutions de problèmes de plus en plus complexes.

L'optimisation est utile lorsque les **compromis sont nécessaires**. Une approche par simulation ne permet pas de trouver le meilleur équilibre entre le coût d'investissement de la canalisation, des pertes

thermiques et des pertes de charge. Alors que l'optimisation permettra de trouver les valeurs optimales pour les variables de diamètre des canalisations, de la température et de la vitesse de distribution de l'eau dans le réseau primaire.

De plus lorsque de nombreux cas sont à tester, l'approche par simulation a ses limites, l'optimisation combinatoire permet de tester toutes les possibilités. L'explosion combinatoire peut alors poser problème, que les progrès de l'informatique et une formulation judicieuse peuvent contrecarrer.

Nous avons donc choisi d'apporter l'expertise de l'optimisation combinatoire non linéaire pour l'aide à la conception des RCU. Avant de voir l'application de ces méthodes d'optimisation sur les RCU section (1.3), nous proposons une synthèse de la classification des différents problèmes d'optimisation et leurs méthodes de résolution respective.

CARACTERISATION D'UN PROBLEME D'OPTIMISATION ET DEFINITION DES TERMES SPECIFIQUES

Il est important de noter que **la classification est indépendante des méthodes de résolutions**.

Les types de variables et d'équations

La grande différenciation des problèmes concerne le type de variables (BIEGLER et GROSSMANN 2004): sont-elles uniquement discrètes ou mixtes ? Ensuite seulement intervient la linéarité ou non des équations.

Si les variables sont uniquement continues, on distingue :

- Fonction objectif et contraintes linéaires : **LP** linear programming.
- Fonction objectif et/ou contraintes non linéaires : **NLP** non linear programming. On peut spécifier entre autre la sous-catégorie **QP** quadratic programming pour des formulations quadratiques de la fonction objectif et linéaires des contraintes.

Dans le cas le plus général, les variables peuvent être mixtes, c'est-à-dire certaines sont continues et d'autres discrètes. Le terme **d'optimisation combinatoire** est employé lorsque des variables binaires sont présentes. Comme pour les systèmes continus, on différencie les problèmes **MILP** et **MINLP** (dont MIQP) suivant la linéarité ou non de la fonction objectif et des contraintes.

Prise en compte du temps

Tous ces types de problèmes ci-dessus sont des problèmes posés en régime permanent. Dès que la notion de temps est prise en compte, il faut différencier les problèmes suivant le type de la variable du temps :

- Le temps est une variable discontinue. Le terme **d'optimisation multipériode** est employé. La fonction objectif est sommée sur l'ensemble des périodes considérées. La résolution du problème a lieu sur la somme des périodes et non sur chaque période indépendamment. Le caractère dynamique entre les différentes périodes est négligé devant la durée importante des périodes.
- Le temps est une variable continue. On rentre dans le domaine de l'optimisation dynamique de système algebro-différentiel (DAOP differential-algebraic optimization problem). Le plus souvent des équations différentielles rentrent en jeu dans des équations de conservation (de l'énergie, de la quantité de mouvement,...). On parle **d'optimisation dynamique (DO dynamic optimization)** si uniquement des variables continues sont présentes. Si des variables discrètes

interviennent en plus, le problème est alors qualifié de **MIDO** pour mixed Integer Dynamic Optimization.

Ces différents catégories de problèmes, suivant le type de variables, la linéarité et la prise en compte du temps sont synthétisés dans le Tableau 1-3.

Tableau 1-3 Synthèse de la classification des problèmes d'optimisation

Type de variables	Equations (fonction objectif et contraintes) algébriques		Equations différentielles
continue	LP	NLP	DO
mixte	MILP	MINLP	MIDO

Le ou les objectifs

L'objectif est formulé mathématiquement en fonction objectif. Si un seul objectif intervient, on parle d'optimisation mono-objectif, ou même ce terme est omis. Dès lors que plusieurs objectifs interviennent, on rentre dans le domaine de l'optimisation multiobjectif.

La minimisation d'un seul objectif est le cas le plus courant. Principalement par souci de simplicité : plus facile à résoudre, ne fournissant qu'un seul résultat (aspect demandé par les décideurs, sinon une étape d'aide à la décision est nécessaire) et par pragmatisme (souvent le coût global est le critère déterminant).

Traiter une seule fonction objectif (le coût) n'empêche pas de proposer des indicateurs (par exemple sur les gaz à effet de serre ou l'intégration d'EnR&R). Il est tout à fait possible de résoudre le même problème plusieurs fois en minimisant à chaque fois une fonction objectif différente.

Au lieu de résoudre un problème d'optimisation multiobjectif, il est également possible d'ajouter des contraintes à un problème d'optimisation mono-objectif, comme par exemple un taux maximal d'émission de GES ou une part minimale d'EnR&R.

Superstructure

Une superstructure est un schéma regroupant l'ensemble des alternatives structurelles, parmi lesquelles sera sélectionnée la structure optimale. Le résultat de l'optimisation d'un problème combinatoire des variables binaires donne une structure optimale. Les hypothèses réalisées et le positionnement choisi mènent à la superstructure. La superstructure retenue est définie dans la formulation (Chapitre 2). Les structures optimales sont présentées en résultat (Chapitre 4).

Ensemble de définition et domaine de recherche

Les bornes, qui sont des contraintes particulières, spécifient l'ensemble de définition. Le problème est résolu sur un domaine de recherche, qui est défini par l'ensemble des contraintes.

Convexité du problème

Le domaine de recherche est convexe si et seulement si le Hessien du Lagrangien est défini positif. En deux dimensions, une représentation graphique peut être pour tout point A et B du domaine convexe, le segment AB est également entièrement contenu dans ce domaine. Ainsi, un domaine est convexe si les contraintes inégalités sont convexes et les contraintes égalités sont linéaires. Par exemple un parallélépipède est un domaine convexe, mais si celui admet une exclusion creuse au centre il est alors non convexe.

Une fonction f de R dans R est convexe sur l'intervalle $[a,b]$, si et seulement si l'équation [Eq 1-3] est respectée. Ainsi en deux dimensions, quels que soient deux points A et B du graphique de la fonction, le segment AB est entièrement situé au-dessus du graphique. Par exemple, une fonction parabole est convexe.

$\forall t \in]0; 1[$	$f(t \cdot x + (1 - t) \cdot y) \leq t \cdot f(x) + (1 - t) \cdot f(y)$	Eq 1-3
------------------------	---	------------------------

METHODES DE RESOLUTION

Nous distinguerons schématiquement deux grandes familles de méthode de résolution des problèmes d'optimisation :

- Les **méthodes stochastiques** qui utilisent des séquences de nombres aléatoires. Parmi elles, les **métaheuristiques** cherchent à reproduire des phénomènes naturels (Algorithmes Génétiques, Recuit Simulé...) (AUTIN 2006). Elles sont faciles à mettre en œuvre et ne nécessitent pas une connaissance précise de la structure mathématique du modèle (nature des variables, des contraintes...). Cependant, la gestion des contraintes nécessite parfois un temps de calcul très important.
- Les **méthodes déterministes** pour lesquelles le chemin de convergence ne dépend pas d'une séquence aléatoire. Ces méthodes nécessitent une certaine connaissance de la structure du modèle (programmation linéaire, quadratique...) (BIEGLER et GROSSMANN 2004). L'utilisation de règles **heuristiques** permet parfois d'améliorer encore les performances de ces méthodes (en termes de rapidité de convergence notamment).

Aucune méthode ne garantit rigoureusement l'optimum global dans le cas des problèmes non-convexe même si les méthodes stochastiques revendiquent parfois une plus grande probabilité de convergence globale.

Dans nos travaux, nous préférerons une méthode de résolution déterministe, et non une méthode stochastique, pour leur rapidité et la prise en compte des nombreuses contraintes. Mais étant donné qu'il faut connaître les caractéristiques du problème, le choix de la méthode de résolution sera détaillé au début du chapitre sur la résolution (Chapitre 3).

Examinons dans la section suivante les travaux scientifiques d'optimisation appliquée aux RCU.

1.3 ETAT DE L'ART DES TRAVAUX SCIENTIFIQUES D'OPTIMISATION APPLIQUES AUX RCU

Cette section se décompose en trois sous-sections, la première porte sur des problématiques ayant des similitudes fortes avec les RCU, la deuxième se focalise sur les RCU et la dernière porte sur des études dont un des éléments est le RCU.

1.3.1 PROBLEMES SE RAPPROCHANT DES RESEAUX DE CHALEUR

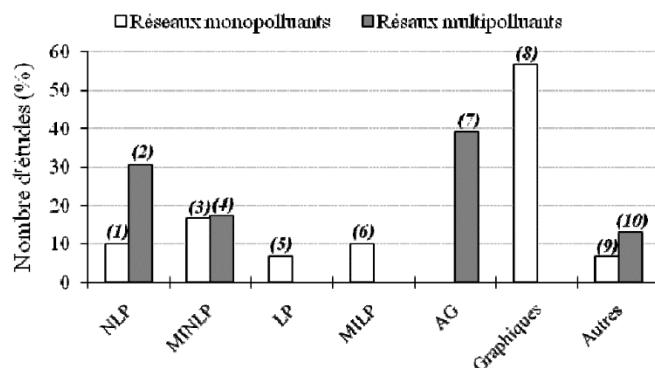
Dans cette section sont présentées des études portant sur des problèmes proches de ceux rencontrés dans les réseaux de chaleur. Ces études concernent les réseaux d'eau industriels, d'échangeurs de chaleur, de froid et d'électricité. De plus, comme les méthodes d'optimisation ont vu leur essor avec les applications dans le domaine industriel, quelques exemples emblématiques sont également rapportés.

RESEAU D'EAU INDUSTRIEL

La problématique principale d'un réseau d'eau industriel est d'éviter le gaspillage de la ressource en eau et aussi d'assurer la gestion de sa pollution. Dans sa thèse (BOIX 2011) traite de l'optimisation multiobjectif appliquée aux réseaux d'eau polluée. La Figure 1-17 permet de sortir deux grandes tendances :

- Les réseaux d'eau ne contenant qu'un seul polluant ont été très largement étudiés à l'aide de techniques graphiques incluant notamment la technique du pincement. Toutefois, des approches de programmation mathématique sont également utilisées pour étudier ce type de réseau avec une prédominance des formulations linéaires.
- Les études de réseaux multipolluants, qui sont principalement réalisées selon deux principales approches : la programmation mathématique non linéaire et les algorithmes génétiques.

(BOIX 2011) n'a pas choisi de méthode de résolution stochastique du fait du grand nombre de contraintes égalités. Elle résout pour un réseau d'eau une optimisation multiobjectif basée sur une stratégie ε-contrainte pour passer d'une formulation multiobjectif à une formulation mono-objectif. Cette stratégie est codée sous GAMS en faisant appel à des solveurs existants. Lorsque plusieurs polluants sont présents dans le réseau d'eau, le problème est de type MINLP. Si un seul polluant est présent, alors le problème obtenu est simplement MILP.



[Figure 1-17 Répartition de la résolution des problèmes sur les réseaux d'eau mono ou multi-polluants \(BOIX 2011\)](#)

D'après le besoin exprimé par les industriels s'intéressant à l'écologie industrielle, (BOIX *et al.* 2012) ont été amenés à travailler sur l'optimisation simultanée de réseau d'eau et de chaleur. Outre le fait d'ajouter en entrée supplémentaire la température ainsi que des nouvelles équations sur les bilans thermiques, le problème n'en est pas fondamentalement modifié. Tous les bilans de masse et de débits sont conservés. Un modèle de réseau d'eau comporte, en plus d'un modèle de RCU, une donnée sur la concentration de(s) polluant(s) et donc, des contraintes supplémentaires dans les bilans. Une review récente (AHMETOVIC *et al.* 2015) permet de comparer les différentes intégrations eau et énergie dans les réseaux d'eau, aussi bien avec une méthode d'intégration énergétique (comme la méthode du pincement) qu'avec des méthodes d'optimisation mathématiques.

RESEAU D'ECHANGEURS DE CHALEUR

Les réseaux d'échangeurs de chaleur, en anglais Heat Exchanger Network (HEN), représentent un thème de recherche davantage étudié que l'optimisation des RCU. En effet, des efforts de recherche ont été motivés par les industriels au vu des économies réalisables. D'ailleurs respectivement (BOIX 2011) et (SODERMAN 2007) appliquent leurs expertises d'optimisation aussi bien sur des HEN que sur des réseaux d'eau ou des réseaux de distribution d'énergie (incluant électricité, chaleur et froid) abrégés DES pour Distributed Energy System.

Par définition, un RCU échange de la chaleur en sous-station, entre le circuit primaire et un circuit secondaire. Cet échange peut se faire soit par un collecteur et éventuellement une bouteille casse-pression (ancien réseau uniquement), soit par un échangeur de chaleur (HX, heat exchanger en anglais). Les échangeurs de chaleur sont donc inclus dans le travail de modélisation des RCU.

Historiquement, comme le soulignent (THIBAULT *et al.* 2015) dans leur introduction, les méthodes classiques d'intégration énergétique (méthode par pincement ou les courbes composites) permettent de mettre en évidence le potentiel de récupération (via des réseaux d'échangeur de chaleur) d'énergie entre des flux chauds et d'autres froids. Mais ces méthodes arrivent à leurs limites en nombre de fluides à étudier ainsi que le fait de travailler sur une période donnée. Ils proposent de compléter ces méthodes avec des méthodes d'optimisation MILP cherchant à minimiser l'exergie. Dans la continuité (FARHAT *et al.* 2015) réfléchissent à l'intégration énergétique à l'échelle d'un site complet. (SALAME et ZOUGHAIB 2014) mènent en parallèle des travaux pour la conception multipériode de RCU, avec stockage thermique, en résolvant un problème MILP qui minimise la consommation d'exergie.

Un problème d'optimisation sur les HEN nécessite la présence de variables continues et discrètes (pour l'existence ou non des échangeurs). Dans les travaux récents, le problème formulé est la plupart du temps de type MINLP. Pour une analyse plus complète, se référer à l'état de l'art de (SODERMAN 2013). L'objectif classique est de déterminer le réseau d'échangeurs de chaleur qui minimise le coût global tout en satisfaisant aux contraintes de températures d'entrée et de sortie imposées. On entend par coût global, le coût d'investissement des différents échangeurs du réseau, mais également le coût éventuel des utilités chaudes ou froides permettant de satisfaire aux exigences de température.

(PETTERSSON et SODERMAN 2007) cherchent à récupérer la chaleur sur une usine de production de papier. Le problème est de type MINLP du fait de termes non linéaires introduits par la prise en compte d'échanges d'énergie latente. Le choix de résolution s'est tourné sur la combinaison d'un algorithme génétique (évaluation des coûts d'investissement relatifs à la configuration du réseau) et d'une méthode déterministe (SQP) pour résoudre le sous-problème NLP (évaluation des coûts de fonctionnement).

Des travaux existent également dans le domaine de l'optimisation des échangeurs de chaleur en eux-mêmes, par exemple sur les échangeurs à plaques (RENEAUME et NICLOUT 2003) ou les échangeurs à calandre (ALLEN 2010). Le nombre de résultats à une recherche de publications comportant les mots « optimization » et « heat exchanger » dans le titre, abstract ou mot-clé est impressionnant (plus de 30 000 résultats, avec un regain d'intérêt depuis 2009 avec plus de 1 000 publications par an, ou 1700 si les 3 termes sont liés). La même recherche « optimization », mais sur « district heating » ne propose « que » 9 100 publications (290 si les 3 termes sont liés), avec depuis 2012 plus de 500 publications par an.

RESEAU DE FROID

En anglais, on parle plutôt de réseau de chaleur et de froid, abrégé DHC pour District Heating and Cooling. Ceci est justifié, car la thématique est fortement similaire à celle du réseau de chaleur : favoriser l'installation collective à une multitude d'installations individuelles, placer les sites de

production par rapport aux consommateurs, déterminer si un stockage est nécessaire, définir comment relier les sites entre eux... Pourtant il a été choisi de lui accorder une place particulière. En effet, des nuances existent : les sites de production diffèrent par leur technologie (PAC, compresseur, machine à absorption,...), les régimes de températures sont différents, parfois d'autres fluides que l'eau sont étudiés comme le CO₂ ou le coulis de glace, et la demande de réseau de froid est relativement récente.

(SODERMAN 2013) a transposé son travail sur les réseaux de chaleur pour ne se focaliser que sur l'approvisionnement en froid. Néanmoins, la synergie entre le chaud et le froid est intéressante à exploiter. La complémentarité des usages à la mi-saison peut être valorisée : alors que les bâtiments résidentiels ont encore besoin de chauffage le matin ou le soir, les bureaux peuvent avoir besoin de rafraîchissement dans l'après-midi. Il est également possible de récupérer la chaleur sur les compresseurs des groupes froids. Ceci est d'autant plus intéressant pour les data centers où un besoin en rafraîchissement est conséquent.

Une nouvelle perspective, soulignée par (HENCHOZ *et al.* 2015), serait l'utilisation de CO₂ au lieu de l'eau comme fluide caloporteur. En effet, ceci permet le couplage des réseaux de chaud et de froid pour n'avoir que 2 canalisations au lieu de 4. Un brevet a été déposé. L'idée est venue du cas d'application du réseau de chaleur à Genève, où une contrainte spatiale dans les tranchées imposait des diamètres inférieurs à DN60 ou DN40, soit bien inférieurs au DN150 ou DN200 classique. Le fait d'utiliser comme fluide le CO₂ permet d'exploiter la chaleur latente lors de ses changements d'état et d'utiliser une gamme de température exigée plus large. Ainsi, il est envisagé de n'employer qu'une ligne d'approvisionnement aller et une ligne retour. Si la somme des besoins en chaleur dépasse ceux en rafraîchissement, la ligne d'approvisionnement est à l'état gazeux et l'évaporation du CO₂ a lieu dans les centrales. La canalisation retour est à l'état liquide. Au contraire, si les besoins en rafraîchissement sont supérieurs aux besoins de chaleur, la ligne d'approvisionnement aller est à l'état liquide. Dans ce cas, le CO₂ est condensé dans les centrales avant d'être acheminé aux consommateurs.

RESEAU D'ELECTRICITE

Qui n'a pas entendu parler de smartgrid ? En France toutefois, ce terme de réseau intelligent est à ce jour essentiellement réservé aux réseaux électriques.

Les réseaux d'électricité jouissent d'une expérience plus grande comme le souligne la review sur les réseaux de chaleur et de froid (REZIAIE et ROSEN 2012), car ils sont historiquement bien plus développés en France que les réseaux de chaleur. La conception des réseaux en termes de configuration s'est posée : existence ou non d'un transformateur ou d'un site de production à un endroit particulier, manière de relier les consommateurs aux sites de production, solutions pour limiter les pertes en ligne ...

(DESPRES *et al.* 2015) est une review sur les outils numériques pour modéliser les EnR intermittentes. Leur outil développé en interne (POLES et PRIMES) est positionné par rapport à la logique d'autres modèles (énergie considérée, simulation et/ou optimisation), aux caractéristiques temporelles (pas de temps et horizon temporel) et à la définition du système (système énergétique ou intérêt financeur, dépense de fonctionnement ou investissement). (DESPRES *et al.* 2016) travaillent à l'optimisation d'allocation des moyens de production et de stockage pour répondre à la demande électrique française. L'enjeu est d'essayer d'intégrer l'intermittence des énergies renouvelables dans le mix énergétique français. Le choix de la résolution s'est porté sur la plateforme d'optimisation GAMS avec les solveurs CPLEX pour résoudre le problème « simplifié » MIQP et le solveur académique gratuit SCIP pour le problème MINLP. Le temps de résolution est de l'ordre de la minute. La plus grande difficulté

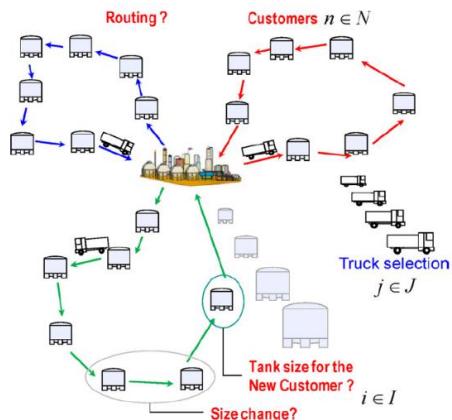
réside sur la mise en relation des langages scientifiques (vocabulaire et univers de programmation), des milieux techniques et économiques et des pas de temps de calcul différents.

Le livre (ROBOAM 2012) traite de l'optimisation du dimensionnement des réseaux électriques en général. Un chapitre (SANDOU *et al.* 2012) est focalisé sur le management optimal à court terme (quelques heures à 7 jours) des réseaux d'énergie. Différentes approches de résolution sont testées pour résoudre le problème MIQP: programmation dynamique (difficulté liée à l'explosion combinatoire) et algorithme génétique (beaucoup de temps de calcul et surtout qui nécessite une validation statistique des paramètres). Un travail supplémentaire d'optimisation sous incertitude (de la demande et des prix de production) et de contrôle prédictif complète ces travaux. La formulation MIQP est plutôt axée d'un point de vue de production que d'un point de vue réseau, c'est-à-dire qu'il s'intéresse à l'allocation des moyens de production dispatchable (en anglais « Unit commitment »). Aucune considération sur le tracé du réseau n'est étudiée. Ceci est d'autant plus cohérent que pour l'électricité, à la différence de la chaleur, il n'y a pas de délai de propagation à introduire. Aucune perte en ligne n'est considérée. La comparaison de formulation avec notre travail est intéressante. Les variables binaires sont ici des variables de fonctionnement de l'unité de production (on/off) et non des variables d'existence ou non-existence. Avec ces variables, il est possible d'introduire des contraintes de temps d'arrêt et de mise en marche minimum (afin d'éviter les arrêts intempestifs). La fonction objectif est la minimisation des coûts opérationnels auxquels sont ajoutés les coûts de mise en marche/arrêt. Finalement, ils ont choisi de simplifier le problème MIQP en MILP.

PROCEDES

C'est le domaine d'application historique qui a permis le développement des méthodes de résolution de problèmes combinatoires dans les années 1990. Aucun travail ne va être explicité en détail, en raison du nombre de références et du fait de l'existence d'excellentes reviews dans le domaine. Les réseaux d'échangeur de chaleur ont été traités à part du fait de leur grande similitude avec l'optimisation des RCU.

On citera entre autres (MENDEZ *et al.* 2006) pour la review sur l'optimisation de l'ordonnancement à court terme des procédés batch, (KALLRATH 2002) pour le résumé de 20 ans de travaux portant sur l'optimisation du planning et de l'ordonnancement de l'industrie chimique ou encore (GROSSMANN 2012) pour les avancées dans le domaine de l'optimisation appliquée au domaine de l'entreprise planification à long terme, ordonnancement à court terme, optimisation en temps réel et contrôle). Dans cette dernière review, 5 exemples illustrent les impacts des récentes améliorations dans le domaine de l'optimisation (ex. 1 - modèle non linéaire pour la production des raffineries, ex. 2 - optimisation simultanée de la production et de la distribution de biens industriels aussi bien au long terme qu'à court terme, ex. 3 – optimisation de la distribution de gaz (Figure 1-18), ex. 4 - sur le dimensionnement et planification plateforme pétrolière et ex. 5 – gestion de chaîne logistique).



[Figure 1-18 Optimisation de la distribution de gaz, illustration \(GROSSMANN 2012\)](#)
[exemple par \(YOU et al. 2011\)](#)

Quelques travaux sont néanmoins relevés pour l'intérêt des méthodes (ou couplage de méthodes) particulièrement innovantes. L'optimisation appliquée aux RCU laisse entrevoir de belles perspectives. Entre autres :

- Méthodologie pour l'intégration du dimensionnement et du contrôle optimal d'un procédé de distillation réactive (MONTEALEGRE 2005).
- Formulation MINLP pour optimiser le dimensionnement d'une colonne à distillation catalytique avec une stratégie de résolution couplant une méthode déterministe (SQP) et une méthode stochastique de recuit simulé (GOMEZ *et al.* 2006).
- Ordonnancement de production résolu par GBD, avec la comparaison par résolution OA pour sa rapidité, tout en portant une attention particulière afin de respecter les conditions d'optimalité (SAHINIDIS et GROSSMANN 1991).
- Optimisation MINLP multipériode pour la planification long terme d'une plateforme de gaz et de pétrole (GUPTA et GROSSMANN 2012).

1.3.2 LES 3 FINALITES DES PROBLEMES D'OPTIMISATION DES RCU

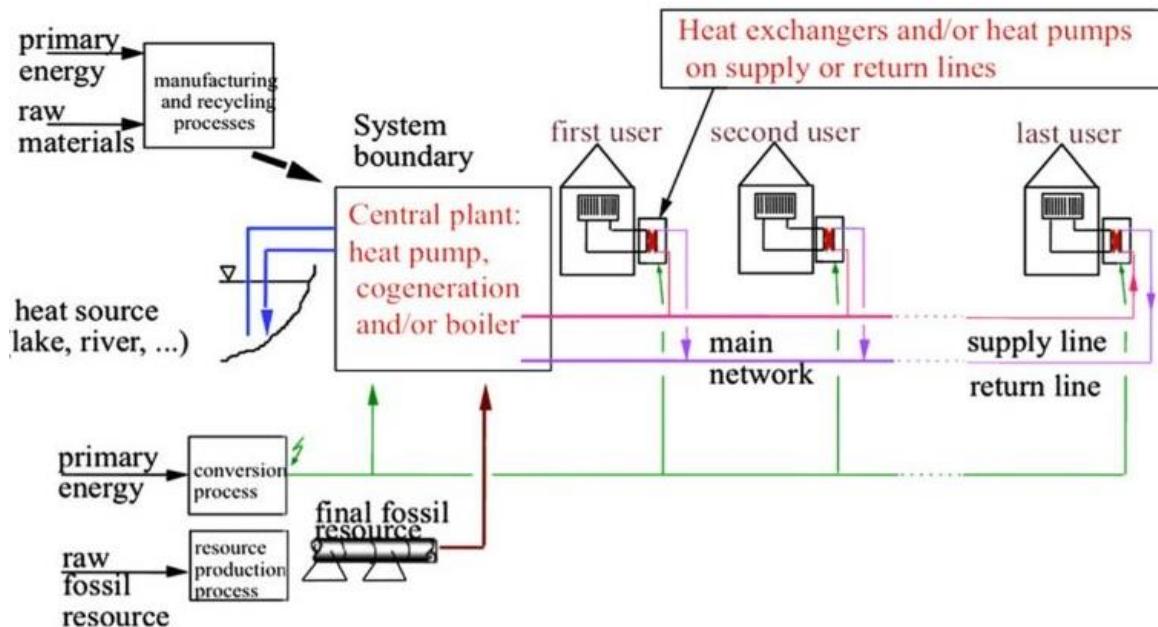
Concernant les travaux d'optimisation appliqués au domaine des RCU, comme l'aide à la conception avec une approche par simulation, trois finalités principales sont identifiées : l'optimisation de la configuration (maillage du réseau, localisation et type de technologie de production, ...), l'optimisation du dimensionnement (température, vitesse, diamètre et puissance,...) et enfin l'optimisation de la gestion.

OPTIMISATION DE LA CONFIGURATION

Cette finalité de l'optimisation intervient dans les étapes de conception amont : pour la création de nouveau réseau ou lors de l'extension d'ancien réseau. Ces résultats optimaux permettent d'aider aux choix des technologies et de la structure du réseau.

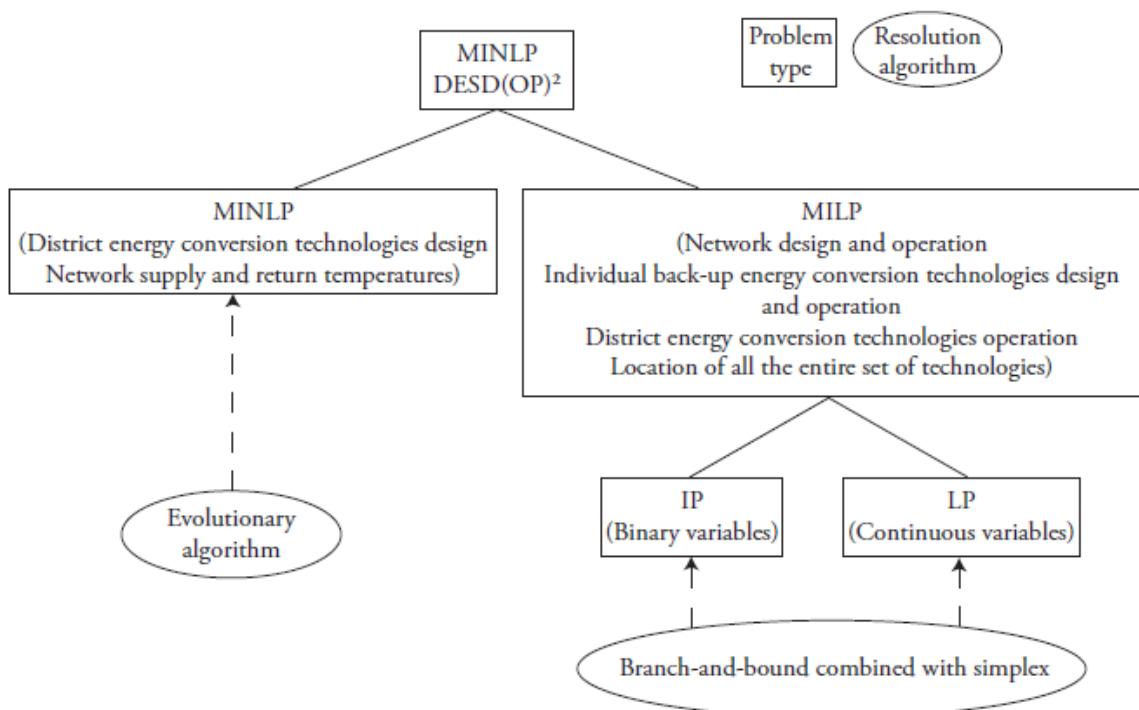
Les travaux détaillés dans cette partie traitent forcément du choix de la configuration. Parfois, ils incluent un travail de dimensionnement (débit ou puissance). Le lecteur ne doit pas s'en étonner, mais par choix ils n'ont pas été explicités dans chaque section. En effet, par exemple le choix du stockage (centralisé long terme en chaufferie ou décentralisés en sous-station) est un choix de configuration, qui est également lié à son dimensionnement.

Les travaux de thèse de (CURTI 1998) tiennent compte de différents régimes de température dans un outil de simulation sous fortran. Ce travail voit l'ajout des compétences de l'optimisation multiobjectif avec (LEYLAND 2002) et (MOLYNEAUX 2002). Désormais, il permet grâce à une méthode de clustering (« Clustering Pareto Evolutionary Algorithm CEPA ») de minimiser l'impact sur l'environnement (émission de GES) du coût global du réseau, mais ceci au prix d'un temps de calcul important. (MOLYNEAUX *et al.* 2010) présentent les avancés des précédents travaux appliqués au RCU. Ils étudient la superstructure (Figure 1-19) en chaufferie (PAC, cogénération turbine à gaz ou chaudière gaz classique) et en sous-station (PAC sur le circuit aller et/ou retour) sans remettre en question la structure globale du réseau de distribution. C'est-à-dire que les centrales, les sous-stations et les liaisons existent. Ils laissent le choix des technologies de production.



[Figure 1-19: Superstructure autorisée \(MOLYNEAUX et al. 2010\)](#)

La thèse de (WEBER 2008) développe la dimension multi service en répondant à l'approvisionnement en chaleur, en froid et en électricité. Auparavant l'approvisionnement en froid n'était pas étudié simultanément. De plus, (WEBER 2008) ajoute la décomposition du problème d'optimisation en différenciant bien l'optimisation de la configuration du réseau et son dimensionnement. Ce travail permet d'exploiter la structure mathématique du problème. WEBER a choisi de décomposer le problème (Figure 1-20), non pas selon le type de variable, mais selon la linéarité des équations.



[Figure 1-20 Décomposition suivant la linéarité ou non du problème selon \(WEBER 2008\)](#)

Plus récemment, (FAZLOLLAHI *et al.* 2012) développent une résolution combinant l' ϵ -contrainte et la méthode MILP *cutting plane* pour résoudre le problème multiobjectif. De plus (FAZLOLLAHI *et al.* 2014) proposent un algorithme de clustering afin de sélectionner des données d'entrée réduites pertinentes : le profil d'appel dynamique de puissance sur une année est réduit à 7 puissances caractéristiques sur 34 périodes. Ils automatisent également l'analyse des résultats (post processing phase).

(SODERMAN 2007) a rédigé sa thèse sur l'optimisation des réseaux de distribution d'énergie (Decentralised or Distributed Energy Systems DES), c'est-à-dire une optimisation incluant l'approvisionnement de chaleur, de froid et d'électricité (Figure 1-21). Dans ces applications, SODERMAN aboutit à une formulation d'un problème MILP multipériode (8 périodes caractéristiques : jour/nuit sur les 4 saisons). Le stockage est pris en compte (stockage la journée et déstockage la nuit). L'objectif est de minimiser le coût global. Un algorithme Branch and Bound a été choisi pour la résolution. En raison de la complexité du problème traité (multipériode et multiénergie), les éléments suivants ne sont pas pris en compte : les pertes thermiques, différentes technologies de production et les régimes de température. Dans ces travaux, fortement impliqués dans l'optimisation de la configuration, il n'y a pas d'aspect de dimensionnement réalisé (la puissance est la seule variable, pas de température ou de débit spécifiés). Dans la continuité, (HAIKARAINEN *et al.* 2014) apportent entre autres une valeur ajoutée sur l'aide au dimensionnement, notamment en ajoutant des contraintes sur la vitesse afin de limiter les pertes de charge, ainsi qu'une estimation du volume de stockage et en réfléchissant à différentes sources d'énergie. Le modèle multipériode de DES est toujours linéarisé afin d'assurer la convergence et de contenir un temps de calcul rapide (2 à 30 min environ, sous Matlab en appelant le solveur CPLEX pour un problème avec 600 variables binaires et 6300 variables continues pour 26 consommateurs, 8 lieux potentiels de stockage).

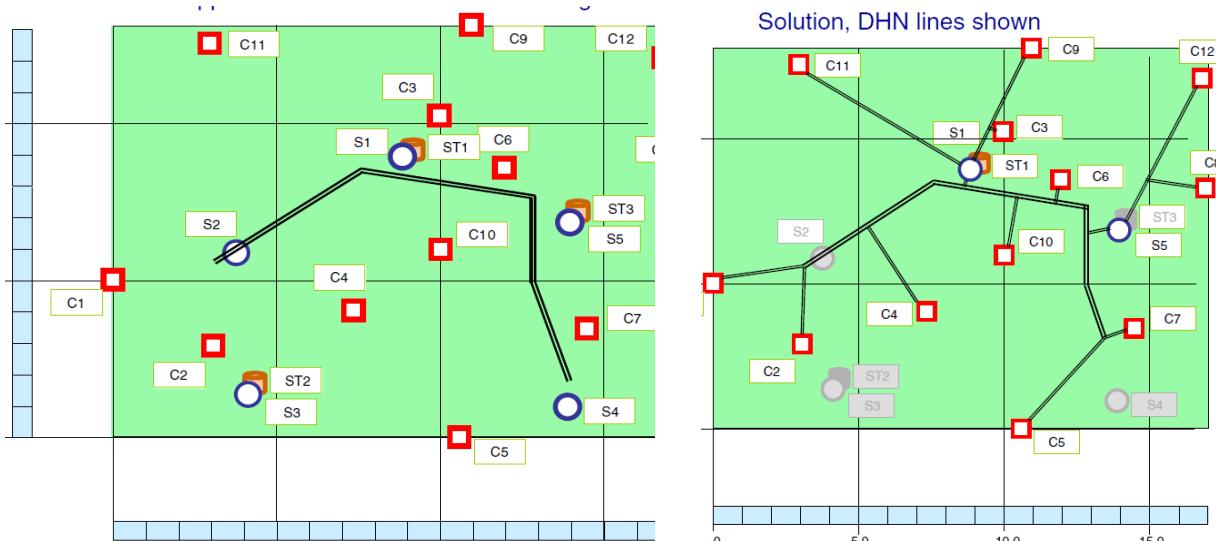


Figure 1-21 Représentation spatiale (à gauche) des sites consommation (C) ainsi que des sites potentiels producteurs (S supply) et de stockage (ST storage). La représentation du réseau (à droite) (SODERMAN et PETTERSSON 2006)

Comme constaté, le coût global est la fonction objectif classiquement utilisée. Mais d'autres fonctions objectifs pourraient être utilisées. Par exemple, comme cité précédemment, certains travaux cherchent à minimiser les émissions de GES. Ou encore il pourrait être choisi de maximiser l'intégration d'EnR&R, par exemple (OMU *et al.* 2013) maximisent la part de fraction solaire (% énergie solaire sur l'ensemble de l'énergie livrée) dans le mix énergétique. (OMU *et al.* 2013) résolvent un problème MILP avec le solveur CPLEX afin d'aider à la conception et au dimensionnement d'un stockage thermique, centralisé, décentralisé, ou encore selon un compromis entre les deux. Deux grandes conclusions ressortent : premièrement le stockage thermique est nécessaire si l'objectif est de dépasser une

fraction solaire de 10%, deuxièmement, pour atteindre plus de 60% il est nécessaire d'avoir un compromis entre un stockage décentralisé court terme et un stockage centralisé long terme.

Enfin, les méthodes d'optimisation employées peuvent varier. Différentes méthodes ont été énumérées précédemment :

- de l'utilisation de méthode stochastique, par exemple (MOLYNEAUX 2002) ;
- aux méthodes déterministes - par exemple (OMU *et al.* 2015) ;
- voire à un couplage entre les deux - (PETTERSSON et SODERMAN 2007) ou (WEBER 2008) dans sa thèse.

Certains travaux comparent même la performance de différentes méthodes de résolution. (HOHMANN *et al.* 2015) résolvent un problème MILP pour le choix et le dimensionnement d'un réseau d'énergie multipériode, sur un mois avec un pas de temps d'une heure. Ils traitent 2 fonctions objectifs (sur la valeur actuelle nette et les émissions de GES). Ils ont constaté que la résolution par une méthode déterministe avec le solveur CPLEX aboutit à un meilleur front de Pareto et ceci plus rapidement (2,15 contre 28 heures) qu'un algorithme génétique NGSA-II.

OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT

Différentes dénominations sont parfois utilisées dans la littérature : **optimisation des paramètres, de dimensionnement ou de design**. Elles sont réalisées en régime permanent (une seule période caractéristique, donc c'est le fonctionnement nominal qui est optimisé) ou alors en multipériode (exemple, jour/nuit décliné sur 4 saisons).

Rappelons que dans nos travaux, **l'optimisation de la configuration et du dimensionnement, sont effectués simultanément lors de la résolution (en régime permanent)**. Néanmoins, il a été choisi de bien scinder ces 2 finalités de l'optimisation des réseaux dans l'état de l'art, car elles ne sont habituellement étudiées que de manière incomplète, l'optimisation de la configuration étant même souvent omise.

Notons bien que dans la première partie concernant l'optimisation de la configuration d'un réseau, l'optimisation du dimensionnement a certaines fois été prise en compte de manière partielle, notamment sur les débits. C'est en effet le moyen le plus commun pour réguler la puissance livrée en sous-station. La régulation en température à la sortie de centrale se fait également. Mais celle-ci est plutôt réservée pour une aide à la gestion sur des échelles temporelles plus longue (minimum une semaine, voire le mois) que pour le débit (au quart d'heure près).

Les grands enjeux actuels en termes de dimensionnement sont les suivants :

- Passage aux réseaux basse température : un besoin d'optimisation est nécessaire pour trouver l'optimum entre la minimisation des pertes thermiques et la minimisation du coût de pompage (CETE Ouest 2012b).
- Diminution du diamètre des canalisations : il existe des travaux entièrement focalisés sur cet aspect. Mais souvent la structure du réseau (c'est-à-dire comment sont reliés les nœuds producteurs et consommateurs entre eux) est renseignée en données d'entrée et est donc fixée, par exemple le logiciel allemand STEFaN, basé sur un System d'Information Géographique (SIG) (GNUCHTEL et GROSS 2010). Au contraire les travaux, comme (WEBER 2008) ou (RAMOS BERMUDEZ 2007), travaillant à optimiser le tracé du réseau et le dimensionnement en diamètre sont beaucoup plus rares.
- Réduction de la puissance installée (autrement qu'en diminuant la température cf 1^{er} tiret) : désormais la mixité d'usage est valorisée, l'effet de foisonnement est donc pris en compte

dans le dimensionnement des réseaux de chaleur, alors que ce phénomène n'était considéré classiquement que pour les réseaux de gaz et d'électricité.

L'étude dynamique d'un RCU est à présent courante, mais impose la limite de travailler à configuration fixée. L'AIE a d'ailleurs lancé un groupe de travail sur cette thématique. D'une manière précise pour un réseau à structure fixée, (BENONYSSON *et al.* 1995) avaient résolu un problème NLP avec le solveur MINOS de GAMS. Ils indiquent 3 pistes pour réduire les coûts de fonctionnement : premièrement le stockage éventuel avec une température de sortie de chaufferie constante ou pré-déterminée, deuxièmement un stockage dans le réseau lui-même avec une température de sortie de chaudière dynamique optimisée et enfin une optimisation simultanée en dynamique de la réduction des pics d'appels de puissance et de la température de sortie de chaudière. Dans (BOHM *et al.* 2002) il est testé de simplifier la structure du réseau, ce qui permet des gains de temps de 80 à 95%, ainsi que de réduire des erreurs sur des modèles compliqués. Les modèles d'agrégation de réseaux danois et allemand confirment ces gains de temps de calcul. Ceci permet d'envisager la gestion du stockage de façon dynamique (WIGBELS *et al.* 2005).

OPTIMISATION DE LA GESTION

Une fois que les optimisations de la configuration du réseau et de son dimensionnement sont réalisées, il est intéressant et souhaité par l'opérateur de réseau de s'intéresser de plus près à sa gestion. Les variables précédentes (dans l'optimisation du dimensionnement) sont désormais optimisées en temps réel voir en anticipation.

Régulièrement l'aide à la gestion des réseaux de chaleur est portée par des travaux de simulation. Comme traité dans la définition des termes (section 1.2.3), le terme d'optimisation est spécifique à une approche mathématique pour trouver un minimum à une fonction soumise à d'éventuelles contraintes, nous préférons utiliser alors le terme d' « amélioration » grâce à l'expérience d'un expert et de l'usage de la simulation.

Le problème de la prise en compte du temps dans un problème d'optimisation, en plus d'un problème à grande échelle spatiale, est l'explosion de la taille des problèmes à résoudre. (AKESSON *et al.* 2010) proposent de modéliser et d'optimiser avec Optimica and JModelica les problèmes dynamiques de grande taille. Ces outils permettent de développer des modèles prédictifs de contrôle.

Quelques exemples de **travaux de modélisation complétés par des méthodes d'optimisation**. (BASCIOTTI et POL 2013) résolvent un problème NLP (à configuration fixée) avec la toolbox d'optimisation sous Matlab. Lorsque le besoin n'est pas satisfait, la différence transite par le système de stockage. Notons bien que la structure du réseau est fixée. Tout comme dans les travaux (MARGUERITE *et al.* 2013) où un problème de programmation linéaire est résolu. Le problème est LP, car le débit est variable et la température fixée (l'option inverse pouvant être choisie également). (HOLMGREN et GEBREMEDHIN 2004) réalisent une optimisation LP pour aider à la planification de la construction d'une usine d'incinération d'ordure ménagère (UIOM) et pour relier au RCU un gros consommateur industriel.

Les fonctions objectifs considérées sur de tels problèmes se résument souvent à l'amélioration du taux de couverture à partir d'EnR&R, comme (EYNARD 2010) ou (NOU 2011) détaillés ci-dessous. Ceci correspond à une **stratégie de contrôle pour favoriser dès que possible la production à partir d'énergie renouvelable ou de récupération**. Le contrôle de la gestion permet également de réduire le coût de pompage qui peut atteindre jusqu'à 10% des dépenses d'un réseau basse température

(GUELPA *et al.* 2016). Nous avons également trouvé des travaux maximisant le confort (ou en réduisant l'écart entre la température de la pièce avec la consigne), minimisant le recours aux chaudières d'appoint. En comparaison, l'optimisation de la gestion d'un réseau électrique a pour objectifs d'éviter à tout prix les blacks out, en minimisant les écarts de tensions, les variations de fréquences...Une optimisation dynamique du réseau permet de construire des lois de contrôle qui a priori ne sont pas intuitives et permet d'établir les gains réalisés par rapport à des lois de contrôle plus simples et plus intuitives (LIDIN 1986). Deux exemples supplémentaires de contrôle-commande pour la gestion du mix énergétique, en fonction de l'EnR&R principale :

- Biomasse : (EYNARD 2010) met en place dans sa thèse une stratégie de contrôle pour la gestion d'une chaudière bois pour répondre au besoin de base avec en appont une chaudière gaz-fioul et une cogénération gaz.
- Géothermie : (NOU 2011) a travaillé dans sa thèse sur l'optimisation énergétique du taux de couverture avec l'étude d'un couplage solaire, géothermie et de stockage. Il indique clairement que l'amélioration du taux de couverture des EnR&R passe par le développement de contrôleurs. Il introduit des techniques de l'intelligence artificielle telles que la logique floue et le neuroflou, car en règle générale, il est difficile de disposer en temps réel de toutes les variables nécessaires à l'élaboration d'une stratégie optimale de contrôle.

Nous ne détaillons pas plus les aspects d'aide à la gestion, car cela ne correspond pas au positionnement des travaux de thèse.

1.3.3 OPTIMISATION DE PROBLEMES INCLUANT DES RCU

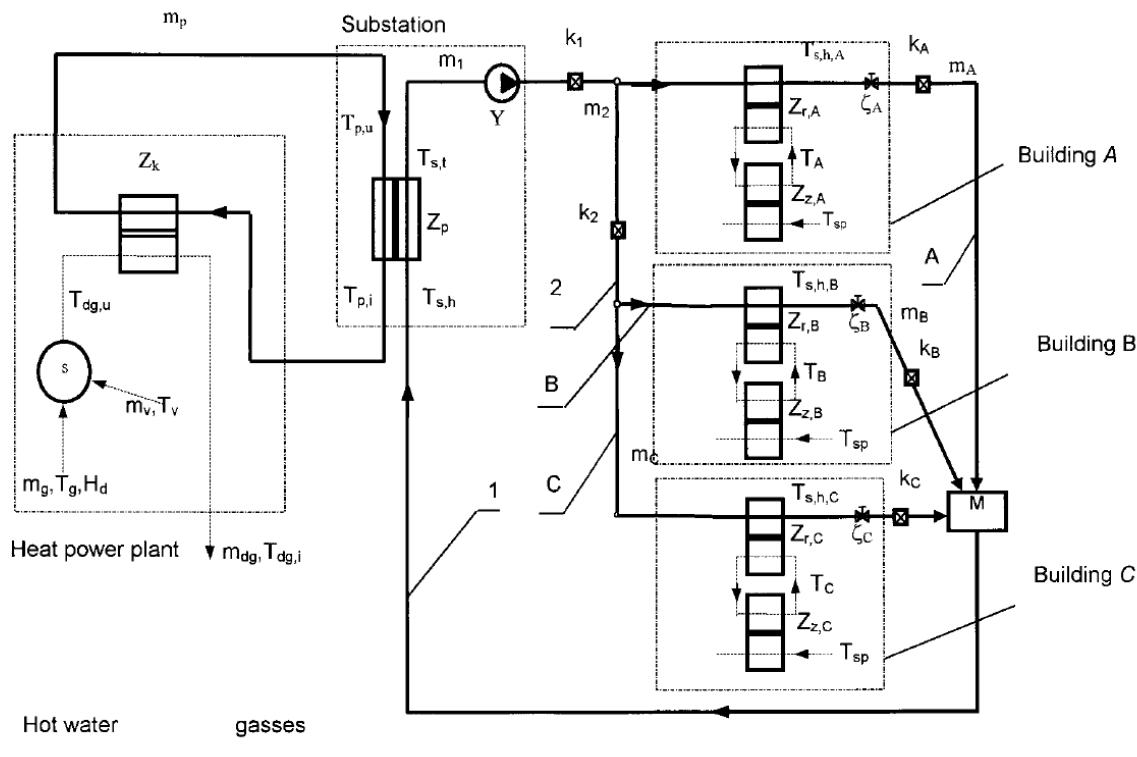
Outre ces 3 finalités, il est également possible d'optimiser le RCU avec un périmètre d'étude plus large.

OPTIMISATION DES RCU ET DES BATIMENTS

(BOJIC *et al.* 2000) étudient seulement le cas de réseaux existants (Figure 1-22), aussi bien sur leur gestion (en ajustant les débits) que sur leur rénovation. C'est un problème d'optimisation MILP cherchant la combinaison optimale entre les résistances hydrauliques des vannes existantes, le positionnement de nouvelles pompes et le dimensionnement des échangeurs dans les sous-stations. La fonction objectif, atypique (c'est la seule référence trouvée), cherche à minimiser la différence de température entre la consigne et la température opérationnelle. Et deuxième particularité de ce travail, l'ensemble du réseau (primaire et secondaire) est modélisé, en allant de la chaufferie aux radiateurs.

L'optimisation d'un si grand système (depuis le réseau primaire jusqu'au bâtiment) semble intéressante pour avoir une vision globale. Mais le fait de devoir faire autant d'hypothèses sur les résistances thermiques rend les résultats moins valorisables en pratique.

Ainsi **notre positionnement est de travailler à l'optimisation du réseau primaire uniquement**. Ce choix est réalisé par toute la communauté scientifique. Et afin de tenir compte des appels thermiques du bâtiment, nous réalisons des simulations thermiques à l'échelle de plusieurs bâtiments simultanément, avec l'outil CHAMAN (Cooling/Heating Assessment Model for the Anticipation of Energy Needs) développé par NOBATEK (HENON *et al.* 2012). Tout comme, par exemple (FAZLOLLAH *et al.* 2014) qui distinguent la connaissance des besoins des bâtiments de l'optimisation du RCU, en étudiant le profil d'appel de puissance sur des journées caractéristiques avec un pas de temps d'une heure.



[Figure 1-22 Superstructure du RCU et du bâtiment selon \(BOJIC et al. 2000\)](#)

Nous travaillons dans le cadre du projet THERMENERGY, **en amont de l'optimisation, à prétraiter les profils d'appel de puissance** afin de déterminer la puissance nominale à renseigner en entrée du problème d'optimisation, ainsi que le choix du facteur de simultanéité [Eq 1-1] et du facteur de capacité [Eq 1-2].

OPTIMISATION DE RESEAUX DE DISTRIBUTION DE FLUIDE

Au lieu de se restreindre à la distribution de l'eau, (RAMOS BERMUDEZ 2007) s'intéresse à l'optimisation des systèmes de distribution de fluide incompressible. Il étend même son travail en annexe à la distribution de gaz avec la réflexion d'un modèle compressible. Un problème MINLP est résolu avec un algorithme génétique, en cherchant à minimiser uniquement la puissance de pompage. Un travail novateur a été mené en détail sur l'ajout automatique de nœud de bifurcation.

L'application de sa méthode sur un RCU est testée à la fin de sa thèse. Mais en partant d'un objet d'étude aussi général, l'optimisation est relativement éloignée des préoccupations spécifiques aux RCU. Les pertes thermiques ont été rajoutées, mais en considérant que l'eau chaude retourne à la température de l'eau froide du réseau d'eau potable, ce qui n'est jamais le cas. Il a également intégré dans sa fonction objectif les coûts annualisés d'investissement des chaudières en chaufferies et des échangeurs de chaleur en sous-station. Sa réflexion sur l'analyse en coût global a inspiré la définition de notre fonction objectif (en comparant et sommant les coûts actualisés à l'horizon 30 ans dans nos travaux et non pas en ramenant à l'année de référence)

La conclusion de ce travail d'optimisation appliqué au RCU est intéressante : « *pour les cas étudiés, le coût thermique prédomine sur le coût de pompage, ce qui mène à des topologies optimales qui se rapprochent du réseau le plus court* » (RAMOS BERMUDEZ 2007). Dans le cadre de notre travail, nous sommes entièrement d'accord avec la première partie de la conclusion (le coût de la chaleur

représente plutôt 50% du coût global du RCU alors que les coûts de pompage sont de l'ordre de 2% lorsque les diamètres des canalisations sont bien dimensionnés). Mais la deuxième partie de leur conclusion est plus discutable. En effet **la configuration optimale ne correspond pas au chemin le plus court** si, par exemple, une chaufferie plus éloignée permet d'exploiter le potentiel d'une énergie renouvelable ou même de récupérer de la chaleur fatale.

1.3.4 SYNTHESE DE L'ETAT DE L'ART

FONCTIONS OBJECTIF CONSIDERES

A la lecture des travaux principaux identifiés, nous avons répertorié les fonctions objectifs considérées pour l'optimisation (appliquée au RCU uniquement) dans le Tableau 1-4. Une analyse similaire a été réalisée dans la review (CHICCO et MANCARELLA 2009) où sont recensées les méthodes d'optimisation sur la multigénération (cogénération ou trigénération et réseau de distribution d'énergie) selon les critères suivants : court ou long terme, fonction objectif et méthode déterministe ou stochastique.

Tableau 1-4 Type de fonction objectif considérée dans les travaux scientifiques identifiés

Fonction objectif	Publications concernées :
Coût global	(SODERMAN 2007), (GNUCHTEL et GROSS 2010), (BOHM <i>et al.</i> 2002), (WIGBELS <i>et al.</i> 2005), (HAIKARAINEN <i>et al.</i> 2014)
Coût de fonctionnement	(BENONYSSON <i>et al.</i> 1995)
Coût de pompage	(RAMOS BERMUDEZ 2007)
Coût global avec pénalité pollution ou multiobjectif (coût global et émissions)	(CURTI 1998), (MOLYNEAUX <i>et al.</i> 2010), (WEBER 2008), (FAZLOLLAHI <i>et al.</i> 2012), (HOHMANN <i>et al.</i> 2015), (REN <i>et al.</i> 2010)
multiobjectif (coût global et exergie)	(SNOECK et KLUITERS 2010)
Exergie	(KECEBAS et YABANOVA 2012), (COMAKLI <i>et al.</i> 2012), (SALAME et ZOUGHAIB 2014)
Température de confort	(BOJIC <i>et al.</i> 2000)
% EnR&R dans le mix énergétique	(OMU <i>et al.</i> 2013) et (NOU 2011)
profit	(CHINESE et MENEGHETTI 2004)

Le coût global est la fonction objectif utilisée couramment pour l'optimisation mono-objectif. On cherche à minimiser à la fois le coût opérationnel et le coût d'investissement annuel. Pour tenir compte des externalités sans rentrer dans le domaine de l'optimisation multiobjectif, des coûts de pénalité pour l'impact environnemental pourraient être inclus. Par exemple le coût de la tonne de CO₂ pénalise le coût global. Ou alors, il est également possible d'inclure une contrainte pour limiter les émissions de GES tout en ne cherchant à minimiser que le coût global.

Les pertes thermiques ne sont pas la fonction objectif choisie dans ces travaux de thèse, car si on diminue la température du réseau, certes les pertes thermiques diminuent, mais alors la consommation électrique de pompage augmente. C'est certes un élément critique, mais qui sert plutôt en diagnostic de réseau existant ou en critère de performance ciblé par le cahier des charges lors de la création d'un réseau de chaleur.

Pour respecter l'équilibre des pertes de charge avec les pertes thermiques, il est possible de s'intéresser à minimiser la somme des coûts opérationnels (pompage et énergie consommée pour chauffer). Néanmoins avec cette approche, les énergies renouvelables seraient trop valorisées du fait de leur faible coût opérationnel. Il semble judicieux d'inclure les investissements dans la fonction objectif, en plus des coûts opérationnels.

METHODES D'OPTIMISATION EMPLOYEES

La lecture de ce chapitre permet de constater qu'en termes d'optimisation des réseaux de chaleur, les méthodes d'optimisation dépendent de la finalité visée :

- Si la configuration du réseau est optimisée, il y a forcément des variables discrètes permettant de laisser le choix d'existence de telles technologies ou de telles canalisations relient deux sites. Ainsi le problème est forcément de type combinatoire. Et suivant le niveau de détail souhaité, si les pertes thermiques sont modélisées physiquement (et non avec un ratio), le problème sera forcément non linéaire (MINLP).
- Si l'optimisation porte sur le dimensionnement d'un RCU, le réseau ayant une structure fixée, il n'y a pas de variables discrètes pour gérer l'existence. Les problèmes combinatoires sont écartés. Suivant le niveau de détail, le problème est soit LP soit NLP.
- Si l'aide à la gestion du réseau est visée,
 - Le plus souvent, des simulations numériques sont réalisées en régime dynamique. La configuration et le dimensionnement sont fixés. La modélisation des écoulements et des transferts thermiques est réalisée en détail.
 - Le contrôle optimal est l'option la plus précise et adaptée à implémenter dans un logiciel de management de l'énergie pour les gestionnaires de RCU. C'est également le domaine avec le plus de publications (Figure 1-23). Ceci permet à partir de l'état initial (les données récupérées du système de monitoring sur le réseau) de déterminer l'état final optimal sous certaines perturbations (consigne de température, de changement de condition météorologique ou encore des conditions de prix de l'énergie).

Les grandes tendances des travaux scientifiques ont été représentées sur les figures suivantes, d'après les recherches sur une requête Scopus « optimization » & « district heating » & « termes choisi » & NOT « termes non choisis ». Les méthodes déterministes ont été cherchées avec (MINLP + MILP + NLP + LP), en excluant les termes « control » et « stochastic »).

- Figure 1-23 : la finalité de contrôle des RCU suscite le plus de travaux, et ce depuis 1972 de manière soutenue, avec un regain d'intérêt depuis 2010. Les finalités d'optimisation de configuration et de dimensionnement ne sont pas différencierées (cette distinction était purement à but pédagogique dans cet état de l'art). Nous constatons un intérêt légèrement supérieur pour les méthodes déterministes que pour les méthodes stochastiques.
- Figure 1-24 : la grande majorité des travaux portent sur l'optimisation MILP des RCU. La résolution d'un problème MINLP appliqué aux RCU contient en elle-même un intérêt scientifique.

1.3 : Etat de l'art des travaux scientifiques d'optimisation appliqués aux RCU

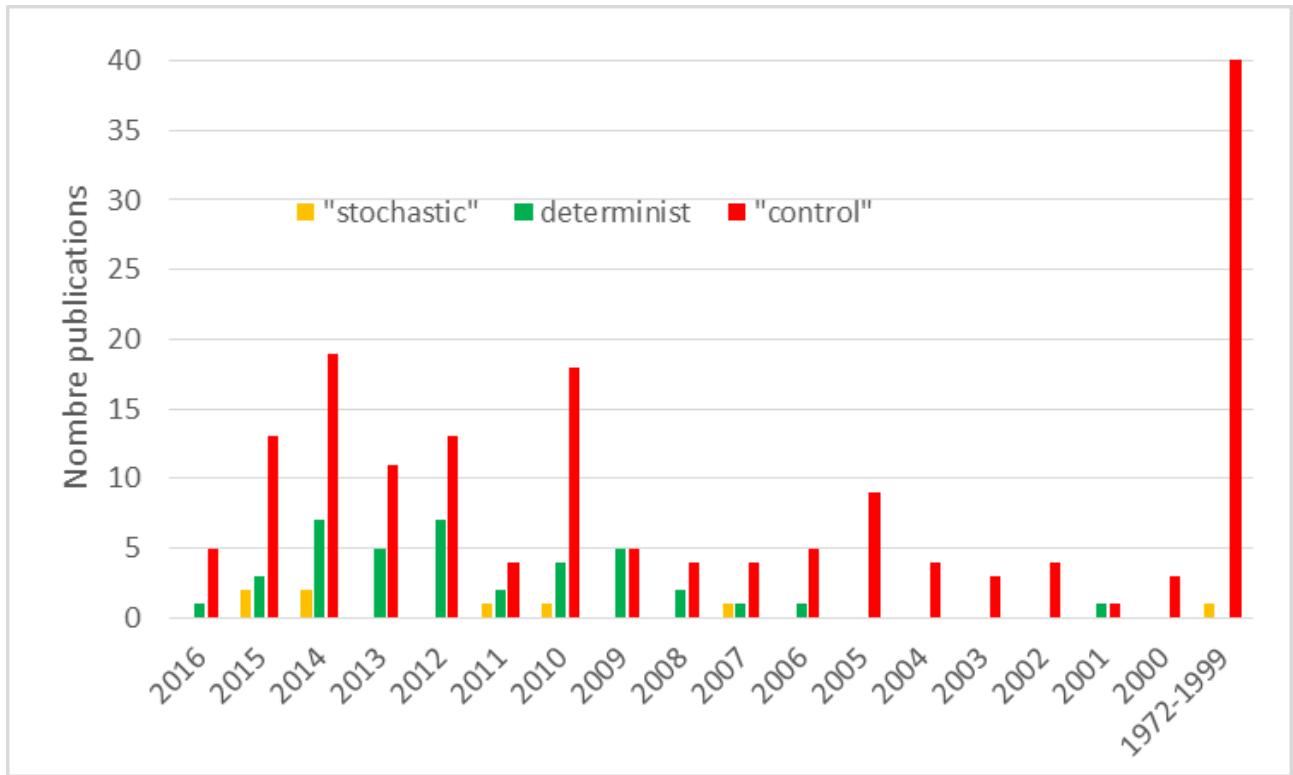


Figure 1-23 Répartition du nombre de publications d'optimisation appliquée sur les RCU en différenciant les méthodes stochastiques, déterministes et de contrôle

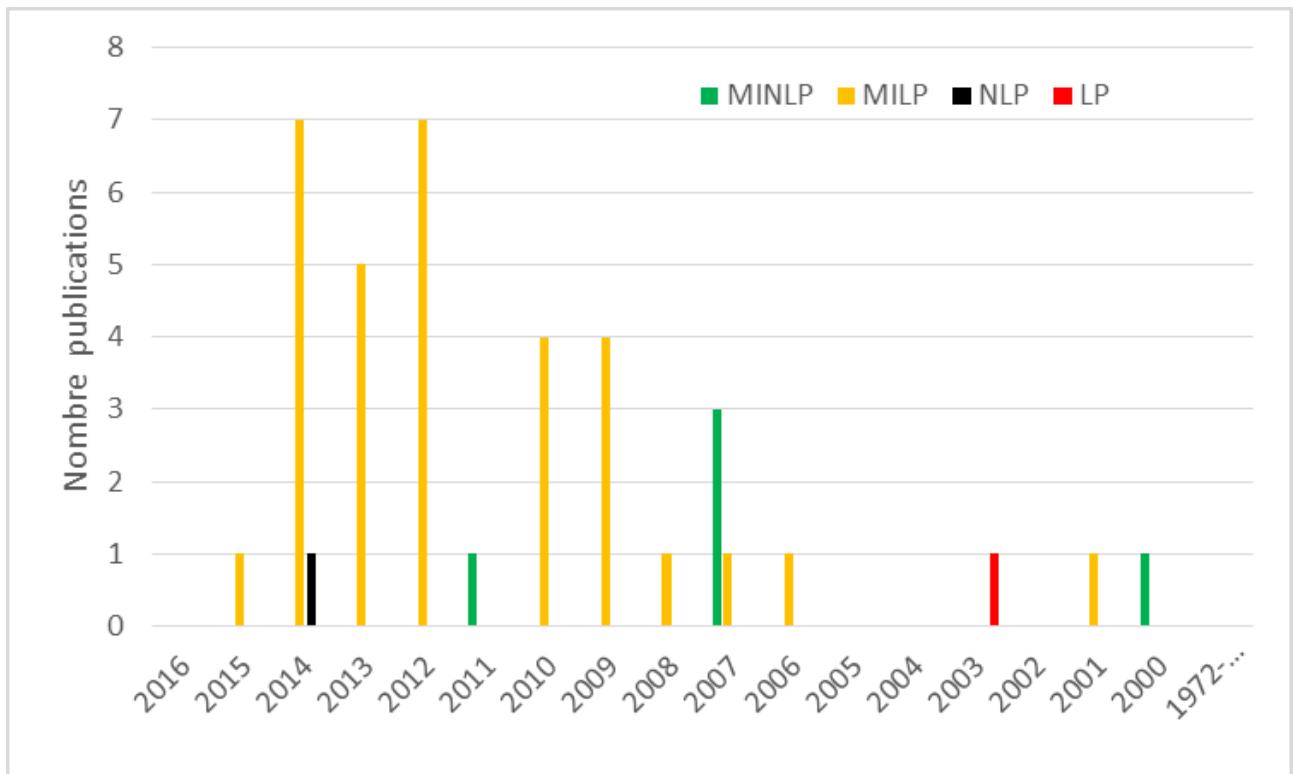


Figure 1-24 Répartition des travaux d'optimisation de RCU, selon le détail des méthodes déterministes : MILP, NLP et LP (d'après une recherche Scopus)

1.4 CONCLUSION ET POSITIONNEMENT

Les questions d'approvisionnement énergétiques sont indissociables des questions environnementales, économiques et sociétales. Les politiques environnementales actuelles vont dans le sens de la réduction de l'impact de l'homme sur notre planète, même si certaines insistent plus sur des aspects spécifiques (sécurisation de l'approvisionnement, réduction de gaz à effet de serre ou introduction d'énergie renouvelable). Différents scénarios de transitions énergétiques peuvent être envisagés pour réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en satisfaisant le besoin, mais de nombreux travaux insistent sur l'importance préalable de réduire la demande énergétique. Les conclusions d'ANCRE insistent sur l'investissement financier important et les efforts de recherche pour lever des verrous technologiques. Le scénario Négawatt propose une réflexion sur toute la chaîne énergétique, partant de la réflexion sur nos usages (en chaleur, mobilité et électricité spécifique) pour seulement ensuite proposer des mesures d'efficacité énergétique et enfin de l'introduction d'énergie renouvelable. Le pilier central du scénario est la réduction des besoins.

Néanmoins un besoin de chaleur sera toujours présent, d'autant plus dans le secteur du bâtiment. Et malgré les politiques environnementales, à l'horizon 2030 ou 2050, de nombreux bâtiments ne pourront être rénovés énergétiquement. Il est donc nécessaire dans un 2nd temps (après la réflexion de sobriété énergétique) d'étudier comment les approvisionner en chaleur le plus efficacement possible.

Les RCU sont une solution d'approvisionnement rentable économiquement, efficace énergétiquement et vertueuse pour l'environnement. C'est une solution fédératrice de la transition énergétique. Elle rend possible l'exploitation de la chaleur fatale, favorise les synergies entre réseaux d'énergie et diversifie le mix énergétique avec l'introduction d'énergie renouvelable. Étant donné que par essence, un RCU est basé sur la valorisation de telles économies d'envergure, le besoin n'est pas de démontrer la pertinence de cette solution d'un point de vue énergétique ou environnemental, mais du fait d'un investissement financier conséquent, il est nécessaire d'apporter des garanties de performance économique, et ce dès le début d'un projet (de création ou de rénovation).

Notre travail, inclus dans le projet THERMENERGY de l'ITE INEF4, porte sur la création d'un outil d'optimisation de réseaux de chaleur, en phase de conception, de rénovation ou d'extension.

L'état de l'art des méthodes de conception a permis de confirmer le regain d'intérêt porté aux travaux d'optimisation des RCU. Dans le cadre d'une étude de phase de conception en amont de RCU, le besoin est de réussir à réaliser l'optimisation simultanée aussi bien de la configuration (localisation des chaufferies, type de technologie et maillage du réseau) et du dimensionnement (températures, vitesse, diamètre de canalisation et aire d'échangeur) de RCU. Ce type d'étude n'est en général pas réalisé simultanément, ni dans les travaux publiés ni dans les études présentes sur le marché.

Concernant le positionnement marché, dans les méthodes de conception classique des RCU par les bureaux d'étude, le choix du lieu de chaufferie et du type de technologie n'est pas étudié autrement que par simulation sur un nombre restreint de possibilités. Notre méthode de conception amont permettrait de compléter ces études de conception avancée. Classiquement le tracé du réseau suit les routes, sans envisager des connexions potentielles du consommateur éloigné ou des cascades de consommateurs (qui ne sont pas le tracé le plus court).

De plus, notre méthode de conception amont des RCU pourrait compléter une étude d'opportunité énergétique de quartier, en amont des projets d'aménagement de quartier. Ainsi une étude d'opportunité pourrait inclure une première esquisse de solution de RCU, chiffrée économiquement, avec une proposition de structure de réseau et des premières valeurs de dimensionnement. Alors

qu'actuellement, dans la majorité des études, seul un critère de densité thermique est utilisé et malheureusement souvent pour écarter la solution des RCU. Ces études sont parfois aussi basées sur des cartes de potentiel de valorisation d'EnR&R issues de SIG (système d'information géographique), mais alors aucune réflexion n'est proposée sur la faisabilité du RCU.

Certains travaux scientifiques ont été identifiés sur la valorisation spécifique de certaines technologies. Certes dans nos travaux la valorisation d'énergie fatale et d'énergie renouvelable sont favorisées (avec une analyse en coût global sur le long terme), mais il n'y a pas d'étude particulière quant à la récupération de chaleur sur une activité particulière (papeterie, cimenterie, blanchisserie...) ou à l'introduction d'une EnR&R spécifique (bois, panneau solaire thermique, récupération de chaleur sur les eaux grises ou sur un lac ...).

Positionnement

Nous avons choisi de travailler à l'optimisation simultanée de la configuration et du dimensionnement, ce qui implique la résolution d'un problème combinatoire. De plus, nous souhaitons travailler aussi bien à la valorisation de chaleur fatale que sur des réseaux basse température, c'est pourquoi la prise en compte précise des pertes thermiques et des pertes de charge est nécessaire (ce qui implique l'utilisation de contraintes non linéaires) et ceci sur une large gamme de température de 30 à 150°C.

Ainsi le problème d'optimisation sera de type MINLP. La résolution de tel problème étant complexe et l'analyse en coût global permettant de prendre en compte de nombreux aspects attendus (réflexion à long terme, intégration d'EnR&R et une pollution maîtrisée), une seule fonction objectif a été considérée.

De plus, la méthode de résolution choisie est une méthode de type déterministe, et non une méthode stochastique, pour leur rapidité et la prise en compte de nombreuses contraintes. Aucun développement d'algorithme de résolution n'est développé dans cette thèse. La valeur ajoutée n'est pas la programmation d'une méthode de résolution, mais l'application d'une méthode de résolution déterministe sur les RCU.

Chapitre 2. FORMULATION DU PROBLEME

Le Chapitre 1 a permis de comprendre pourquoi les RCU sont une solution pertinente pour répondre à la transition énergétique. L'état de l'art des travaux existants d'optimisation appliquée aux RCU a permis d'aboutir à notre positionnement. Ce 2^{ème} chapitre va détailler la formulation du problème d'optimisation, avant de détailler sa résolution au Chapitre 3.

Ce chapitre 2 présente la formulation du problème d'optimisation. Il débute section (2.1) sur l'illustration de la superstructure en énumérant les alternatives structurelles avec des schémas. Elle contiendra aussi l'écriture des fonctionnalités et des hypothèses du modèle. Un problème illustratif permet d'expliquer le positionnement et la nomenclature (les variables -continues et binaires- et les données d'entrée). Un problème de base, 1 producteur avec 1 technologie relié à 1 consommateur (P1k1C1) (Figure 2-1), permet de se familiariser avec notre approche. Ce problème est complexifié au fur et à mesure : ajout d'un 2^{ème} consommateur, ajout d'un 2^{ème} lieu de chaufferie potentiel, voire d'une 3^{ème} production individuelle, ajout de plusieurs technologies (k2 et k3), tout en réfléchissant à des connexions en parallèle, en cascade et sans contraindre une canalisation à être aller-retour dans une même tranchée.

Viennent ensuite trois sections (2.2, 2.3 et 2.4), concernant les nœuds consommateurs, les nœuds producteurs et les canalisations. Ces 3 sections sont organisées de manières similaires : en commençant par la superstructure, puis l'écriture des contraintes (bilan matière, d'énergie...) pour finir sur la définition des bornes et des initialisations.

La section (2.5) est consacrée à l'élaboration de la fonction objectif, en séparant les coûts d'investissement (Capex) des coûts opérationnels (Opex). La section (2.6) permet de calculer des indicateurs de performance, une seule fonction objectif ne signifie pas que d'autres indicateurs ne sont pas utiles à la prise de décision. Enfin la section (2.7) est une analyse de la complexité du problème ainsi formulé.

SOMMAIRE DU CHAPITRE

2.1	ILLUSTRATION DES ALTERNATIVES STRUCTURELLES	74
2.1.1	<i>Problème de base</i>	74
2.1.2	<i>Complexification.....</i>	74
Plusieurs consommateurs et connexion en cascade	74	
Plusieurs chaufferies principales ou individuelles	75	
Plusieurs technologies de production.....	77	
Récapitulatif des différentes alternatives de structures possibles	78	
2.1.3	<i>Fonctionnalités</i>	79
2.1.4	<i>Hypothèses</i>	81
2.2	NŒUD CONSOMMATEUR	86
2.2.1	<i>Superstructure.....</i>	86
2.2.2	<i>Contraintes</i>	88
Conservation de la matière sur un nœud consommateur.....	88	
Bilans d'enthalpie ou égalité de température aux intersections.....	88	
Bilan sur la puissance livrée à l'échangeur de chaleur.....	89	
Respect de la satisfaction des besoins.....	90	
Bilan égalité de pression au nœud consommateur	91	
Perte de charge dans l'échangeur de chaleur.....	91	
2.2.3	<i>Bornes et initialisations</i>	91
2.3	NŒUD PRODUCTEUR.....	93
2.3.1	<i>Superstructure</i>	93
2.3.2	<i>Contraintes</i>	94
Existence des unités de production	94	
Conservation matière nœud producteur	94	
Bilan d'enthalpie et égalité de température aux intersections	95	
Bilan de puissance à installer	95	
Bilan égalité de pression au nœud producteur et dimensionnement de pompage.	96	
2.3.3	<i>Bornes et initialisations</i>	96
2.4	LES CANALISATIONS	98
2.4.1	<i>Superstructure</i>	98
2.4.2	<i>Contraintes</i>	99
Existence des canalisations	99	
Existence des débits	99	
Conservation de la matière dans les canalisations	99	
Prise en compte des pertes thermiques dans les canalisations	100	

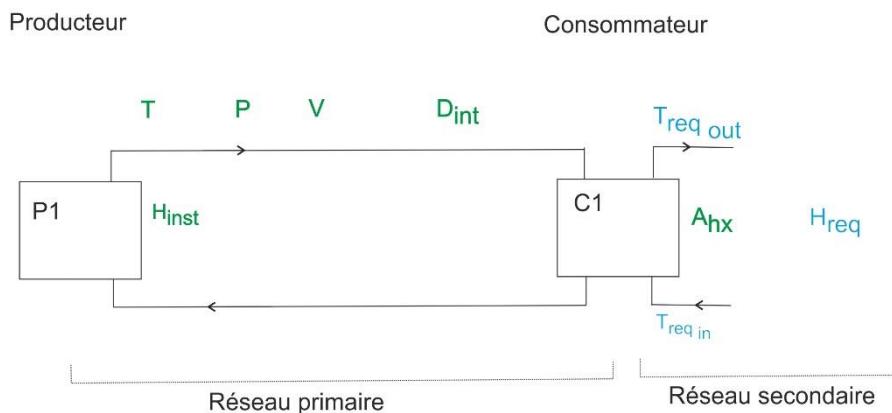
Perte de charge en ligne	100
2.4.3 Bornes et initialisations	102
4 catégories de variables initialisées et bornées directement à partir des données d'entrée.....	102
Bornes et initialisations des autres variables.....	103
2.5 FONCTION OBJECTIF	104
2.5.1 Coût opérationnel OPEX	105
Coût de pompage	105
Coût de la chaleur	105
2.5.2 Investissement CAPEX	105
Coût de l'installation de la chaufferie	105
Coût de la canalisation	106
Coût des échangeurs.....	107
2.6 DONNEES DE SORTIES DE L'OUTIL.....	109
2.7 COMPLEXITE DE LA FORMULATION.....	109
2.8 CONCLUSION DU CHAPITRE	112

2.1 ILLUSTRATION DES ALTERNATIVES STRUCTURELLES

2.1.1 PROBLEME DE BASE

Un problème de base, reliant le réseau primaire (entre chaufferie et sous-station) au réseau secondaire (entre sous-station et logement), est illustré Figure 2-1 afin de mieux comprendre la définition des variables à optimiser. Pour faciliter la lecture sur les figures, les variables sont représentées en vert et les données d'entrée en bleu.

- Les variables d'optimisation (en vert) sont : la puissance à installer à la production (H_{inst}), le diamètre (D_{int}) (voir Fonctionnalité# 1), la température de distribution dans le réseau primaire (T), la vitesse (V) (voir Fonctionnalité# 2) et enfin l'aire de l'échangeur (A_{hx}).
- En données d'entrées (en bleu), il faut renseigner: la localisation spatiale des nœuds (abscisse et ordonnée), la puissance nominale nécessaire (H_{req}) et le régime de température requis du réseau secondaire. Ce dernier est le circuit de distribution dans le bâtiment, en entrée (T_{req_in}) et en sortie (T_{req_out}) (voir Hypothèse# 10).

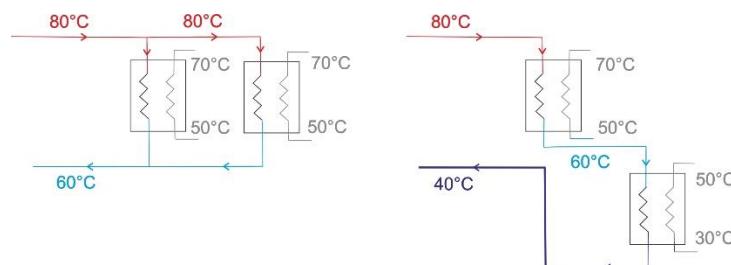


[Figure 2-1 Schéma du cas de base P1 – C1](#)

2.1.2 COMPLEXIFICATION

PLUSIEURS CONSOMMATEURS ET CONNEXION EN CASCADE

D'ores et déjà, il est possible de complexifier la combinatoire en autorisant l'approvisionnement en cascade (voir Fonctionnalité# 7). L'intérêt est de diminuer la température en retour de réseau (Figure 2-2) et de valoriser de la chaleur fatale d'un consommateur « haute température ».



[Figure 2-2 Illustration de l'approvisionnement en parallèle \(gauche\) en cascade \(droite\)](#)

L'exemple illustratif se complexifie en P1C2 avec 1 nœud producteur et 2 nœuds consommateurs (Figure 2-3). Il y a désormais 5 configurations de réseau possibles :

- Tout en haut, P1 approvisionne chaque consommateur directement.
- En haut à gauche, P1 approvisionne C1 directement, puis C1 approvisionne un autre consommateur C2 en parallèle (classique).
- En bas à gauche, P1 approvisionnement toujours le même consommateur en premier (C1). Mais cette fois-ci C1 approvisionne C2 en cascade. Cette cascade permet notamment de réduire la température dans le réseau de retour, comme illustré Figure 2-2, et donc par la même occasion de réduire les pertes thermiques.
- Les cas à droite sont similaires, sauf que P1 approvisionne le consommateur C2 en premier (et non C1).

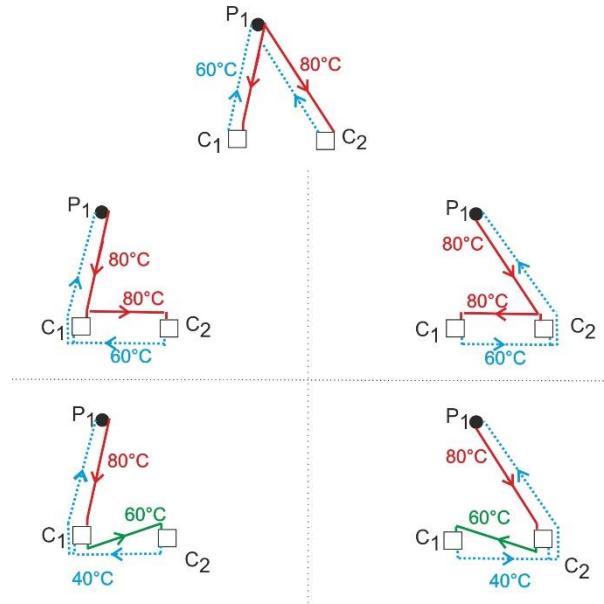


Figure 2-3 Illustration de la combinatoire et des possibilités de connexion sur un cas simple P1C2

PLUSIEURS CHAUFFERIES PRINCIPALES OU INDIVIDUELLES

Aux fonctionnalités précédentes s'ajoute la possibilité :

- D'avoir plusieurs nœuds producteurs potentiels (Voir Fonctionnalité# 3), afin de choisir la localisation de la chaufferie principale (Figure 2-4). La localisation P1 a été choisie dans les cas à gauche, alors qu'à droite la localisation P2 a été choisie.
- Sauf en haut de la Figure 2-4, où les producteurs alimentent individuellement chaque consommateur.

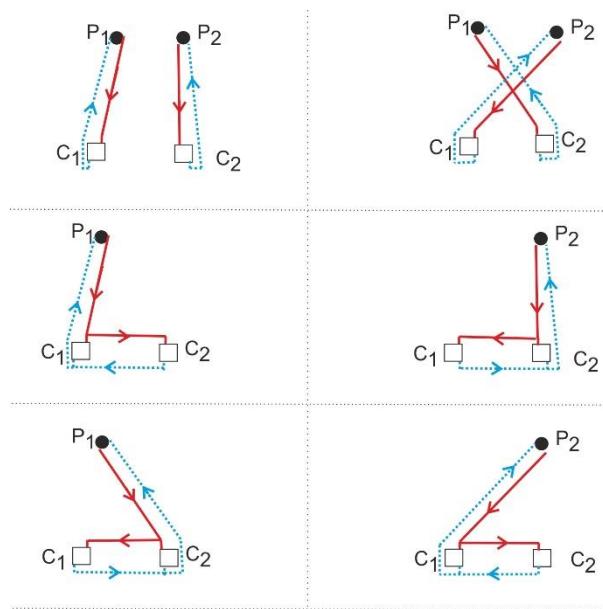


Figure 2-4 Illustration de la combinatoire dès l'introduction d'une éventuelle 2^{ème} chaufferie P2 (les connexions en cascade ne sont pas représentées X2 et ni la connexion directe depuis P2)

- D'autoriser les productions individuelles (Voir Fonctionnalité# 4), illustrée avec P3 de la Figure 2-5.
- D'autoriser qu'un nœud (producteur ou consommateur) puisse être alimenté par plusieurs courants (Voir Fonctionnalité# 6), illustrée dans les 2 cas du milieu de la Figure 2-5 où C2 est alimenté à la fois par C1C2 (à gauche en parallèle et à droite en cascade) et par la production décentralisée P3.

Cette illustration de l'approvisionnement décentralisé permet d'envisager en P3 l'intégration d'une technologie qualifiée d'EnR&R qui peut alimenter à elle seule un consommateur (cas haut Figure 2-5), mais pas forcément à 100% (cas du milieu Figure 2-5). Ou, au contraire, d'estimer que l'intégration de l'EnR&R est trop chère et qu'une production centralisée est plus rentable (cas du bas Figure 2-5).

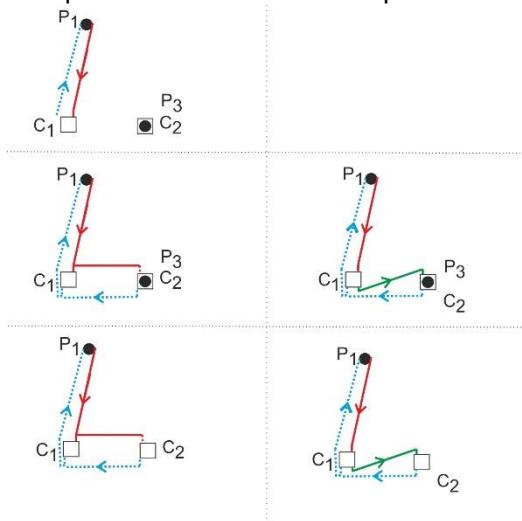


Figure 2-5 Illustration de la combinatoire lors de l'ajout d'une production individuelle potentielle (les cas où la localisation P2 est sélectionnée à la place de P1 ne sont pas représentés).

- Il n'est plus obligatoire que les canalisations soient aller-retour (Fonctionnalité# 8), comme illustrée Figure 2-6.

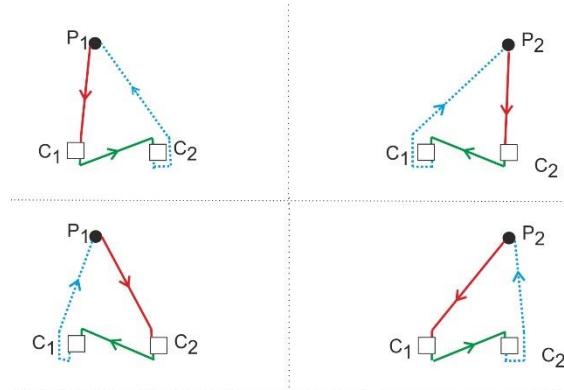


Figure 2-6 Illustration des structures alternatives de la Figure 2-4 si les canalisations ne sont pas AR (connexions parallèles non représentées X2).

PLUSIEURS TECHNOLOGIES DE PRODUCTION

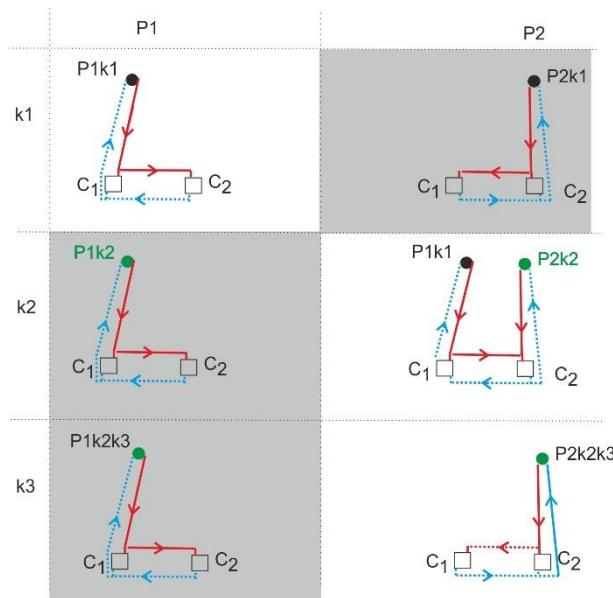
La dernière alternative souhaitée est la possibilité d'avoir plusieurs technologies de production différentes (Voir Fonctionnalité# 5). Ces technologies sont indexées avec l'indice k. Sur la Figure 2-7 est représenté le cas P2k3C2 : une 2ème technologie (k2) basée sur des EnR&R potentielles a été ajoutée sur les 2 localisations P1 et P2. Nous imaginons dans cet exemple que, k1 représente une technologie fonctionnant avec une énergie fossile, auquel il est possible d'ajouter potentiellement la technologie k2 basée sur des EnR&R. La technologie k3 est l'appoint à l'EnR&R (afin de répondre à la contrainte l'EnR&R ne peut subvenir à 100% des appels de puissance), elle n'existe que lorsque k2 existe.

Malgré un investissement pouvant être élevé, il est souvent intéressant d'inclure des EnR&R dans le mix énergétique, car le coût de fonctionnement de l'EnR&R est plus faible (et avec très peu d'inflation). L'enjeu de l'optimisation combinatoire va être de choisir le meilleur compromis entre les différentes technologies afin de minimiser le coût (d'investissement et de fonctionnement) :

- Si l'EnR&R est trop chère à l'investissement par rapport à l'énergie fossile, une des 2 configurations du haut de la Figure 2-7 sera choisie comme étant optimale.
- Il se peut qu'un pourcentage minimum d'EnR soit imposé au projet, ainsi la configuration optimale serait plutôt une des deux configurations du milieu de la Figure 2-7.
- Mais si en plus, une contrainte indique que l'EnR&R n'est pas disponible sur le lieu de chaufferie principale et que cette EnR&R ne peut satisfaire 100 % des besoins (notamment les pics d'appel de puissance), alors la configuration optimale serait plutôt une des 2 du bas de la Figure 2-7.

Les parties grisées de la Figure 2-7 ne sont pas autorisées, comme dans le cas d'étude P2k3C4 développé Chapitre 4, dès lors que :

- La technologie fossile k1 n'est autorisée que sur la chaufferie principale P1 (p. ex. il peut exister un stress foncier en P2 ou une contrainte pour limiter la pollution au voisinage de P2).
- Un potentiel de valorisation d'EnR&R n'est disponible qu'à la localisation P2.



[Figure 2-7 Illustration du choix du type de technologie de production sur 2 sites différents](#)

RECAPITULATIF DES DIFFERENTES ALTERNATIVES DE STRUCTURES POSSIBLES

La superstructure considérée doit permettre d'autoriser :

- les traditionnelles liaisons entre nœuds producteurs et nœuds consommateurs ;
- les liaisons entre consommateurs (classique - en parallèle ou innovante - en cascade) ;
- des canalisations non forcées à être aller-retour (AR) dans une même tranchée ;
- différents lieux et différents types technologies de production.

Les différentes structures sont énumérées dans le Tableau 2-1. Ces exemples permettent d'illustrer l'explosion combinatoire :

- Sur le cas P3k1C2, avec toutes les fonctionnalités (mais un seul type de technologie), 23 alternatives structurelles sont possibles.
- Sur le cas P2k2C2, avec toutes les fonctionnalités, si k1 et k2 ne peuvent coexister sur le même lieu de production, 24 structures différentes sont possibles. Si les deux technologies peuvent coexister, 48 configurations sont possibles.

Du fait de cette explosion combinatoire, nous avons choisi par la suite de contraindre le problème afin de limiter la combinatoire. Par exemple, l'EnR&R k2 (valorisation d'EnR&R) n'est disponible que sur le site de production P2, sur ce site P2 il n'est pas envisageable d'intégrer la technologie k1 et k3 n'est possible que si k2 existe. De plus, les cascades de consommateur ne sont envisagées que lorsque les consommateurs ont des besoins en régime de température différents. Ainsi la combinatoire peut diminuer jusqu'à 8 combinaisons (comme le cas P2k3C2 en canalisation forcée AR).

Tableau 2-1 Récapitulatif et dénombrement des structures autorisées suivant les fonctionnalités

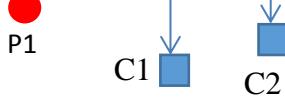
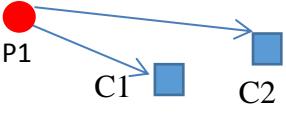
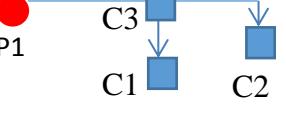
Figure	cas	fonctionnalités représentées	nombre d'alternatives représentées	fonctionnalités non représentées	nombre d'alternatives total
Figure 2-3	P1k1C2	cascade	4+1	canalisation pas forcément AR et autorisation de plusieurs technologies	8+1
Figure 2-4	P2k1C2	cascade, choix Pi	4		16+2
Figure 2-5	P3k1C2	cascade, choix production individuelle	3		(16+2)+5
Figure 2-6	P2k1C2	cascade, pas forcé AR	4	canalisation parallèle	8
Figure 2-7	P2k3C2	choix Pi et technologie k	6	cascade, P1C2 ou P2C1, P1k1k2 et P2k1k2	24 (si pas k1 et k2 en même temps), 48 sinon.

2.1.3 FONCTIONNALITES

Tableau 2-2 Liste des fonctionnalités

Fonctionnalité# 1 Diamètre variable	
Justification	Sur des réseaux existants, le diamètre varie beaucoup, entre DN50 et DN250. Or plus le diamètre augmente, plus le coût du tuyau est cher, plus les pertes thermiques sont importantes et moins les pertes de charge sont élevées.
Comparaison à la littérature	Bermudez fait varier le diamètre (et l'épaisseur de l'acier liée au diamètre) (RAMOS BERMUDEZ 2007). Il obtient comme résultat une variation des diamètres entre 35 et 135 mm. (GNUCHTEL et GROSS 2010) considèrent également le diamètre en variables, sur une gamme de 27 à 160 mm.
Fonctionnalité# 2 Température et vitesse en variables	
Justification	Généralement, la température de sortie de chaudière est fixée (et elle définit la température identique dans toutes les canalisations), le diamètre est choisi avec un ratio de perte de charge maximal à ne pas dépasser et l'optimisation porte sur les vitesses. Or le positionnement de notre travail cherche à valoriser différents régimes de température donc la température doit être en variable. Comme nous souhaitons également aider au dimensionnement, les pertes sont prises en compte de manière physique. Ainsi, avec la Fonctionnalité# 1, il est nécessaire que la température, la vitesse et les diamètres soient en variables.
Comparaison à la littérature	La plupart du temps, soit la configuration est fixée et il n'y a pas de problème pour ajouter des variables ou des non linéarités à un problème NLP. Soit, dès que des variables binaires sont présentes pour optimiser la configuration, des efforts particuliers sont menés (dont la non-prise en compte de ces 3 variables - T, V et Dint - en même temps) pour linéariser le problème et résoudre un problème MILP. Seule (WEBER 2008) optimise ces 3 variables dans un problème MINLP.
Fonctionnalité# 3 Plusieurs nœuds de production possibles	
Justification	Il faut laisser la possibilité de définir plusieurs sites potentiels et leurs localisations, sinon aucune optimisation sur la localisation des unités de production ne peut être réalisée.
Comparaison à la littérature	(SODERMAN et PETTERSSON 2006) proposent plusieurs sites potentiels de production, mais avec une seule technologie disponible.

Fonctionnalité# 4 Production individuelle autorisée		
Justification	Il est intéressant d'étudier si le consommateur éloigné est approvisionné par un réseau ou s'il est plus rentable d'installer une production individuelle.	
Attention particulière	Il faut prévoir un nœud de production de même localisation que le nœud consommateur isolé.	
Comparaison à la littérature	Réalisé par (SODERMAN et PETTERSSON 2006), non réalisé sinon. Si le consommateur existe, il est relié au réseau sans se poser la question de savoir si cette solution centralisée est rentable ou non.	
Fonctionnalité# 5 Plusieurs technologies de production disponibles		
Justification	Nous souhaitons pouvoir aider aux choix du type de technologie de production (gaz, PAC, chaleur fatale...). Autrement l'aide à la conception est limitée s'il n'y avait qu'un seul site de production, d'autant plus s'il n'y avait aussi qu'une seule technologie.	
Limite	Ces technologies sont modélisées de manière identique physiquement, mais les coûts associés, la température maximale et la puissance maximale sont différents.	
Comparaison à la littérature	(MOLYNEAUX <i>et al.</i> 2010) considèrent une seule centrale, mais dont ils optimisent la configuration en interne. De nombreux travaux d'optimisation MILP sur des réseaux de distribution multiénergie, par exemple (SODERMAN et PETTERSSON 2006), ne se préoccupent pas du choix des technologies.	
Fonctionnalité# 6 Un nœud peut être alimenté par plusieurs courants		
Justification	Pour un nœud consommateur, il faut laisser la possibilité à un consommateur d'être approvisionné potentiellement par un autre consommateur et par une ou plusieurs chaufferies. Un nœud producteur peut admettre le retour de plusieurs nœuds consommateurs.	
Comparaison à la littérature	Réalisée dans la modélisation de RCU, mais pas à notre connaissance dans l'optimisation des RCU, à part venant d'un lieu de stockage en complément.	
Fonctionnalité# 7 Approvisionnement en cascade potentiellement autorisée		
Justification	Cela permet d'envisager l'approvisionnement d'un consommateur BT (chauffage sol) à partir d'un consommateur HT (procédé industriel, eau chaude sanitaire).	
Comparaison à la littérature	La connexion en cascade n'est pas envisagée par la majorité, comme (SODERMAN et PETTERSSON 2006) et (RAMOS BERMUDEZ 2007). Celle-ci est réalisée par (CURTI <i>et al.</i> 2000), qui valorisent différent niveau de température, mais s'il elle est envisagée, elle est alors obligatoire.	
Fonctionnalité# 8 Une canalisation n'est pas forcément aller et retour, mais il est obligatoire qu'une canalisation sorte du nœud		
Justification	Nous souhaitons proposer des structures optimales, sans exclure la structure en boucle. Il pourrait être judicieux de creuser une 3 ^{ème} tranchée reliant directement C2 au producteur P1, cela dépendra principalement du coût de la tranchée, au lieu de payer pour les canalisations C2C1 et C1P1 (et leurs pertes respectives).	
Limite	Sur le terrain, si le risque de creuser est pris (perturbation sur la chaussée ou conflit avec d'autres réseaux), le choix est de poser la canalisation aller et aussi celle retour.	
Comparaison à la littérature	Cela n'est jamais réalisé en optimisation à notre connaissance.	
Attention particulière	Nous devons veiller à correctement écrire la contrainte, il faut au moins une canalisation retour, afin de refroidir la chaudière et apporter la chaleur en	

	<p>sous-station. Dans la stratégie de résolution par l'expert (section 3.4), au début les canalisations sont AR, puis les contraintes AR sont libérées. De plus, il ne faut pas que le coût de la tranchée soit pris en double [Eq 2-71].</p>	
Fonctionnalité# 9 L'ajout de nœud non consommateur (une bifurcation) est possible		
Justification	<p>Il faut pourvoir autoriser :</p> 	<p>Car sinon il est seulement possible de représenter une configuration en étoile (si on interdit alimentation parallèle) or cela fait des coûts de canalisation et des déperditions supplémentaires :</p> 
Attention particulière	<p>Si une bifurcation est renseignée, elle existe forcément dans la version actuelle. Nous envisageons de renseigner un indice j_{bif} et de n'autoriser certaines contraintes que pour $j \neq j_{bif}$.</p>	<p>Il faut prévoir les bifurcations, ici un consommateur (C3) non consommateur, en données d'entrée du problème.</p> 
Comparaison à la littérature	<p>(RAMOS BERMUDEZ 2007) introduit des nœuds non consommateurs. D'ailleurs, il propose même d'optimiser la création de nœuds. (SODERMAN et PETTERSSON 2006) les représentent sur leurs graphiques de résultat, mais ils ne sont pas modélisés physiquement. (TOL et SVENDSEN 2012) modélisent un réseau bouclé, mais pas un réseau en étoile.</p>	

2.1.4 HYPOTHESES

Tableau 2-3 Récapitulatif de toutes les hypothèses

Hypothèse# 1 L'eau ne peut être que liquide		
Justification	<p>L'eau chaude est le fluide le plus couramment utilisé dans les RCU. La tendance est plutôt à la création de réseau basse température (ou la rénovation de réseau haute température vers basse température) et pas à la création de réseau vapeur.</p>	
Limite	<p>Cela ne permet pas de travailler sur des réseaux de vapeur, comme le réseau CPCU à Paris (Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain), le plus grand réseau en France qui fonctionne sur certains tronçons avec de la vapeur.</p>	
Comparaison à la littérature	<p>Pas de travaux d'optimisation combinatoire pour des réseaux de chaleur fonctionnant à la vapeur, à notre connaissance.</p>	
	Hypothèse# 2 Caractéristique physique (capacité thermique, viscosité...) de l'eau constante sur (60-100°C)	Hypothèse non réalisée sur un modèle Cp(T) : propriétés dépendantes de la température sur (30-150°C)
Justification	Modèle Cp-cst : Pas de dépendance à la température, car la plage de température de l'eau chaude (60-100°C) n'implique pas des variations significatives (Annexe B).	Modèle Cp(T) : Il semble intéressant de travailler sur une gamme de température entre 30 et 150°C lorsque l'on cherche à valoriser de la chaleur fatale ou que l'on travaille à l'approvisionnement en cascade entre consommateurs, sur des RCU à basse température, d'anciens

		réseaux à haute température (110/90) ou sur des procédés spécifiques (p. ex. industriels ou hôpitaux).
Limite	Cela ne permet pas de travailler sur d'anciens réseaux dits haute température, ni de comparer précisément l'influence des différents régimes de température des consommateurs.	
Comparaison à la littérature	Classiquement les caractéristiques sont considérées comme constante sur la plage de l'eau chaude par toute la communauté. Sauf (RAMOS BERMUDEZ 2007) qui modélise la viscosité dynamique de l'eau avec une fonction de la température.	Pas de travaux d'optimisation combinatoire avec des caractéristiques de l'eau dépendantes de la température.
Hypothèse# 3 Estimations des caractéristiques thermiques du sol et de l'influence de la canalisation retour sur celle aller.		
Justification	Nous avons considéré une conductivité du sol de 1,6 W/(m.K) (DALLA ROSA <i>et al.</i> 2010) et le fait que la canalisation aller n'influence pas les pertes de la canalisation retour.	
Limite	La température du sol est forcément plus chaude à proximité d'une canalisation aller, mais il est difficile de le modéliser plus finement cet effet dans notre formulation. Les 2 autres grandes incertitudes sont les variations de température dans le sol à 50 cm et la nature du sol influençant la conductivité thermique.	
Comparaison à la littérature	Cette estimation est réalisée par tous, sauf (DALLA ROSA <i>et al.</i> 2010) qui modélisent finement les pertes thermiques des tubes préisolés (avec canalisation aller et retour inclus dans une même seule gaine), avec notamment l'interaction du tube aller (chaud) sur celui retour (froid). Une résistance thermique de coïncidence des températures est ajoutée (FREDERIKSEN et WERNER 2013) afin de tenir compte de cette interaction.	
Hypothèse# 4 Epaisseur d'isolant constante		
Justification	Plus il y a d'isolant, moins il y aura de perte thermique (voir chapitre résultat Tableau 4-5). Il faudrait étudier si l'investissement pour la sur-isolation est rentable, mais comme le coût de l'isolant est très inférieur au coût global réseau sur plusieurs années, en ordre de grandeur 10^5 inférieur à l'horizon 20 ans avec taux d'actualisation de 8 % (RAMOS BERMUDEZ 2007). De plus, comme pour l'isolation de bâtiment, avec l'inflation du coût de l'énergie, ce n'est pas la variable la plus déterminante à optimiser. Mais surtout, ce n'est pas parce que le diamètre intérieur augmente, que l'épaisseur de l'isolant augmente, car il y a une contrainte industrielle de disponibilité de la gaine extérieure. Enfin, aucune corrélation n'a été trouvée entre l'épaisseur de l'isolant et le diamètre intérieur, par exemple sur la gamme de tubes RAUTHERMEX (Figure 2-8).	

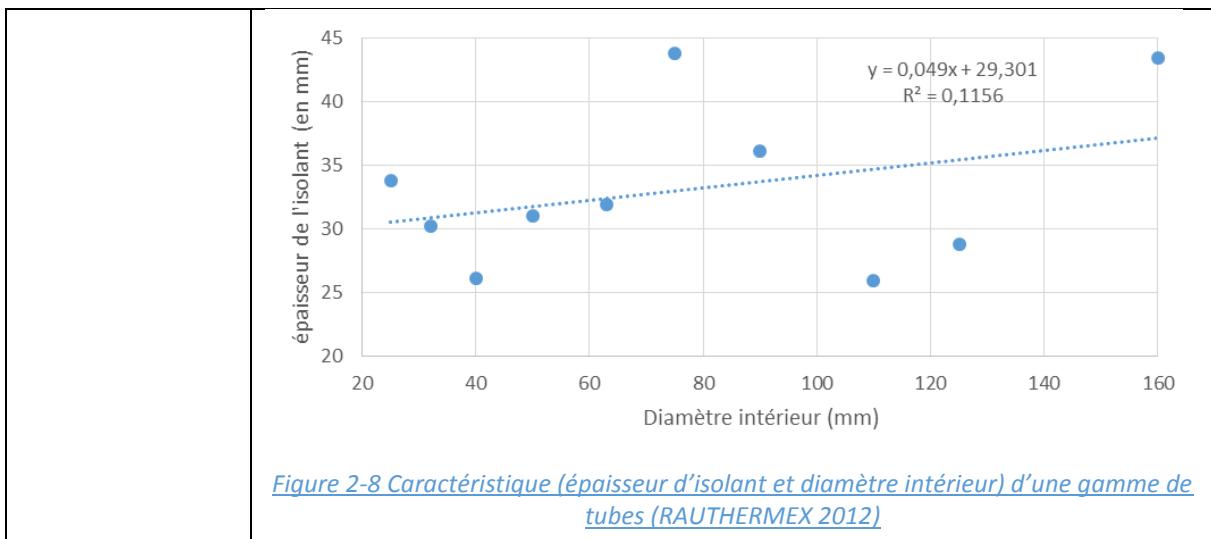


Figure 2-8 Caractéristique (épaisseur d'isolant et diamètre intérieur) d'une gamme de tubes (RAUTHERMEX 2012)

Limite	Il n'est pas possible de trouver au catalogue les canalisations trouvées optimales. C'est pourquoi en perspective, nous envisageons de passer le diamètre et l'épaisseur d'isolant en variables liées discontinues.
Comparaison à la littérature	L'épaisseur d'isolation est rarement une variable d'optimisation. Seul (RAMOS BERMUDEZ 2007) réalise l'optimisation de cette variable et conclut que l'épaisseur d'isolant est constante (15 cm), même pour des températures maximales autorisées (99°C). (DALLA ROSA <i>et al.</i> 2010) conseillent une « pre-insulated twin pipe » qui permet de réduire de 6-12 % des pertes thermiques. De même, (GOEBEL et HOLLER 2010) concluent qu'une isolation disposée dans la galerie technique, contenant les 2 canalisations, permet de diminuer significativement (-25 %) les pertes thermiques.

Hypothèse# 5 Epaisseur du tuyau constante

Justification	On ne modélise que de l'eau, il y a peu de risques liés à la pression.
Comparaison à la littérature	Seul (RAMOS BERMUDEZ 2007) prend une épaisseur calculée à partir du diamètre intérieur. Une épaisseur médiane de 3 mm a été considérée en consultant les catalogues (RAUTHERMEX 2012) et (INPAL ENERGY 2015).

Hypothèse# 6 Régime permanent

Justification	Simplification nécessaire pour la résolution d'un tel problème MINLP, car nous souhaitons tenir compte à la fois des pertes en les modélisant physiquement (donc ajout de non-linéarité) et de la combinatoire. Nous ne pouvons, pour l'instant, optimiser que sur une période (qui peut changer selon les cas).
Attention particulière	Néanmoins une étude préalable sur le profil dynamique des appels de puissance permet de définir un facteur de capacité [Eq 1-2] reliant la puissance nominale à la puissance à dimensionner à l'échangeur ainsi qu'un facteur de simultanéité [Eq 1-1] reliant la somme des puissances en sous-station avec la somme des puissances à installer en chaufferie.
Limite	Le fonctionnement d'un RCU dépend fortement du profil dynamique de la demande, et cela sur certaines périodes (jour/nuit, saison), mais pas forcément à un pas de temps plus fin, sauf pour la demande d'eau chaude sanitaire dépend fortement des usagers, avec un pas de temps autour de 10 min. Aucun facteur de capacité n'a été pour l'instant ajouté au dimensionnement du diamètre des canalisations.
Comparaison à la littérature	Par exemple, (SODERMAN et PETTERSSON 2006) optimisent sur 8 périodes (un problème MILP). Ce n'est pas une optimisation dynamique à proprement parlé, un travail préalable d'agrégation du profil est à réaliser. Il n'y a pas de travaux

	d'optimisation traitant de l'optimisation MIDO à notre connaissance. Le passage de notre modèle MINLP en multipériode, voire MIDO, est une perspective de notre travail.
Hypothèse# 7 Circulation du fluide à sens unique dans une canalisation	
Justification	En régime permanent, un unique sens de circulation dans les canalisations est défini. On ne va pas à l'encontre de la mécanique des fluides. NB : dans une tranchée, il peut y avoir 2 canalisations.
Comparaison à la littérature	Hypothèse toujours faite sauf (SCHLUCK <i>et al.</i> 2015), un travail novateur qui imagine de concevoir un RCU avec des canalisations bidirectionnelles, notamment pour les réseaux très basse température.
Hypothèse# 8 Échangeur à plaque contre-courant	
Justification	Nous avons choisi de modéliser les consommateurs par des échangeurs à plaque contre-courant, car par principe ils sont plus efficace, pas de risque d'enrassement et moins de surface nécessaire.
Limite	On ne pourra traiter des réseaux fonctionnant avec des collecteurs et/ou des bouteilles casse-pression.
Comparaison à la littérature	Réalisé dans tous les travaux d'optimisation consultés.
Hypothèse# 9 Coefficient d'échange thermique constant dans l'échangeur et dans les canalisations, coefficient de perte de charge constant dans l'échangeur	
Justification et comparaison à la littérature	Hypothèse pour simplifier la formulation du problème, qui est réalisée dans tous les travaux d'optimisation consultés.
Hypothèse# 10 Modélisation de la consommation avec une loi d'eau	
Justification	Nous choisissons de ne modéliser que le réseau primaire, comme nous l'avons détaillé section (1.3.3). Ainsi pour modéliser aussi bien le départ que le retour du circuit secondaire, nous prenons l'hypothèse d'une loi d'eau, qui permet de définir l'énergie desservie en sous-station.
Limite	Dans les calculs de simulation thermique dynamique (STD) de bâtiment, c'est le besoin thermique qui est estimé, mais à ce jour nous n'avons pas connaissance d'étude calculant la loi d'eau suivant certains paramètres renseignés (type émetteur, isolation du réseau secondaire, isolation du bâtiment ou encore température de consigne). Les pertes thermiques du réseau secondaire ne sont pas modélisées.
Comparaison à la littérature	(BOJIC <i>et al.</i> 2000) modélisent le bâtiment par des résistances thermiques, mais ils indiquent eux-mêmes qu'ils n'ont pas de retour d'expérience sur les valeurs de résistance thermiques qu'ils prennent. (RAMOS BERMUDEZ 2007) ignore les pertes retour.
Hypothèse# 11 Toutes les bifurcations sont renseignées en données d'entrées	
Justification	Les seules bifurcations potentielles sont celles renseignées en données d'entrée. Sinon il faudrait proposer une méthode qui permette de créer des bifurcations. Ceci semble trop complexe à être ajouté à notre formulation.
Attention particulière	Il faut rajouter toutes les éventuelles bifurcations dans les données d'entrée.
Comparaison à la littérature	(RAMOS BERMUDEZ 2007) propose un algorithme pour chercher les bifurcations optimales en créant des noeuds.
Hypothèse# 12 Les données d'entrée (et de sortie) ne sont pas localisables sur une carte ou (schéma) automatiquement	
Justification	Il est trop compliqué - dès à présent - sur un tel travail, où nous cherchons à optimiser simultanément la configuration et le dimensionnement, de récupérer par exemple les coordonnées des routes et des bâtiments sur des plans.

Limite	Le chemin optimal ne sera pas possible sur le terrain.
Comparaison à la littérature	(GNUCHTEL et GROSS 2010) dans leur programme STEFaN paramètrent sur une interface avec le plan du quartier leurs données d'entrée (p. ex. toutes les canalisations soit en route, soit en vide sanitaire dans un bâtiment) et visualisent leurs données de sorties (p. ex. diamètre).
Hypothèse# 13 Le stockage n'est pas envisagé dans l'optimisation	
Justification	Le stockage ne peut être envisagé que lorsqu'il est possible de résoudre un problème d'optimisation multi-période, ce qui n'est qu'une perspective.
Attention particulière	Néanmoins, la problématique du stockage peut être considérée en amont, en réduisant les pics de puissance sortie de l'outil de STD avec CHAMAN (HENON <i>et al.</i> 2012). L'optimisation d'un organe de stockage peut être une perspective au travail de thèse.
Limite	La configuration et le dimensionnement trouvés optimaux avec notre formulation ne le seront peut-être plus si le stockage était une variable d'optimisation.
Comparaison à la littérature	(SODERMAN et PETTERSSON 2006) introduisent un stockage thermique avec un comportement charge/décharge fixé entre différentes périodes juxtaposées (jour/nuit).
Hypothèse# 14 Aucune technologie de production en cascade n'est envisagée	
Justification	De par notre positionnement, nous avons choisi de modéliser les technologies de production en parallèle dans un premier temps. Cela permet d'aider à la conception sur le lieu, mais aussi déjà sur le choix de la technologie.
Limite	Aucune aide à la conception n'intervient quant à la possibilité d'envisager des cascades de température.
Comparaison à la littérature	Souvent dans les problèmes MILP, les technologies ne sont pas étudiées, comme dans (SODERMAN et PETTERSSON 2006). Dans les formulations d'optimisation non linéaires, lorsque celles-ci sont prises en compte, elles sont alors obligatoires, comme p. ex. (CURTI <i>et al.</i> 2000).

Après avoir expliqué le problème de base que nous souhaitons optimiser, en détaillant les fonctionnalités des hypothèses, nous allons désormais détailler 3 organes de notre formulation :

- Les nœuds consommateurs (C) à approvisionner en chaleur.
- Les nœuds potentiels de production de chaleur (P) avec leur(s) technologie(s) respective(s).
- Les canalisations reliant les nœuds entre eux (LXZ). La canalisation XZ est la canalisation (line) existante entre un nœud X (P ou C) à un nœud Z (C ou P). La direction est gérée par le nom de la variable entre X et Z. Il y a également deux informations supplémentaires pour les canalisations entre consommateurs, le sens est géré avec deux indices (j et o) et un dénominalif est ajouté pour différencier l'approvisionnement en parallèle ou en cascade. La connexion entre 2 consommateurs (CC) est autorisée, alors qu'entre deux producteurs (PP) elle est exclue.

Une différence notable entre ces 3 organes est que les nœuds consommateurs n'ont pas de variables binaires pour gérer les existences (contrairement aux nœuds producteurs ou aux canalisations).

2.2 NŒUD CONSOMMATEUR

2.2.1 SUPERSTRUCTURE

Comme défini à la section (1.2.3), rappelons qu'une superstructure regroupe l'ensemble des alternatives structurelles existantes, parmi lesquelles sera choisi le procédé optimal.

La superstructure d'un nœud consommateur (C_j ou C_o) est représentée Figure 2-9. Comme précédemment, les variables continues sont en vert, les variables binaires en orange et les données d'entrée d'entrée en bleu. Toutes les températures sont représentées, mais, par souci de lisibilité, les diamètres, les vitesses, les débits et les pressions ne sont pas indiqués.

Une telle superstructure admet de nombreuses intersections (Figure 2-9) qui permettent :

- en A : d'autoriser l'approvisionnement du nœud consommateur à partir de différents courants (provenant d'un producteur, d'un consommateur en parallèle ou d'un consommateur en cascade) ;
- en B : potentiellement au courant de se séparer, avant l'échangeur, pour approvisionner un autre consommateur en parallèle ;
- en C : une 2ème éventuelle séparation du courant juste après l'échangeur pour approvisionner en cascade un autre consommateur ;
- en D : le retour éventuel d'un autre consommateur ;
- en E : en sortie du nœud, il y a plusieurs retours possibles (vers d'autres consommateurs ou vers un producteur).

Contrairement au nœuds producteurs ou aux canalisations, un nœud consommateur existe toujours. Pour laisser la possibilité de raccorder, ou non, un consommateur au réseau, nous n'avons pas choisi d'ajouter une variable d'existence sur l'échangeur de chaleur présent dans le nœud consommateur. En effet, cela rajouteraient un grand nombre de variables alors que la plupart du temps il est souhaité de relier les consommateurs au réseau principal. Par contre, il se peut que la question du raccordement se pose pour certains consommateurs. Cette analyse est possible en leur rajoutant un lieu de production qualifié « isolé ».

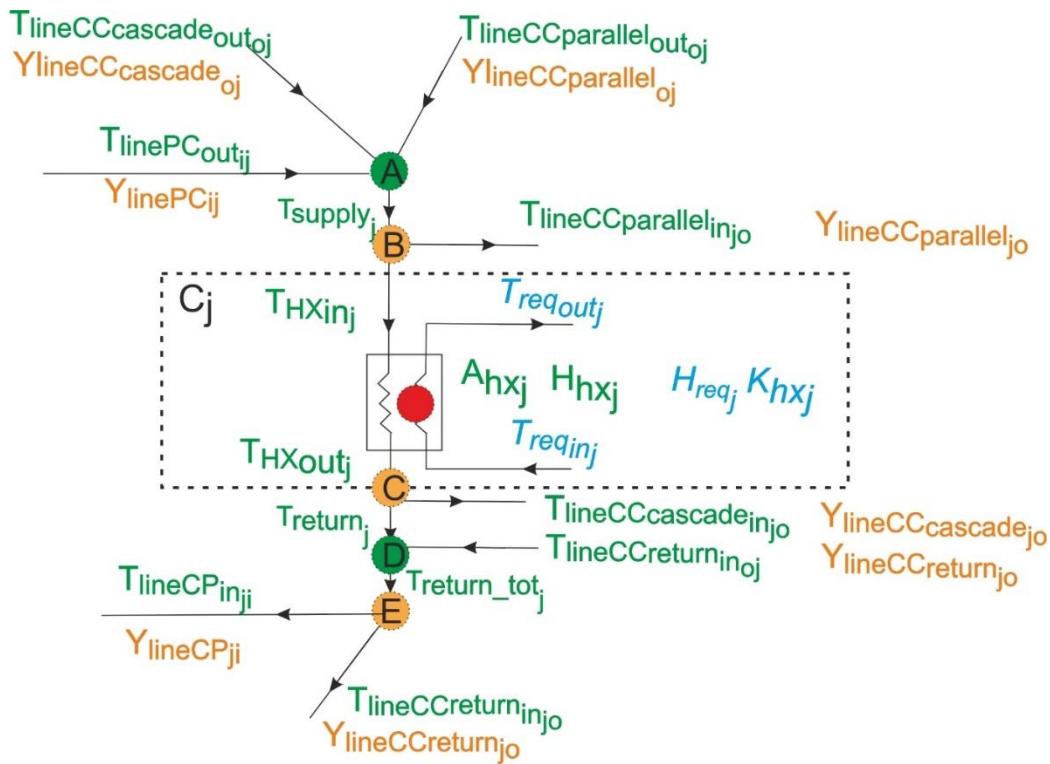


Figure 2-9 Superstructure d'un nœud consommateur

Le Tableau 2-4 recense les données d'entrée relatives au nœud consommateur. Sont connus en entrée du problème : leur localisation, la puissance nominale requise ainsi que le niveau de température demandé (au départ du réseau secondaire T_{req_out} et en retour T_{req_in}). De plus concernant l'échangeur de chaleur, le coût d'investissement unitaire est renseigné, ainsi que le pincement, le coefficient d'échange de chaleur et les pertes de charge.

Tableau 2-4 Liste des données d'entrée pour un nœud consommateur

x _{C_j} et z _{C_j}	Coordonnées du nœud C _j , utile pour calculer la distance entre 2 nœuds.	m
H _{reqj}	La puissance nominale requise sur la période.	W
T _{req-inj} T _{req-outj}	Température en entrée ou en sortie du réseau de distribution dans le bâtiment suivant le régime de température demandée. Ces valeurs sont déterminées par la loi d'eau.	°C
Capex _{hxunita} Capex _{hxunitb}	Coefficient de la relation linéaire du coût unitaire de l'échangeur de chaleur.	€/W €
K _{hx}	Coefficient d'échange de l'échangeur de chaleur.	W/(m ² .K)
T _{hxpinch}	Pincement minimum requis par l'échangeur de chaleur.	°C
D _{P_{hxunit}}	Perte de charge dans l'échangeur de chaleur.	Pa

2.2.2 CONTRAINTES

CONSERVATION DE LA MATIERE SUR UN NŒUD CONSOMMATEUR

Avec la conservation des débits entrant dans un nœud consommateur [Eq 2-1], avant l'échangeur de chaleur (en A - Figure 2-9), le courant peut soit venir d'un nœud producteur, soit d'un autre nœud consommateur (en parallèle ou en cascade).

$\forall j \in \{1, n_C\}$	$\sum_i M_{linePC}(i, j) + \sum_{o \neq j} M_{lineCC_parallel}(o, j) + \sum_{o \neq j} M_{lineCC_cascade}(o, j) = M_{supply}(j)$	Eq 2-1
----------------------------	--	------------------------

Il y a conservation des débits juste avant l'échangeur de chaleur [Eq 2-2], où une 1^{ère} séparation est autorisée (en B - Figure 2-9). Cette bifurcation est qualifiée de parallèle.

$\forall j \in \{1, n_C\}$	$M_{supply}(j) = M_{hx}(j) + \sum_{o \neq j} M_{lineCC_parallel}(j, o)$	Eq 2-2
----------------------------	---	------------------------

Les débits entre l'entrée B et la sortie C de l'échangeur de chaleur se conservent [Eq 2-3]. Une séparation de courant est possible (en C - Figure 2-9), juste après l'échangeur de chaleur. Elle est qualifiée de connexion en cascade.

$\forall j \in \{1, n_C\}$	$\forall j \in \{1, n_C\}; M_{hx}(j) = M_{return}(j) + \sum_{o \neq j} M_{lineCC_cascade}(j, o)$	Eq 2-3
----------------------------	--	------------------------

D'après la conservation des débits [Eq 2-4] avant de sortir du nœud consommateur (en D - Figure 2-9), il y a un mélange avec les canalisations revenant d'autre(s) consommateur(s).

$\forall j \in \{1, n_C\}$	$\forall j \in \{1, n_C\}; M_{return}(j) + \sum_{o \neq j} M_{lineCC_return}(o, j) = M_{return_tot}(j)$	Eq 2-4
----------------------------	---	------------------------

En sortant d'un nœud consommateur (en E - Figure 2-9), le courant peut retourner soit directement à un nœud producteur, soit à un autre nœud consommateur (Eq 2-5).

$\forall j \in \{1, n_C\}$	$M_{return_tot}(j) = \sum_i M_{lineCP}(j, i) + \sum_{o \neq j} M_{lineCCreturn}(j, o)$	Eq 2-5
----------------------------	--	------------------------

BILANS D'ENTHALPIE OU EGALITE DE TEMPERATURE AUX INTERSECTIONS

En présence d'un nœud convergent, le principe de la conservation d'énergie est appliqué. Lorsque le courant se divise, il suffit d'indiquer une égalité de température.

Par exemple, avant l'entrée de l'échangeur (en B - Figure 2-9), l'égalité des températures est appliquée pour les 2 courants : avec une contrainte écrite avec la méthode du bigM [Eq 2-6] (car la canalisation CCparallel n'existe pas forcément) et avec une égalité pour la température en entrée de l'échangeur [Eq 2-7]. De telle égalité de température a lieu aux intersections divergentes suivantes : C (en sortie de l'échangeur de chaleur) et E (en sortie de sous-station). La méthode du bigM permet de n'ajouter la contrainte que lorsque la variable binaire est égale à 1 (dans ce cas, les deux inégalités deviennent une égalité). Sinon, lorsque la variable binaire est nulle, comme la valeur de bigM qui est prise 1000 fois supérieure à TSupply, cette contrainte n'est jamais saturée.

$\forall j, o \in \{1, n_C\}$ et $o \neq j$	$T_{Supply(j)} \leq T_{lineCCparallel_{in(j,o)}} + T_{bigM} \cdot (1 - Y_{lineCCparallel(j,o)})$ $T_{Supply(j)} \geq T_{lineCCparallel_{in(j,o)}} - T_{bigM} \cdot (1 - Y_{lineCCparallel(j,o)})$	Eq 2-6
$\forall j, o \in \{1, n_C\}$	$T_{Supply(j)} = T_{hx_{in(j)}}$	Eq 2-7

Pour les intersections convergentes, comme en A en entrée d'un nœud consommateur, la conservation d'enthalpie est écrite [Eq 2-8] : la puissance sortant de l'échangeur est égale à la somme de la puissance retournant directement à la production ou la puissance allant vers un autre consommateur. L'écriture des bilans d'enthalpies est détaillée (Annexe C) avec comme principales hypothèses pour l'écriture des enthalpies de considérer la capacité thermique massique de l'eau liquide comme une constante et des enthalpies de référence nulle à l'état de référence (liquide 0°C).

$\forall j \in \{1, n_C\}$	$M_{supply}(j) \cdot C_p \cdot T_{supply}(j)$ $= \sum_i M_{linePC}(i, j) \cdot C_p \cdot T_{linePC_{out}}(i, j)$ $+ \sum_o M_{lineCC_parallel}(o, j) \cdot C_p \cdot T_{lineCC_parallel_{out}}(o, j)$ $+ \sum_o M_{lineCC_parallel}(o, j) \cdot C_p \cdot T_{lineCC_parallel_{out}}(o, j)$	Eq 2-8
----------------------------	--	------------------------

BILAN SUR LA PUISSANCE LIVREE A L'ECHANGEUR DE CHALEUR

D'après l'Hypothèse# 8, le consommateur est modélisé par un échangeur de chaleur à contre-courant. Les températures des 2 courants qui se croisent dans l'échangeur de chaleur sont représentées sur la Figure 2-10. Les différences de température sont écrites du côté chaud [Eq 2-9] et du côté froid [Eq 2-10]. Ainsi l'écriture de la différence logarithmique s'écrit facilement [Eq 2-11]. Il est utile de séparer ces équations afin de pouvoir borner DT1 et DT2 au pincement de l'échangeur.

$\forall j \in \{1, n_C\}$	$DT1_{(j)} = T_{HX_{in}(j)} - T_{req_{out}(j)}$	Eq 2-9
	$DT2_{(j)} = T_{hx_{out}(j)} - T_{req_{in}(j)}$	Eq 2-10
	$LMTD_{(j)} = \frac{DT1_{(j)} - DT2_{(j)}}{\ln\left(\frac{DT1_{(j)}}{DT2_{(j)}}\right)}$	Eq 2-11

Avec cette méthode de modélisation de l'échangeur de chaleur, la puissance échangée à l'échangeur de chaleur s'écrit [Eq 2-12], avec notamment un coefficient d'échange.

$\forall j \in \{1, n_C\}$	$H_{hx(j)} = K_{hx} \cdot A_{hx(j)} \cdot LMTD_{(j)}$	Eq 2-12
----------------------------	---	-------------------------

Rappelons qu'il est également possible (Fonctionnalité# 9) qu'un nœud soit « non » consommateur, afin de représenter une bifurcation. Il faut qu'il soit renseigné en entrée (Hypothèse# 11). Un tel nœud « bifurcation » est un nœud consommateur avec des températures requises égales en départ et en retour pour le réseau secondaire et une puissance requise nulle (donc dans la fonction objectif, pas de coûts de consommation [Eq 2-63] et pas d'investissement [Eq 2-73]).

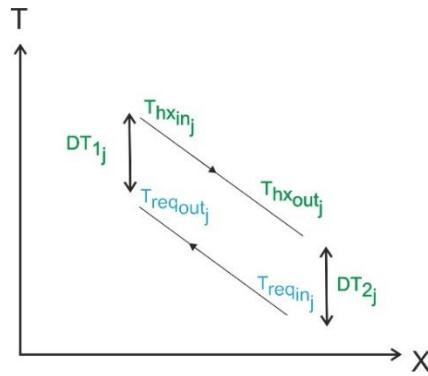


Figure 2-10 Représentation des courants avec leurs températures dans un échangeur de chaleur contre-courant

Hypothèses :

- Le coefficient d'échange est considéré constant. Ce coefficient renseigné dans les données d'entrée est pris égal à $K_{hx}=2\ 000\ W/(m^2.K)$. (KUOSA *et al.* 2014) calculent précisément ce coefficient d'échange qui varie dans leur cas entre 1100 et 1500 $W/(m^2.K)$. (RAMOS BERMUDEZ 2007) a pris une valeur constante à 50 $W/(m^2.K)$. Une consolidation du prix de l'échangeur (lié à ses performances) est prévue avec TECNALIA, notre partenaire sur le projet THERMENERGY.
- Rappelons ici que même si les bâtiments ne sont pas modélisés en détail, leur performance énergétique est prise en compte via une loi d'eau (Hypothèse# 10) : classiquement deux cas extrêmes de température de distribution pour des vieux radiateurs à un haut régime de température 90/70 °C et pour un plancher chauffant un régime basse température 50/30 °C suffit.
- Un problème numérique se pose. En effet, le dénominateur du logarithme peut être nul durant le processus d'optimisation. Pour des raisons de simplification dans la résolution numérique, le logarithme est approximé par l'équation [Eq 2-13] d'après (CHEN 1987). Cette approximation est précise à plus de 10^5 degré Celsius près avec les gammes de température considérée (température entre 50 et 130°C) et pour un échangeur à plaque ayant un pincement de 1 à 10°C.

$\forall j \in \{1, n_c\}$	$LMTD_{(j)} \approx \left[DT1_{(j)} \cdot DT2_{(j)} \cdot \frac{1}{2} \cdot (DT1_{(j)} + DT2_{(j)}) \right]^{\frac{1}{3}}$	Eq 2-13
----------------------------	---	-------------------------

RESPECT DE LA SATISFACTION DES BESOINS

La puissance à installer doit être suffisante afin de pouvoir satisfaire les besoins de chaleur. Ceci peut s'écrire par une contrainte inégalité [Eq 2-14], la puissance des échangeurs doit permettre de satisfaire le besoin requis par la sous-station. Une égalité n'est pas écrite, car les égalités nécessitent un traitement supplémentaire (méthode de relaxation des équations, abordée à la sous-section 3.1.2) lors de la résolution. Or pour minimiser le coût, l'optimiseur ne va pas choisir une option plus chère en installant une puissance supérieure à celle nécessaire.

$\forall j \in \{1, n_c\}$	$H_{hx}(j) \geq H_{req}(j)$	Eq 2-14
----------------------------	-----------------------------	-------------------------

BILAN EGALITE DE PRESSION AU NŒUD CONSOMMATEUR

Sur la superstructure du nœud consommateur (Figure 2-9), pour toutes les intersections numérotées de A à E, qu'elles soient convergentes ou divergentes, une égalité des pressions est écrite. Du fait du problème combinatoire, les bilans sont écrits avec la méthode du bigM. Par exemple, les égalités de pressions à l'intersection A sont prises en compte avec les équations respectives : [Eq 2-15] lorsque les canalisations PC existent, [Eq 2-16] lorsque les canalisations CC_parallel existent et [Eq 2-17] lorsque les canalisations en cascade existent.

$\forall i \in \{1, n_p\}$	$P_{linePC_out(i,j)} \leq P_{supply(j)} + P_{bigM} \cdot (1 - Y_{linePC(i,j)})$	Eq 2-15
$\forall j \in \{1, n_c\}$	$P_{linePC_out(i,j)} \geq P_{supply(j)} - P_{bigM} \cdot (1 - Y_{linePC(i,j)})$	
$\forall j \in \{1, n_c\}$	$P_{lineCC_parallel_out(o,j)} \leq P_{supply(j)} + P_{bigM} \cdot (1 - Y_{lineCC_parallel(o,j)})$	Eq 2-16
	$P_{lineCC_parallel_out(o,j)} \geq P_{supply(j)} - P_{bigM} \cdot (1 - Y_{lineCC_parallel(o,j)})$	
	$P_{lineCC_cascade_out(o,j)} \leq P_{supply(j)} + P_{bigM} \cdot (1 - Y_{lineCC_cascade(o,j)})$	Eq 2-17
	$P_{lineCC_cascade_out(o,j)} \geq P_{supply(j)} - P_{bigM} \cdot (1 - Y_{lineCC_cascade(o,j)})$	

PERTE DE CHARGE DANS L'ECHANGEUR DE CHALEUR

De par la complexité du problème, les pertes de charge dans l'échangeur de chaleur ne sont pas calculées finement. Une perte de charge constante de 20 kPa est prise en compte dans le passage de l'échangeur de chaleur [Eq 2-18]. Cette valeur, renseignée dans les données d'entrées, est un ordre de grandeur conseillée par les directives de l'association finlandaise des RCU, p. ex une telle valeur est utilisée par (KUOSA et al. 2014).

$\forall j \in \{1, n_c\}$	$P_{hx_in(j)} = P_{hx_out(j)} + DP_{hx_unit}$	Eq 2-18
----------------------------	--	-------------------------

2.2.3 BORNES ET INITIALISATIONS

Les bornes (inférieures et supérieures - notifiées respectivement min et max dans les équations) des variables spécifiques au nœud consommateur sont synthétisées dans le Tableau 2-5, tout comme les valeurs utilisées pour l'initialisation (colonne de droite).

Il n'y a pas de dimensionnement en diamètre ou vitesse dans le nœud consommateur.

Températures

Toutes les températures sont bornées en cohérence avec les bornes inférieures [Eq 2-19] (respectivement supérieures [Eq 2-20]) de températures minimales (respectivement maximales) autorisées par les technologies de production (renseignée en données d'entrée). Par exemple la température avant l'échangeur est bornée avec [Eq 2-21] et en sortie de l'échangeur avec [Eq 2-22].

Un message d'erreur est ajouté pour facilement détecter une incohérence dans les données d'entrée, lorsque la température maximale autorisée en sortie de production ne peut pas approvisionner la température maximale demandée par le consommateur (avec une marge de 2°C pour les pertes thermiques en plus du pincement de l'échangeur de chaleur).

Les températures sont initialisées à la valeur de leurs bornes supérieures respectives (colonne de droite Tableau 2-5).

$\forall k \in \{1, n_k\}$	$T_{min} = \min(T_{prod_{in_min}(k)})$	Eq 2-19
	$T_{max} = \max(T_{prod_{out_max}(k)})$	Eq 2-20
$\forall j \in \{1, n_c\}$	$\min(T_{req_out(j)}) + T_{hx_pinch} \leq T_{supply(j)} \leq T_{max}$	Eq 2-21
	$T_{min} \leq T_{return(j)} \leq \min(T_{req_in(j)}) + T_{hx_pinch}$	Eq 2-22

Pressions

Les bornes et initialisations des pressions seront présentées de manière générique dans la sous-section (2.4.3) relative aux canalisations.

Débits et aire de l'échangeur

Il est nécessaire d'ajouter une borne inférieure au débit (M_{hx}) dans l'échangeur du nœud consommateur [Eq 2-23] ainsi que sur l'aire d'échange [Eq 2-24], sinon le problème NLP ne converge pas. Si le nœud j est une bifurcation, la puissance requise renseignée en entrée est nulle, ce qui implique un investissement nul [Eq 2-73].

$\forall j \in \{1, n_c\}$	$M_{min} \leq M_{hx(j)} \leq M_{max}$ avec $M_{min} = V_{min} \cdot \rho \cdot \frac{Dint_{min}^2}{4}$ et $M_{max} = V_{max} \cdot \rho \cdot \frac{Dint_{max}^2}{4}$	Eq 2-23
$\forall j \in \{1, n_c\}$	$A_{min(j)} \leq A_{hx(j)}$ $A_{min(j)} = \frac{H_{req(j)}}{K_{hx} \cdot DTLM_{(j)}}$	Eq 2-24

Tableau 2-5 Détails des bornes inférieures ou supérieures ainsi que des valeurs d'initialisation des variables spécifiques au nœud consommateur

Variables	Bornes inférieures	Bornes supérieures	Initialisation
T_{hx_in}	$T_{req_out(j)} + T_{hx_pinch}$	T_{max}	T_{max}
T_{hx_out}	T_{min}	$T_{req_in(j)} + T_{hx_pinch}$	$T_{req_in(j)} + T_{hx_pinch}$
P	P_{min}	P	P_{moy}
M_{hx}	M_{min} [Eq 2-23]	M_{max}	M_{min}
A_{hx}	$A_{hx_{min}}$ [Eq 2-24]	$10 \times A_{hx_{min}}$	A_{min}

2.3 NŒUD PRODUCTEUR

2.3.1 SUPERSTRUCTURE

La superstructure d'un nœud producteur P_i est représentée Figure 2-11. Ici aussi, pour plus de clarté, nous ne représentons que les températures et pas les pressions, ni les diamètres ou les vitesses dans les canalisations arrivant ou sortant du nœud producteur. Comme pour le nœud consommateur, les intersections en entrée et en sortie du nœud sont régies par des variables binaires. Mais contrairement au nœud consommateur, où l'échangeur existait toujours (pas de variables d'existence), dans le nœud producteur l'existence ou non d'une technologie est gouvernée par une variable binaire (Y_{Pik}). L'intersection F est l'entrée du nœud producteur, qui est le mélange de courants pouvant provenir de différents consommateurs. Il y a une séparation en G, afin d'autoriser d'éventuelles technologies k sur la localisation du nœud P_i . Ces technologies sont disposées en parallèle, il n'est pas possible de les ajouter en cascade. En H a lieu le mélange sortant des différentes technologies de production, avant de sortir du nœud producteur en I pour aller éventuellement vers plusieurs consommateurs. La consommation de chaleur éventuelle d'un nœud producteur n'est pas prise en compte.

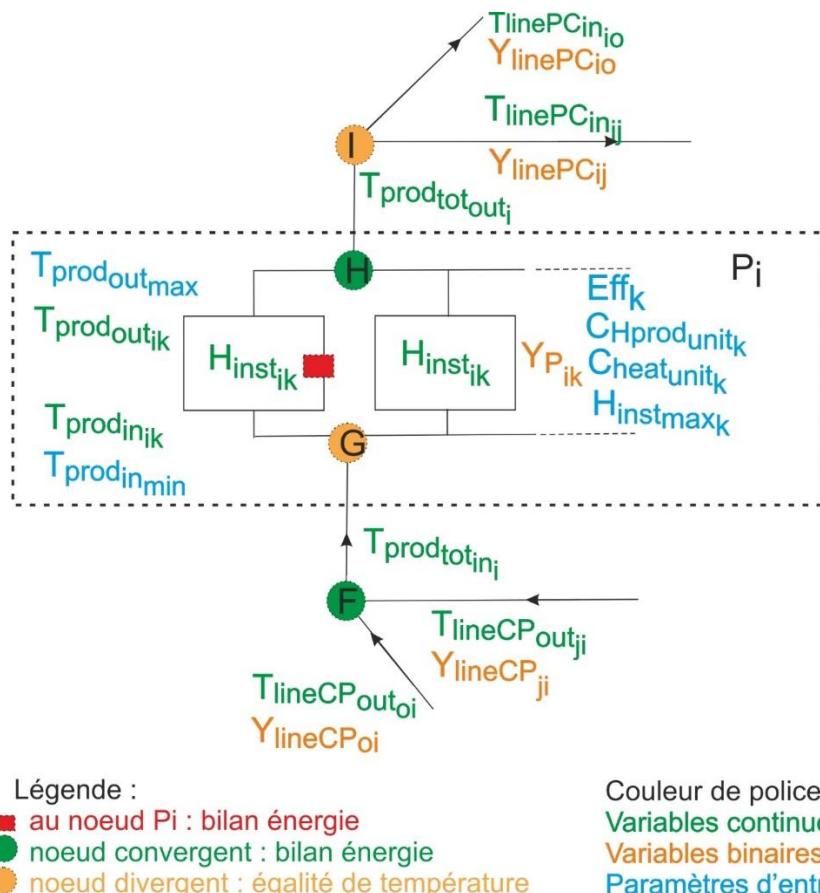


Figure 2-11 Superstructure d'un nœud producteur

Les données d'entrée relatives au nœud producteur sont détaillées dans le Tableau 2-6. La localisation du nœud est connue. Ensuite, par technologie, sont détaillés les coûts unitaires d'investissement et de fonctionnement, les températures minimales et maximales, la puissance maximale (facultatif) ainsi que le rendement.

Tableau 2-6 Liste des données d'entrée d'un nœud Producteur Pi

x_{P_i} et z_{P_i}	Coordonnées du nœud Pi, utile pour calculer la distance entre 2 nœuds.	m
$H_{inst_max}(k)$	Puissance maximale d'une technologie k.	W
$Capex_{heat_unit}(k)$	Coefficient de la relation linéaire du coût unitaire de la chaleur.	€/Wh
$Capex_{Hprod_unit}(k)$	Coefficient de la relation linéaire du coût unitaire d'investissement dans la technologie k de production.	€/W
$T_{prod_out_max}(k)$	Température maximale de sortie de la technologie de production k.	°C
$T_{prod_in_min}(k)$	Température minimale d'entrée de la technologie de production k.	°C
$Eff(k)$	rendement de la technologie k.	%

2.3.2 CONTRAINTES

EXISTENCE DES UNITES DE PRODUCTION

La puissance installée est une variable pour un nœud producteur. Il est nécessaire de l'annuler [Eq 2-25] si la variable binaire d'existence est nulle.

$\forall k \in \{1, n_k\} \text{ et } \forall i \in \{1, n_p\}$	$H_{inst}(i, k) \leq Y_P(i, k) \cdot H_{inst_max}$	Eq 2-25
---	---	-------------------------

Il y a très peu de contraintes sur les technologies de production. L'équation [Eq 2-26] est là pour qu'il y ait au moins un nœud producteur avec une technologie de production installée. L'équation [Eq 2-27] indique qu'il est impératif qu'au moins une canalisation PC existe pour distribuer la chaleur produite en P_i si une technologie est installée (peu importe la technologie de production).

$\forall k \in \{1, n_k\} \text{ et } \forall i \in \{1, n_p\}$	$\sum_{i,k} Y_P(i, k) \geq 1$	Eq 2-26
$\forall i \in \{1, n_p\} \text{ et } \forall j \in \{1, n_c\}$	$Y_{linePC}(i, j) \geq \sum_k Y_P(i, k)$	Eq 2-27

Il n'y a aucune obligation à avoir une technologie de production à chaque nœud. Le nombre de technologies n'est pas restreint, ce sera l'éventuelle limitation en puissance qui bornera la puissance à installer ainsi que le coût global à minimiser.

CONSERVATION MATIERE NŒUD PRODUCTEUR

En entrée d'un nœud producteur (en F - Figure 2-11), les courants peuvent venir d'autre(s) consommateur(s) [Eq 2-28]. Les liaisons entre nœuds producteurs ne sont pas autorisées. Notons bien même si sur le schéma (Figure 2-11), une température est spécifiée en entrée et sortie des unités de production, celles-ci sont parcourues par un débit identique, il n'est donc pas spécifié in ou out pour $M_{prod_{tot}}$.

$\forall i \in \{1, n_p\}$	$\sum_j M_{lineCP}(j, i) = M_{prod_{tot}}(i)$	Eq 2-28
----------------------------	---	-------------------------

Il est possible sur une localisation d'un nœud producteur d'avoir plusieurs technologies de production en parallèle, mais pas en cascade (Hypothèse# 14). L'équation [Eq 2-29] est valable en G et H de la

Figure 2-11 car toute l'eau arrivant à un nœud producteur doit en ressortir. Il n'y a ni fuite ni ajout d'eau en chaufferie.

$\forall i \in \{1, n_P\}$	$M_{prod_{tot}}(i) = \sum_k M_{prod}(i, k)$	Eq 2-29
----------------------------	---	-------------------------

Enfin il y a aussi conservation des débits [Eq 2-30] (en I Figure 2-11) sortie de la production.

$\forall i \in \{1, n_P\}$	$M_{prod_{tot}}(i) = \sum_j M_{linePC}(i, j)$	Eq 2-30
----------------------------	---	-------------------------

BILAN D'ENTHALPIE ET EGALITE DE TEMPERATURE AUX INTERSECTIONS

Sur les intersections de convergence F et H d'un nœud de production (Figure 2-11), des équations de conservation de l'enthalpie sont écrites, semblable à l'équation [Eq 2-8]. Et sur les intersections divergentes G et I, des contraintes d'égalité de température sont ajoutées, de manière similaire à l'équation [Eq 2-6].

BILAN DE PUISSANCE A INSTALLER

De plus, la puissance à installer en Pi pour la technologie k est égale à la production entre la sortie et l'entrée, modulée avec le rendement (Eff_k) oscillant entre 70 et 90% suivant la technologie. La définition n'a lieu d'être que si l'unité existe, ce qui est traduit avec les 2 inégalités [Eq 2-31] et [Eq 2-32]. On notera bien que le débit et les températures sont des variables à optimiser simultanément, ce qui implique que ces inégalités sont non-linéaires. La base de données des technologies, avec leurs coûts d'investissements, de fonctionnement (de maintenance), les rendements et les émissions de GES est en cours de consolidation avec TECNALIA, notre partenaire sur le projet.

Dans les modèles les plus précis, la capacité thermique massique est une fonction dépendante de la température [Eq 2-33], autrement elle est prise constante (estimée à 80 °C).

$\forall i \in \{1, n_P\}$ et $\forall k \in \{1, n_k\}$	$H_{inst}(i, k) \leq \frac{M_{prod}(i, k) \cdot \left(cp_{(T_{prod_{out}}(i, k))} \cdot T_{prod_{out}}(i, k) - cp_{(T_{prod_{in}}(i, k))} \cdot T_{prod_{in}}(i, k) \right)}{Eff(k)} + H_{inst_{bigM}} \cdot (1 - Y_{P(i, k)})$	Eq 2-31
	$H_{inst}(i, k) \geq \frac{M_{prod}(i, k) \cdot \left(cp_{(T_{prod_{out}}(i, k))} \cdot T_{prod_{out}}(i, k) - cp_{(T_{prod_{in}}(i, k))} \cdot T_{prod_{in}}(i, k) \right)}{Eff(k)} - H_{inst_{bigM}} \cdot (1 - Y_{P(i, k)})$	Eq 2-32
$\forall T \in [30, 150^\circ C]$	$Cp_{(T)} = Cp_3 \cdot T^3 + Cp_2 \cdot T^2 + Cp_1 \cdot T + Cp_0$	Eq 2-33

Comme souligné dans la synthèse de l'état de l'art (1.3.4), une seule fonction objectif est considérée (le coût global). En effet, il n'y a pas d'optimisation pour maximiser l'introduction d'EnR&R dans le mix énergétique. Par contre, une contrainte peut être ajoutée [Eq 2-34] pour imposer une puissance minimale provenant d'ENR&R ($Hinst_RES_min$) dans le mix énergétique. Dans le cadre de création de nouveaux RCU, la subvention du fonds de chaleur de l'ADEME est conditionnée par un minimum de

50% d'EnR&R (ADEME et CETE Ouest 2012). Une contrainte similaire pourrait être ajoutée pour limiter les émissions de GES. Pour l'instant, les émissions de GES ne sont calculées qu'en tant qu'indicateur de performance.

	$\sum_{i,k_{RES}} H_{inst}(i, k_{RES}) \geq H_{inst_RES_min} \cdot H_{int_{tot}}$	Eq 2-34
--	---	-------------------------

BILAN EGALITE DE PRESSION AU NŒUD PRODUCTEUR ET DIMENSIONNEMENT DE POMPAGE

Sur la superstructure du nœud consommateur (Figure 2-11), pour toutes les intersections numérotées de F à I, qu'ils soient convergents ou divergents, une égalité des pressions est écrite, comme pour le nœud consommateur avec les équations [Eq 2-15 à Eq 2-17].

Entre les intersections H et G de la (Figure 2-11), il faut qu'un organe de pompage soit présent pour distribuer l'eau chaude dans les canalisations. Une hypothèse a été faite que les organes de pompage soient tous situés en chaufferie. Aucune pompe en appont n'est prévue sur le réseau. Dans la section (2.5) sur la définition de la fonction objectif, l'équation [Eq 2-35] permet de connaître le dimensionnement de la pompe pour la technologie k du lieu de production i nécessaire pour compenser les pertes de charge.

$\forall k \in \{1, n_k\}$ et $\forall i \in \{1, n_P\}$	$P_{prod_{out}}(i, k) = P_{prod_{in}}(i, k) + P_{pump}(i, k)$	Eq 2-35
--	---	-------------------------

2.3.3 BORNES ET INITIALISATIONS

Après avoir défini la superstructure et les équations du nœud producteur, intéressons-nous aux bornes et aux initialisations des variables spécifiques à ce nœud producteur. Une synthèse est proposée dans le Tableau 2-7.

Les bornes et initialisations des températures ont été détaillées sous-section (2.2.3) au nœud consommateur.

Toutes les puissances à installer sont individuellement **bornées** à 1,5 fois la somme des puissances à fournir [Eq 2-57], ainsi nous sommes assurés que quelle que soit la technologie choisie, elle pourra satisfaire l'ensemble des besoins thermiques des consommateurs en incluant les pertes thermiques dans le réseau. Des bornes peuvent être manuellement ajoutées, notamment dans les cas d'une pression foncière, d'un gisement en EnR&R limité ou d'un point de vue technique (une EnR&R ne pourra pas faire 100% des appels en puissance sans un surdimensionnement ruineux, une technologie flexible et disponible pour satisfaire les pointes devra être installée).

$\forall i \in \{1, n_P\}$	$H_{inst(i,k)} \leq 1,5 \cdot \sum_j H_{req(j)}$	Eq 2-36
----------------------------	--	-------------------------

Les variables binaires d'une technologie k sur un lieu Pi sont **initialisées** à exister ($Y_{i,k}=1$) si c'est une technologie dite principale sur un lieu principal. Les nombres de lieux de production principaux et de technologies principales (n_{P_princ} et n_{k_princ}) sont renseignés en données d'entrée. Il faut faire attention de renseigner les lieux de production, non pas par proximité géographique, mais par catégorie (chaufferie principale ou non). Ils ne sont pas forcés à exister, c'est une astuce afin de ne pas initialiser **tous** les $Y_{i,k}$ à exister. Une telle astuce est nécessaire car si aucun lieu de production n'est initialisé à exister, le problème MINLP ne converge pas. De manière analogue, la puissance est initialisée grâce à

Chapitre 2 : Formulation du problème

l'équation [Eq 2-37]. Les technologies des énergies renouvelables (k_{EnR}) sont initialisées à exister également ($Y_P(i, k_{EnR})=1$).

$\forall i \in \{1, n_{P_princ}\}$	$H_{inst(i,k)} \cdot l = 1,5 \cdot \sum_j H_{req(j)}$	Eq 2-37
$\forall k \in \{1, n_{k_princ}\}$		

Tableau 2-7 Détails des bornes inférieures ou supérieures ainsi que des valeurs d'initialisation des variables spécifiques au nœud consommateur

Variables	Bornes inférieures	Bornes supérieures	Initialisation
$T_{prod_tot_out(i)}$	T_{min}	T_{max}	T_{max}
$T_{prod_out(i,k)}$	$T_{req_out} + T_{hx_pinch}$	$T_{prod_out_max(k)}$	$T_{prod_out_max(k)}$
$T_{prod_in(i,k)}$	$T_{prod_in_min(k)}$	$T_{prod_out_max(k)}$	$T_{prod_in_min(k)}$
$T_{prod_tot_in(i)}$	$T_{borne_min_calcul}$	T_{max}	T_{max}
$H_{inst(i, princ, k, princ)}$	0	[Eq 2-36]	[Eq 2-37]
$H_{inst(i,k)}$			0
$Y_P(i_{princ}, k_{princ})$	0	1	1
$Y_P(i,k)$			0

2.4 LES CANALISATIONS

2.4.1 SUPERSTRUCTURE

Afin de relier les nœuds producteurs aux nœuds consommateurs ou les nœuds consommateurs entre eux, il est nécessaire d'introduire un 3^{ème} type d'« objet » à la formulation du problème : les canalisations. La canalisation XZ est la canalisation (line) existante entre un noeud X vers un noeud Z. Il a été nécessaire de créer deux indices pour le nœud consommateur afin de pouvoir laisser la possibilité de créer des liaisons entre consommateurs.

Il y a 5 types de canalisations qui sont représentées en entrée et sortie du nœud consommateur et du nœud producteur : PC, CP, CC_parallel, CC_cascade et CC_return.

Les variables continues relatives aux canalisations (Figure 2-12) sont : les températures en entrée et en sortie, le débit, la vitesse, le diamètre intérieur et le diamètre extérieur. L'existence d'une canalisation est gouvernée par une variable binaire.

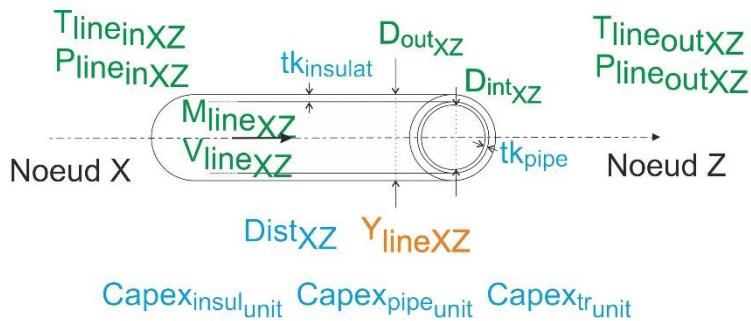


Figure 2-12 Schéma d'une canalisation XZ : variables continues (verts), binaires (orange) et les données d'entrée (bleu)

Comme détaillé dans le Tableau 2-8, l'épaisseur d'isolant (Hypothèse# 4) et l'épaisseur d'acier (Hypothèse# 5) sont des données d'entrée constantes. Les coûts unitaires liés au coût des matériaux de la canalisation et le coût du génie civil pour creuser les tranchées sont également des données d'entrée.

Tableau 2-8 Liste des données d'entrée relatives à une canalisation

$tk_{pipe,i,j}$	Epaisseur d'acier.	m
$tk_{insul,i,j}$	Epaisseur d'isolation.	m
$Capex_{pipe_unit}^a$	Coefficient de la relation linéaire du coût unitaire de la canalisation (proportionnel au produit du diamètre avec la longueur de la canalisation), incluant acier et isolant.	€/m ²
$Capex_{pipe_unit}^b$		€
$Capex_{trunit}$	Coût unitaire de la tranchée (proportionnel à la longueur de canalisation) pour une canalisation AR, comprenant les travaux de génie civil.	€/m

2.4.2 CONTRAINTES

EXISTENCE DES CANALISATIONS

La distance entre les nœuds X et Z est calculée [Eq 2-38]. Toutes les distances Dist_XZ existent contrairement aux canalisations L_XZ ou L_ZX qui elles sont liées à l'existence de la canalisation [Eq 2-40]. Dans ce cas, la direction de la canalisation a son importance (il est géré par un nom différent avec des indices inversés), ce qui n'est pas le cas pour la distance qui quelle que soit la direction est la même.

$\forall i \in \{1, n_p\}$	$Dist_{xz} = \sqrt{(x_z - x_x)^2 + (z_z - z_x)^2}$	Eq 2-38
$\forall j, o \in \{1, n_c\}$		

La canalisation entre 2 nœuds consommateurs existe que si les nœuds consommateurs sont distincts [Eq 2-39]. Cette équation est valable en parallèle, en cascade ou au retour entre consommateurs.

$\forall j \in \{1, n_c\}$	$Y_{lineCC}(j, j) = 0$	Eq 2-39

La distance (Dist) existe toujours, mais ce n'est pas forcément le cas pour la canalisation (L), ce que reflète l'équation [Eq 2-40] : si la canalisation n'existe pas (Y_{lineXZ} est nul) alors L_{xz} est bien nul également.

$\forall i \in \{1, n_p\}$	$L_{xz} = Y_{lineXZ} \cdot Dist_{xz}$	Eq 2-40
$\forall j, o \in \{1, n_c\}$		

De par notre positionnement, les canalisations ne sont pas forcément obligées d'être aller-retour dans une même tranchée. Si l'optimisation estime qu'une canalisation aller-retour est rentable, le coût de la tranchée n'est pas doublé (détaillé dans la section fonction objectif [Eq 2-71]). L'équation [Eq 2-41] permet de forcer les canalisations entre P et C à être aller-retour si on le souhaite. L'équation [Eq 2-42] permet de forcer la canalisation retour à exister si au moins l'une des canalisations aller (parallèle ou cascade) existe.

$\forall i \in \{1, n_p\}$	$Y_{linePC}(i, j) = Y_{lineCP}(j, i)$	Eq 2-41
$\forall j \in \{1, n_c\}$	$Y_{lineCCreturn}(o, j) \geq Y_{lineCCparallel}(j, o) + Y_{lineCCcascade}(j, o)$	Eq 2-42
$\forall o \in \{1, n_c\}$		

EXISTENCE DES DEBITS

Il faut faire attention à bien annuler les débits par la méthode du big M si les canalisations n'existent pas. Ce qui est traduit dans l'équation [Eq 2-43] lorsque la canalisation allant du nœud X au nœud Z n'existe pas, alors la variable d'existence est nulle ($Y=0$) et donc le débit (M) allant de X vers Z est également nul. Notons que comme le débit est déclaré en variable positive, il n'est pas besoin de rajouter une contrainte pour s'assurer que la valeur reste positive.

$\forall i \in \{1, n_p\}$	$M_{lineXZ} \leq Y_{lineXZ} \cdot M_{max}$	Eq 2-43
$\forall j \in \{1, n_c\}$		

CONSERVATION DE LA MATIERE DANS LES CANALISATIONS

Nous faisons l'hypothèse qu'aucune fuite n'a lieu dans les canalisations.

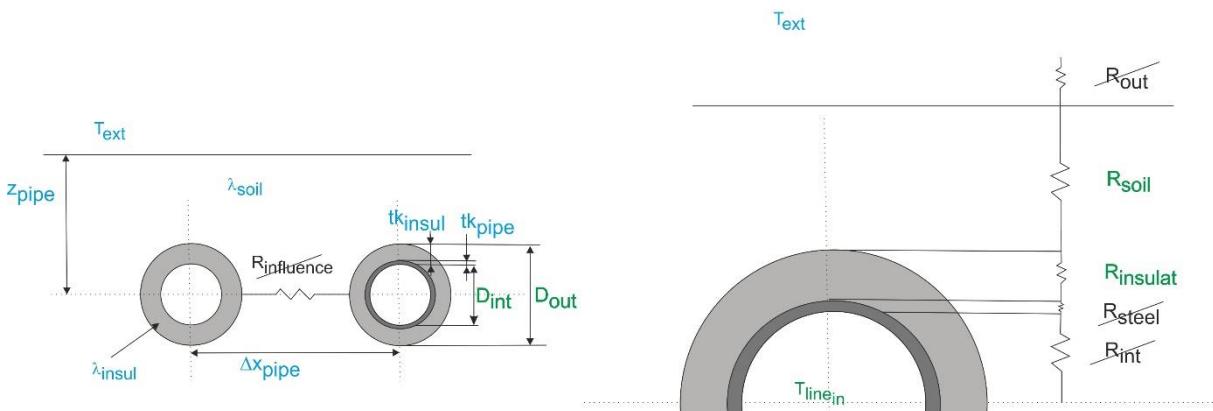
PRISE EN COMPTE DES PERTES THERMIQUES DANS LES CANALISATIONS

La température en sortie d'une canalisation est calculée en prenant en compte les pertes thermiques à l'aide de l'équation [Eq 2-44]. La démonstration est disponible (Annexe C). Pour rappel, la Figure 2-12 représente la canalisation. Grâce à une telle formulation, les pertes thermiques dépendent du niveau de température du réseau ainsi que du débit de distribution et du diamètre des canalisations.

La résistance thermique totale [Eq 2-47] est la somme des résistances thermiques relative à l'isolation [Eq 2-45] et du sol [Eq 2-46]. Les résistances thermiques sont représentées sur la Figure 2-13, celles barrées sont négligées (voir Annexe C).

Pour plus de détail sur le calcul des déperditions thermiques, se reporter à l'(Annexe C), ainsi qu'aux travaux de modélisation CFD des pertes thermiques (DALLA ROSA *et al.* 2010).

$\forall i \in \{1, n_p\}$ $\forall j, o \in \{1, n_c\}$	$T_{lineXZ_out} = T_{ext} + (T_{lineXZ_in} - T_{ext}) \cdot \exp\left(-\frac{\pi \cdot D_{outXZ} \cdot L_{xz}}{R_{totXZ} \cdot M_{lineXZ} \cdot c_p}\right)$	Eq 2-44
	$R_{insul_xz} = \frac{D_{intXZ}}{2 \lambda_{insul}} \cdot \ln\left(\frac{D_{outXZ}}{D_{intXZ}}\right)$	Eq 2-45
	$R_{soilXZ} = \frac{D_{intXZ}}{2 \lambda_g} \cdot \ln\left(\frac{4 z_{pipe}}{D_{outXZ}}\right)$	Eq 2-46
	$R_{totXZ} = R_{insulatXZ} + R_{soilXZ}$	Eq 2-47



[Figure 2-13 Canalisation en détail : variables, les données d'entrée et résistances thermiques](#)

Nous verrons au Chapitre 3 que dans notre stratégie de résolution, une étape utilisant un modèle MILP ne prend pas en compte les pertes thermiques. Dans ce cas les équations précédentes de [Eq 2-44] à [Eq 2-47] sont remplacées par l'égalité de la température en sortie de canalisation avec celle en entrée [Eq 2-48].

$\forall i \in \{1, n_p\}$ $\forall j, o \in \{1, n_c\}$	$T_{lineXZ_out} = T_{lineXZ_in}$	Eq 2-48
---	------------------------------------	-------------------------

PERTE DE CHARGE EN LIGNE

Concernant les pertes de charge, elles sont prises en compte entre l'entrée et la sortie de chaque canalisation XZ [Eq 2-49]. Les pertes de charge singulières sont ajoutées en considérant qu'elles représentent 30 % des pertes de charge totales. En effet, un calcul détaillé prenant en compte le

nombre de singularités (vannes, coudes...) ne peut être réalisé à ce niveau de précision, étant donné qu'un des objectifs de ces travaux est d'optimiser le maillage du réseau en lui-même. Quant aux pertes de charge linéaires, le coefficient de friction est estimé à partir de la formule de Blasius (valable en régime turbulent, ce qui est bien toujours le cas). La relation [Eq 2-50] se comprend intuitivement, les pertes de charge vont être d'autant plus grandes que la vitesse est importante, que la longueur de canalisation est importante et que le diamètre est faible. Lorsque la canalisation n'existe pas, le débit et la longueur de canalisation étant nuls, les pertes de charge sont bien nulles. Ainsi les pertes de charge (en kPa) sont calculées sur chaque canalisation XZ [Eq 2-50], avec comme données d'entrée $\alpha = 2,25$ et $\beta = 0,75$.

Le calcul de ces paramètres est explicité avec le calcul des pertes de charge (Annexe D). Gamma est calculé avec [Eq 2-51], où les caractéristiques de l'eau interviennent. Celles-ci peuvent être suivant le niveau de détail souhaité dans le modèle, soit des constantes (prises à 80 °C, température moyenne pour le régime classique de distribution du réseau primaire entre 90°C aller et 70°C retour), soit une fonction polynomiale de la température pour la viscosité [Eq 2-52] et la masse volumique [Eq 2-53]. Les coefficients sont déterminés par interpolation (Annexe B) sur la base des données des caractéristiques de l'eau liquide prise à saturation issues de (LEMMON *et al.*). Pour simplifier, les caractéristiques ont été prises à la température de sortie et non à une température moyenne entre l'entrée et la sortie, l'importance étant de prendre en compte les différents régimes de température.

Les résultats avec les différents modèles sont présentés Chapitre 4. Les résultats (section 4.1.1) justifient l'emploi d'une modélisation différente dès lors que la température du réseau n'est plus autour de 80°C à 10°C près.

	$DP_{lineXZ} = P_{lineXZ_in} - P_{lineXZ_out}$	Eq 2-49
$\forall i \in \{1, n_P\}$ $\forall j \in \{1, n_C\}$	$DP_{XZ} = \gamma_{XZ(T_{lineXZ_out})} \cdot \frac{L_{XZ} \cdot V_{XZ}^\alpha}{D_{ZX}^\beta}$	Eq 2-50
	$\gamma_{XZ(T)} = \frac{100}{70} \cdot \frac{(100 \cdot \mu_{XZ(T)})^{-0,25}}{2 \cdot \rho_{XZ(T)}^{-1,25}}$	Eq 2-51
	$\mu_{XZ(T)} = \mu_3 \cdot T^3 + \mu_2 \cdot T^2 + \mu_1 \cdot T + \mu_0$	Eq 2-52
	$\rho_{XZ(T)} = \rho_2 \cdot T^2 + \rho_1 \cdot T + \rho_0$	Eq 2-53

2.4.3 BORNES ET INITIALISATIONS

Les variables spécifiques aux nœuds consommateurs ont été détaillées dans les Tableau 2-5 et pour celles des nœuds producteurs dans le Tableau 2-7. Nous complétons cette description en détaillant si les variables sont bornées directement à partir des données d'entrée ou au travers d'équations.

4 CATEGORIES DE VARIABLES INITIALISEES ET BORNEES DIRECTEMENT A PARTIR DES DONNEES D'ENTREE

Quatre catégories de variables composent cette partie.

Températures

Voir section (2.2.3). Les températures sont définies à partir du maximum (resp. minimum) des températures autorisées entre sortie (resp. entrée) de chaufferies, qui elles sont définies dans les données d'entrée.

Diamètres

Les diamètres sont **tous** bornés [Eq 2-54] entre un diamètre inférieur et un diamètre supérieur, renseignés dans les données d'entrée à partir de données constructeurs.

$\forall i \in \{1, n_P\}$	$Dint_{min} \leq Dint_{lineXZ} \leq Dint_{max}$	Eq 2-54
$\forall j, o \in \{1, n_C\}$		

Les diamètres sont initialisés à la moitié entre la borne supérieure et la borne inférieure.

Pressions

Les pressions sont **toutes** définies [Eq 2-55], entre une borne inférieure et supérieure renseignées dans les données d'entrée. Pour aider l'utilisateur à choisir le bon ordre de grandeur à renseigner, il est possible de prendre des ratios (0,1 kPa/m et 10 kPa/m) avec une estimation de la longueur maximale du réseau. Ou alors d'établir un pré-calcul des pertes de charge, avec des caractéristiques de l'eau prise à une température, grâce à l'équation [Eq 2-50] avec des valeurs minimales (resp. maximales) pour la vitesse, une longueur de réseau estimée et le diamètre. Le pré-calcul de la pression de vapeur saturante n'est pas nécessaire, tant que l'on se situe sous 100°C (Annexe B).

$\forall i \in \{1, n_P\}$	$P_{min} \leq P_{lineXZ} \leq P_{max}$	Eq 2-55
$\forall j, o \in \{1, n_C\}$		

Les pressions sont initialisées à la moitié entre la borne supérieure et la borne inférieure.

Vitesses

Les vitesses sont bornées [Eq 2-56] par une vitesse maximale renseignée en entrée ($V_{max}=1$ m/s). Une contrainte modélisée avec la méthode du bigM [Eq 2-57] sert à imposer les vitesses à être supérieures à une vitesse minimale (renseignée dans les données d'entrée, $V_{min}=0,1$ m/s, non nulle) lorsque la canalisation existe.

$\forall i \in \{1, n_P\}$	$V_{lineXZ} \leq V_{max}$	Eq 2-56
$\forall j, o \in \{1, n_C\}$	$V_{min} \cdot Y_{lineXZ} \leq V_{lineXZ}$	Eq 2-57

Les vitesses sont initialisées à la moitié entre la borne supérieure et la borne inférieure.

BORNES ET INITIALISATIONS DES AUTRES VARIABLES

Lorsque ce n'est pas spécifié, l'initialisation est faite à la borne inférieure (qui peut être zéro pour les variables définies positives).

La distance maximale pour l'initialisation des canalisations (L_{lineXZ_init}) est une donnée d'entrée à renseigner (analyse de l'expert sur la taille du quartier considéré). Si la distance de la canalisation entre un nœud X et un autre nœud Z (L_{lineXZ}) est inférieure ou égale à cette distance alors la canalisation est initialisée à exister ($Y_{lineXZ}=1$). **Toutes** les canalisations admettent une borne maximale qui est la distance calculée ($Dist_{XZ}$) selon [Eq 2-38]. Les canalisations en cascade sont initialisées à exister uniquement lorsque les régimes de températures des consommateurs sont différents et que les consommateurs ne sont pas trop éloignés (L_{lineCC_init} renseignée en donnée d'entrée).

Tous les débits ont une borne supérieure (M_{max} défini [Eq 2-23]) et une inférieure définie à zéro excepté, sur le nœud consommateur comme vu précédemment sous-section (2.2.3). Les débits ne sont pas initialisés, sauf les débits dans l'échangeur de chaleur du nœud consommateur qui sont initialisés à la borne inférieure (différente de zéro) [Eq 2-23].

Concernant les bornes supérieures des propriétés physiques de l'eau, la viscosité μ est calculée grâce à l'équation [Eq 2-52], la masse volumique ρ avec l'équation [Eq 2-53] et gamma avec l'équation [Eq 2-51].

Toutes les variables de pertes de charge admettent une borne supérieure calculée avec [Eq 2-50].

Concernant les pertes thermiques, les résistances thermiques sont **toutes** bornées entre une borne inférieure (calculée avec le diamètre minimum dans [Eq 2-45] et [Eq 2-46]) et une borne supérieure (avec le diamètre maximum dans ces mêmes équations).

2.5 FONCTION OBJECTIF

La fonction objectif considérée est le coût global du réseau à N années. La période d'amortissement choisie dans tous nos cas d'étude est au maximum de 30 ans car, au-delà, une maintenance accrue et le remplacement d'équipements seraient à envisager. Avant 30 ans, l'ordre de grandeur unitaire de la maintenance (en €/kWh ou €/kW), que ce soit pour des technologies fossiles ou fissile (gaz, cogénération gaz pompe à chaleur) ou renouvelable (solaire, biomasse), représente moins de 10% du coût unitaire de l'investissement (€/kW) ou de la chaleur (en €/kWh), d'après le retour d'expérience de TECNALIA, un des partenaires du projet THERMENERGY. C'est pourquoi, sans être pour autant négligeables, les coûts de maintenance ne sont pas considérés actuellement dans nos travaux. Par la suite, nous souhaitons les inclure afin de trouver, suivant les différentes technologies, un meilleur compromis entre investissement, coût opérationnel et coût de maintenance.

Le coût total du réseau [Eq 2-58] correspond à la somme des coûts opérationnels (coût de pompage et de la chaleur) et des coûts d'investissement (puissance à installer, échangeur de chaleur et canalisation) que l'on analyse à l'année N. Pour plus de détail sur l'analyse en coût global, notamment sur le calcul des facteurs f_{OPEX} (concernant l'énergie consommée pour chauffer l'eau du réseau [Eq 2-59] et [Eq 2-60] pour la prise en compte des coûts de pompage) et f_{CAPEX} [Eq 2-61], se reporter à l'Annexe E ainsi qu'au travail de synthèse et d'explication de la norme ISO/DIS 15686-5 (MEDDE 2009). Le taux d'actualisation est pris égal à 4 %, sur le conseil de cette norme il ne doit pas dépasser ce seuil de 4%. Une telle analyse en coût total a été inspirée par (RAMOS BERMUDEZ 2007).

	$C_{tot} = Opepx_{pump} \cdot f_{opex_{pump}} + \sum_k (Opepx_{heat(k)} \cdot f_{opex(k)}) + (Capex_{H_{inst}} + Capex_{HX} + Capex_{line}) \cdot f_{capex}$	Eq 2-58
$\forall k \in \{1, n_k\}$	$f_{opex(k)} = \frac{1 - (1 + r_a)^N \cdot (1 + r_{i(k)})^N}{1 - (1 + r_a) \cdot (1 + r_{i(k)})}$	Eq 2-59
	$f_{opex_{pump}} = \frac{1 - (1 + r_a)^N \cdot (1 + r_{i_{pump}})^N}{1 - (1 + r_a) \cdot (1 + r_{i_{pump}})}$	Eq 2-60
	$f_{capex} = (1 + r_a)^N$	Eq 2-61

Il serait facilement possible d'envisager de prendre en compte :

- Des externalités, par exemple en ajoutant un coût à la tonne de CO₂ émis, comme suggéré dans la 9ème partie du livre (MOSSERI et JEANDEL 2013) afin de faire en sorte que « *le prix le plus cher ne soit plus payé par celui qui a le comportement le plus vertueux, mais par celui qui choisit l'option ou l'offre la moins respectueuse de la planète, la plus coûteuse en externalités* » recommandation n°4 (ADEME et al. 2016).
- Des subventions pour diminuer l'investissement, notamment spécifique au RCU le fonds de chaleur de l'ADEME (ADEME et CETE Ouest 2012).

Une telle analyse en coût global permet d'aider au choix pour trouver un compromis entre une énergie fossile et une EnR&R (détailé ultérieurement sous-section 3.4.5). Avec pour l'énergie fossile un investissement moindre à court terme, mais des factures énergétiques augmentant chaque année avec l'inflation du cours de l'énergie et pour l'EnR&R, certes fois plus chère à l'achat, pour une même facture énergétique initiale, mais dont l'inflation est maîtrisée.

Nous abordons désormais le calcul de la facture énergétique, avant d'appréhender les investissements.

2.5.1 COUT OPERATIONNEL OPEX

COUT DE POMPAGE

Le coût de pompage est calculé [Eq 2-62] afin de tenir compte des pertes de charge hydraulique dans le réseau de distribution, mais aussi pour éviter la cavitation. C'est-à-dire que l'on s'assure en tous points du réseau que la pression de distribution reste au-dessus de la pression de vapeur saturante. Le coût unitaire de pompage correspond au coût de l'électricité qui est pris égale à 11 ct€/kWh avec une inflation de 6 % pour l'électricité (SoeS 2014). Le rendement des pompes volumétrique est pris égal à 70 %. La masse volumique est calculée à 80°C, la température moyenne d'un réseau classique, même le modèle valide sur une gamme de température élargie (30-150°C).

	$Opex_{pump} = Opex_{pump_unit} \cdot \frac{periode}{Eff_{pump}} \cdot \left(\sum_i P_{pump(i)} \cdot M_{prod_{tot(i)}} \right) \frac{1}{\rho}$	Eq 2-62
--	---	-------------------------

COUT DE LA CHALEUR

Le coût de la chaleur [Eq 2-63] correspond à la somme des coûts opératoires de production de la chaleur à chaque lieu de production et chaque technologie. La chaleur produite est la multiplication de la puissance nominale par la période considérée. À noter que le coût unitaire de la chaleur est un paramètre qui dépend du type d'énergie utilisée. Classiquement, le gaz a un coût unitaire de 6 ct€/kWh avec une inflation de 4 % (SoeS 2014). Alors qu'une énergie renouvelable telle que le solaire est « quasiment gratuite » (beaucoup moins cher en coût de fonctionnement) et sans inflation. En France, comme rapporté section (1.2.2), le prix moyen de la chaleur en 2012 distribuée par les RCU est à 77 c€TTC/kWh et 70 % des prix se situent dans une fourchette à +/- 30 % (entre 54 et 100 c€TTC/kWh).

	$Opex_{heat} = period \cdot \sum_{i,k} H_{prod_{i,k}} \cdot Opex_{heat_unit(k)}$	Eq 2-63
--	---	-------------------------

2.5.2 INVESTISSEMENT CAPEX

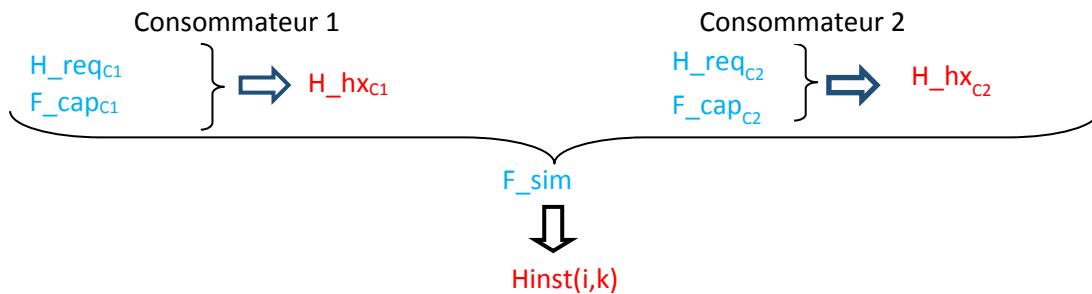
COUT DE L'INSTALLATION DE LA CHAUFFERIE

Pour le coût de la technologie de production à installer [Eq 2-64] il ne suffit pas de prendre la puissance nominale et de la multiplier par un coût unitaire proportionnel au kW. Il faut dimensionner la puissance à installer en fonction de l'appel de puissance maximal, d'où l'intervention d'un facteur de capacité pour chaque sous-stations et du facteur de simultanéité pour le réseau, comme introduit respectivement [Eq 1-2] et [Eq 1-1]. Le détail des calculs de ces facteurs n'est pas inclus dans notre formulation car cette étape intervient en amont de l'optimisation. Elle est par contre incluse dans le projet THERMENERGY. La relation entre ces 2 facteurs est illustrée Figure 2-14. Par défaut, un facteur de capacité de 0,33 est pris en compte d'après les résultats des recherches (FREDERIKSEN et WERNER 2013) et le facteur de simultanéité est pris égal à 1 (aucune atténuation par la mixité d'usage). Quant au coût unitaire de la puissance à installer, il varie entre 800 et 1200 €/kW sur des estimations issues de Batiprix (LE MONITEUR 2011) pour des chaudières gaz.

	$Capex_{Hinst} = Capex_{Hinst_{unit}} \cdot \sum_{i,k} H_{inst_{i,k}}$	Eq 2-64
--	--	-------------------------

Grâce à aux facteurs de capacité et de simultanéité, la somme de la puissance à installer doit satisfaire la contrainte [Eq 2-65]. La relation entre ces 2 facteurs est illustrée Figure 2-14.

	$\sum_{i,k} H_{inst_{i,k}} = \frac{\sum_j H_{req_j}}{F_{sim}}$	Eq 2-65
--	--	-------------------------



[Figure 2-14 Schéma de mise en relation des facteurs de capacité et de simultanéité pour le dimensionnement de la puissance des échangeurs et des chaufferies](#)

COUT DE LA CANALISATION

Le coût total de la canalisation [Eq 2-66] comprend d'une part le coût des matériaux - incluant le coût de l'isolation, de l'acier et gaine - et d'autre part le coût de la tranchée.

	$Capex_{line_{tot}} = Capex_{pipe} + Capex_{tr}$	Eq 2-66
--	--	-------------------------

Le coût total des matériaux (acier et isolant) est la somme des coûts des matériaux de toutes les canalisations [Eq 2-67]. Par exemple, le coût de la canalisation XZ est calculé [Eq 2-68] proportionnellement au produit de la distance existante (L_{PC}) et à une fonction linéaire du diamètre. Les coefficients de coût unitaire sont basés sur les prix et dimensions des tubes pré-isolés INPAL Energy ($C_{pipe_unit_a} = 0,372 \text{ €/m}^2$ et $C_{pipe_unit_b} = 12,5 \text{ €/m}$).

	$Capex_{pipe} = Capex_{pipe_{PC}} + Capex_{pipe_{CP}} + Capex_{pipe_{CC\ parallel}} + Capex_{pipe_{CC\ cascade}} + Capex_{pipe_{CC\ return}}$	Eq 2-67
	$Capex_{pipe_{XZ}} = \sum_{i,j,o} L_{XZ} \cdot (Capex_{pipe_{unit_a}} \cdot D_{intXZ} + Capex_{pipe_{unit_b}})$	Eq 2-68

Le coût des travaux de génie civil nécessaire pour placer les canalisations dans des tranchées est la somme du coût des travaux à réaliser pour toutes les tranchées [Eq 2-69]. Ce terme a été rajouté par rapport à (RAMOS BERMUDEZ 2007).

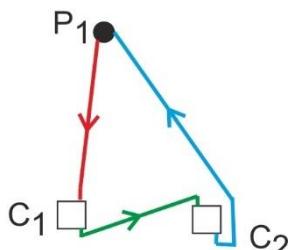
	$Capex_{tr} = Capex_{tr_{PC}} + Capex_{tr_{CP}} + Capex_{tr_{CC\ parallel}} + Capex_{tr_{CC\ cascade}} + Capex_{tr_{CC\ return}}$	Eq 2-69
--	---	-------------------------

Lorsque les canalisations sont forcées à être aller et retour, le coût de la tranchée se calcule simplement avec l'équation [Eq 2-70]. Le coût de la tranchée (aller-retour) varie d'après CETE Ouest 300-1300 €/m suivant la densité de la ville.

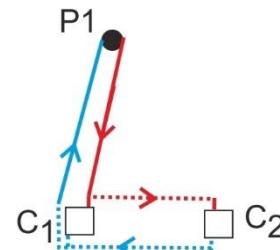
	$Capex_{trXZ} = \sum_{i,j,o} Capex_{trunit} \cdot L_{XZ}$	Eq 2-70
--	---	-------------------------

Mais dès lors que les canalisations ne sont plus forcément aller-retour comme sur la Figure 2-15 et non sur la Figure 2-16, les équations [Eq 2-71] sur la canalisation PC et inversement sur la canalisation CP [Eq 2-72] permettent de ne pas compter en double le coût de la tranchée. Le calcul du coût des tranchées P1C1 est détaillé dans le Tableau 2-9, suivant que la configuration optimale soit avec des canalisations AR ou non.

	$Capex_{trPC} = \sum_{i,j} \frac{Capex_{trunit}}{2} \cdot L_{PC_{i,j}} \cdot Y_{lineCP_{j,i}} + Capex_{trunit} \cdot L_{PC_{i,j}} \cdot (1 - Y_{lineCP_{j,i}})$	Eq 2-71
	$Capex_{trCP} = \sum_{i,j} \frac{Capex_{trunit}}{2} \cdot L_{CP_{j,i}} \cdot Y_{linePC_{i,j}} + Capex_{trunit} \cdot L_{CP_{j,i}} \cdot (1 - Y_{linePC_{i,j}})$	Eq 2-72



[Figure 2-15 Exemple P1C2 canalisations aller ou retour](#)



[Figure 2-16 Exemple P1C2 AR](#)

[Tableau 2-9 Détail du calcul du coût de tranchée, que les canalisations soient AR, ou non](#)

Canalisations forcées AR (Figure 2-15)		Justification	Bilan
Eq 2-71	$Capex_{trP1C1} = 0,5 c_{tr} \cdot L_{P1C1} \cdot 0 + c_{tr} \cdot L_{P1C1} \cdot (1-0) = c_{tr} \cdot L_{P1C1}$	$Y_{C1C1}=0$	
Eq 2-72	$Capex_{trC1P1} = 0,5 c_{tr} \cdot 0 \cdot 1 + c_{tr} \cdot 0 \cdot (1-1) = 0$		
	$Capex_{trC2P1} = 0,5 c_{tr} \cdot L_{C2P1} \cdot 0 + c_{tr} \cdot L_{C2P1} \cdot (1-0) = c_{tr} \cdot L_{C2P1}$		
Canalisations aller ou retour (Figure 2-16)			
Eq 2-71	$Capex_{trP1C1} = 0,5 c_{tr} \cdot L_{P1C1} \cdot 1 + c_{tr} \cdot L_{P1C1} \cdot (1-1) = 0,5 c_{tr} \cdot L_{P1C1}$		1 seul coût de tranchée équi-réparti
Eq 2-72	$Capex_{trC1P1} = 0,5 c_{tr} \cdot L_{C1P1} \cdot 1 + c_{tr} \cdot L_{C1P1} \cdot (1-1) = 0,5 c_{tr} \cdot L_{C1P1}$		
	$Capex_{trC2P1} = 0,5 c_{tr} \cdot 0 \cdot 0 + c_{tr} \cdot 0 \cdot (1-0) = 0$		

COUT DES ECHANGEURS

Le dimensionnement des aires d'échange des échangeurs permet de faire une estimation de leur coût d'investissement. Une fonction linéaire est pour l'instant ajoutée [Eq 2-73], en attente de consolidation des données économiques de la part de TECNALIA. Les coefficients pris sont basés sur Batiprix (LE MONITEUR 2011) sur les échangeurs de chaleur pour la préparation d'eau chaude sanitaire instantanée : $Capex_{hxunit_a} = 5,3 \text{ €/kW}$ et $Capex_{hxunit_b} = 5\ 045 \text{ €}$. En perspective, il faudrait que

l'estimation du prix de l'échangeur soit liée à ses performances (notamment dans le choix des valeurs pour K_hx et DP_hx).

$$Capex_{hx} = \sum_j (Capex_{hx_{unit_a}} \cdot H_{hx(j)} + Capex_{hx_{unit_b}})$$

[Eq 2-73](#)

2.6 DONNEES DE SORTIES DE L'OUTIL

Nous venons de voir la formulation du problème depuis les données d'entrée jusqu'à la fonction objectif à minimiser. Cette sous-section traite désormais des indicateurs de sortie de l'outil développé.

Afin d'être le plus exhaustif possible, le coût global n'est pas le seul indicateur de sortie, même si c'est la fonction objectif optimisée. Nous avons également choisi d'analyser la solution optimale en fonction des indicateurs suivants :

- la répartition des postes du coût global (en M€) : coût de l'énergie, coût de pompage, investissement pour les chaufferies, les sous-stations et le réseau ;
- longueur totale de réseau (en m) ;
- densité thermique (en kWh/m) ;
- la puissance installée (en kW) ;
- l'énergie totale livrée (en MWh) ;
- le % d'EnR&R dans mix énergétique (répartition en % selon la puissance installée) ;
- contenu CO₂ (kgCO₂/kWh) ;
- taux de perte d'énergie thermique (en %) : rapport entre l'énergie thermique perdue sur l'énergie thermique totale livrée ;
- les pertes thermiques spécifiques (en W/m) : rapport entre l'énergie thermique perdue et la longueur totale du réseau ;
- les pertes de charge spécifique (en kPa/m) : rapport entre les pertes de charge et la longueur totale du réseau ;
- le coût global permet d'analyser sur d'autres horizons temporels (5, 10, 15 ou 30 ans), pour compléter la fonction objectif.

2.7 COMPLEXITE DE LA FORMULATION

L'analyse de la taille de notre problème permet d'illustrer l'explosion combinatoire ainsi que de comparer la taille des modèles suivant leur complexité :

- La taille du problème peut être calculée à partir du nombre de producteurs potentiel (n_p), du nombre de technologies disponibles (n_k) et du nombre de consommateurs à approvisionner (n_c).
- La complexité du problème dépend de la formulation (fonctionnalités souhaitées et hypothèses réalisées).

La stratégie de résolution nous amène à considérer le couplage de différents modèles pour améliorer et automatiser la résolution de problèmes, comme nous le verrons dans le Chapitre 3. Cinq modèles différents seront utilisés dans ce manuscrit, du plus complet (représentation de la physique) au moins complet. Pour l'analyse de la structure du problème, nous avons sélectionné 4 modèles différents :

- Le modèle le plus complet « MINLP_aller_Cp(T) » où les canalisations dans une tranchée ne sont pas forcément aller et retour et les caractéristiques physiques de l'eau sont prises dépendantes de la température.
- Le modèle « MINLP_AR_Cp-cst » légèrement simplifié, avec des canalisations forcées à être aller et retour, ainsi que des caractéristiques de l'eau prise constante à 80°C pour une plage de température comprise entre 60°C et 100°C.
- Le modèle « NLP_aller_Cp(T) » est identique au premier modèle, mais toutes les variables binaires sont désormais des données d'entrée (et non des variables).

- Le modèle « MILP » est le modèle le plus simplifié (sans modélisation physique des pertes thermiques et de charge, à température de distribution fixée et à diamètre constant).

Afin de pouvoir comparer les modèles entre eux, nous nous intéressons au nombre de variables (parfois en différenciant les variables binaires des variables continues) ainsi qu'au nombre total de contraintes (en différenciant les contraintes égalités des inégalités).

Plus il y a de variables binaires, plus grande est la combinatoire de notre problème. Nous ne pouvons pas savoir à priori si le degré de liberté est positif (c'est-à-dire plus de variables que de contraintes égalités et inégalités saturées à la convergence). Cette analyse de dénombrement permet de se rendre compte qu'il y a autant de contraintes inégalités dans notre formulation que de contraintes égalités. Un grand nombre de contraintes (supérieure au nombre de variables) est à prendre en compte lors de la résolution de notre problème.

Sans détailler tout le calcul à partir de l'énumération des variables de la nomenclature et de toutes les équations, le travail de dénombrement a été réalisé sur les 4 modèles afin de proposer :

- Le Tableau 2-10 qui compare la complexité des 4 modèles, par rapport au modèle le plus complexe, pour un triptyque de données d'entrées fixées (notre exemple illustratif P2k3C4, dont les résultats seront étudiés Chapitre 4). Dans le modèle MINLP_AR_Cp, le nombre de variables continues est réduit de -15% et le nombre de contraintes égalités de -22%. Le modèle NLP_aller_Cp(T) admet le même nombre de variables continues que le modèle MINLP_aller_Cp(T) et le même nombre de contraintes, la simplification provient du fait qu'il n'y ait plus aucunes variables binaires. Enfin, le modèle MILP permet de réduire considérablement le nombre de variables (-76%) et le nombre de contraintes (-84% d'égalités et - 70% d'inégalités).
- Le Tableau 2-11 qui ne compare que 2 modèles (le plus simple par rapport au plus complexe) pour des triptyques différents. Nous pouvons constater que sur le problème de base (P1k1C1), 148 variables sont nécessaires au modèle complexe alors que seulement 48 variables suffisent dans le modèle le plus simple. La réduction du nombre de variables est significative et peut aller jusqu'à -73,6% (P1k1C50). On constate que le nombre de 10 000 variables est dépassé pour 13 consommateurs (avec 2 producteurs et 3 technologies afin d'aider au choix de la localisation et aussi à l'intégration d'EnR&R avec appont fossile) pour le modèle complexe alors qu'on peut considérer jusqu'à 25 consommateurs pour le modèle simplifié avant d'atteindre le même nombre de variables (10 000).

Tableau 2-10 Comparaison du nombre de variables et de contraintes (égalités et inégalités) entre 4 modèles avec comme données d'entrées 2 producteurs, 3 technologies et 4 consommateurs

cas P2k3C4	MINLP_aller_Cp(T)	MINLP_AR_Cp-cst	NLP_aller_cp(T)	MILP		
Var. continues	1306	1108	-15%	1306	307	-76%
Var. binaires	70	70		0	70	
Cont. égalité	796	618	-22%	796	130	-84%
Cont. inégalité	998	982	-2%	998	586	-70%

Chapitre 2 : Formulation du problème

Tableau 2-11 Comparaison du nombre de variables et de contraintes (égalités et inégalités) entre le modèle le plus complet (MINLP aller Cp(T)) et le modèle le plus simple (MILP) pour différentes données d'entrée en nombre de producteurs, de technologies et de consommateurs

Données d'entrée			MINLP_aller_cp(T)			MILP			écart relatif entre modèles (en %)		
n _p	n _k	n _c	Variable	Egalité	Inégalité	Variable	Egalité	Inégalité	-	-	-
1	1	1	148	79	77	48	33	41	-67,6	-58,2	-46,8
1	1	2	376	209	220	109	55	124	-71,0	-73,7	-43,6
2	1	2	466	264	316	133	64	176	-71,5	-75,8	-44,3
2	1	4	1 340	788	934	365	130	546	-72,8	-83,5	-41,5
2	3	4	1 376	796	998	377	130	586	-72,6	-83,7	-41,3
2	3	7	3 542	2 122	2 555	950	274	1 546	-73,2	-87,1	-39,5
2	3	19	22 466	13 906	16 343	5 942	1 390	10 246	-73,6	-90,0	-37,3
2	3	13	10 952	6 718	7 937	2 906	724	4 924	-73,5	-89,2	-38,0
2	3	25	38 084	23 686	27 773	10 058	2 272	17 512	-73,6	-90,4	-36,9
1	1	50	145 384	91 121	105 868	38 317	8 167	67 612	-73,6	-91,0	-36,1

2.8 CONCLUSION DU CHAPITRE

La formulation développée réalise une optimisation mono objectif, en minimisant une fonction objectif (le coût global) sur le long terme (maximum 30 ans) sur une période annuelle en régime permanent. Le coût global est une considération de première importance, aussi bien pour l'investisseur que pour l'opérateur de réseau, puisqu'il cherche à réduire l'investissement, mais aussi les factures énergétiques. La formulation choisie permet également de tenir compte, entre autres, des contraintes techniques d'intégration d'EnR&R et de l'inflation du cours de l'énergie. Le choix d'un seul objectif se justifie, entre autres, car les autres objectifs importants dans la conception d'un réseau de chaleur peuvent être pris en compte par l'intermédiaire de contraintes dans notre formulation (p. ex. le respect de 50% de chaleur produite par des ENR&R).

La formulation a comme particularité (MERTZ *et al.* 2015) d'autoriser différents types de connexion entre les consommateurs (Figure 2-2) : en parallèle - chaque consommateur est approvisionné à la même température (aux pertes thermiques près) que la température en sortie de chaufferie - ou en cascade - approvisionnement d'un consommateur basse température à partir d'un autre haute température (ancien bâtiment nécessitant un régime de température de distribution secondaire relativement élevé, un hôpital, un procédé industriel...). La formulation permet aussi d'optimiser des réseaux de chaleur ayant une production centralisée ou plusieurs unités de productions décentralisées.

La superstructure du problème, c'est-à-dire l'ensemble des alternatives structurelles parmi lesquelles sera sélectionnée la structure optimale, envisage deux grands types de nœuds : producteur (P) ou consommateur (C). Le maillage du réseau n'étant pas fixé, des variables binaires sont utilisées pour gérer l'existence des canalisations pouvant relier deux nœuds. De même, pour aider au choix des technologies et localisation d'unité de production, l'existence de celle-ci est gérée par une variable binaire. Les consommateurs, quant à eux, existent toujours dès qu'ils sont renseignés dans les données d'entrée.

Un nœud consommateur est modélisé par un échangeur de chaleur. Il a la possibilité d'être juste un nœud de bifurcation, si la puissance requise est nulle et si les températures « fictives » – en entrée et sortie - requises du réseau secondaire sont égales. Ce nœud bifurcation n'est pas inclus dans les investissements (calculé à partir de la puissance de l'échangeur). Un nœud consommateur doit être alimenté, soit directement par un nœud producteur soit par un autre consommateur (aussi bien connecté en parallèle qu'en cascade). De plus, un consommateur doit avoir une canalisation sortant de son nœud, qui peut retourner à un nœud producteur, à une sortie de nœud consommateur ou en cascade alimenter consommateur ayant un régime plus bas en température. Un nœud consommateur n'a pas de production de chaleur prévue en son sein, néanmoins, il est possible de prévoir un nœud de production localisé au même endroit pour étudier la rentabilité de le relier au réseau ou non.

Un nœud producteur peut être composé de plusieurs types de technologies de production disposées en parallèle. Il n'y a pas de technologie de production en cascade. Le choix de telles technologies (k) localisées à tel lieu de production (P) est un résultat de l'optimisation. Une pompe pour distribuer l'eau chaude est envisagée à chaque lieu de production. Le coût de la puissance à installer est pondéré avec un facteur de capacité et un facteur de simultanéité, ces 2 facteurs permettent de relier la puissance nominale à la puissance maximale, afin de tenir compte de l'aspect dynamique des différents profils de consommation malgré le fait que l'on soit en régime permanent pour l'optimisation.

Les canalisations n'existent pas forcément. L'existence ou non est le résultat de l'optimisation. Le coût des canalisations est un coût d'investissement pour les travaux de génie civil pour creuser les tranchées, ainsi que le coût de la matière (dépendant du diamètre et de la longueur). Au sein d'une

même tranchée, les canalisations ne sont pas forcément aller-retour. Il n'est pas possible qu'une canalisation relie un nœud producteur pour alimenter un autre nœud producteur (pas de canalisation PP). Dans la définition de la canalisation XZ, entre un nœud X et un nœud Z, est incluse la direction, mais aussi le sens de circulation. 5 catégories de canalisation sont disponibles :

- PC : reliant un producteur à un consommateur
- CP : reliant un consommateur à un producteur
- CC_parallel : approvisionnement en parallèle (séparation avant l'échangeur, même température) d'un consommateur à partir d'un autre consommateur
- CC_cascade : approvisionnement en cascade (séparation après l'échangeur, température en cascade) d'un consommateur à partir d'un autre consommateur
- CC_return : retour d'un consommateur à un autre (séparation en sortie de nœud).

Pour clore ce chapitre, avant de traiter des stratégies de résolution mise en place Chapitre 3, une vision synthétique de l'outil que nous avons développé est proposée dans le Tableau 2-12.

Tableau 2-12 Listes et illustrations des données d'entrée – sorties de l'outil développé

<p>Données entrée :</p> <ul style="list-style-type: none"> localisation des nœuds consommateurs, des potentiels lieux de production et bifurcation éventuelle ; puissance nominale et régime de température du consommateur ; technologie disponible, température maximale de production, température minimale entrée chaudière et coût ; coût tranchée. 	<p>Exemple de données d'entrée spatiales :</p> <p>2 lieux potentiels de productions 4 consommateurs</p>
<p>Résultats : <u>Configuration</u></p> <ul style="list-style-type: none"> localisation des lieux et choix des technologies de production ; maillage du réseau. 	<p>Exemple de configuration optimale :</p> <p>P2 abandonné P1 approvisionne C1 et C3 C2 est approvisionné en cascade par C1 C2 retourne à P1 (boucle) C4 est approvisionné en parallèle par C3 C4 retourne en parallèle (canalisation AR) C3 retourne à P1 (canalisation AR)</p>
<p>Résultats : <u>Dimensionnement</u></p> <ul style="list-style-type: none"> température et vitesse de distribution, diamètre des canalisations ; puissance à installer en chaufferie ; aire des échangeurs en sous-station. 	<p>Exemple de dimensionnement optimal :</p>

Chapitre 3. RESOLUTION

Dans ce chapitre, nous détaillons la méthode de résolution multi-étapes que nous avons développée. Celle-ci est nécessaire pour la résolution de problèmes de grandes tailles et afin de garantir une confiance dans le résultat obtenu.

La démonstration de la méthodologie s'appuie sur le cas d'étude P2k3C4 (2 Producteurs, 3 technologies et 4 Consommateurs), dont la localisation spatiale est illustrée (Figure 3-1). Chaque consommateur a un besoin fixé en entrée à 80 kW de puissance nominale. Les températures de distribution dans le réseau secondaire (distribution dans le bâtiment) sont fixées à 70 °C - départ de l'échangeur - et 50 °C - retour à l'échangeur. Sur la localisation P1, uniquement la technologie « fossile classique » k1 est potentiellement admise. L'investissement (CAPEX) est fixé à 800€/kW et le coût de la chaleur (OPEX) est de 8 ct€/kWh. Sur la localisation éloignée (en C4), une technologie d'EnR&R (P2) est possible. Sa puissance est limitée à 90% de la puissance totale délivrée (de par son intermittence et sa faible flexibilité, une EnR&R ne peut pas répondre à tout les pics d'appel de puissance). Une étude de sensibilité (sur le coût d'investissement, de la chaleur et des tranchées) est proposée dans le Chapitre 4 suivant.

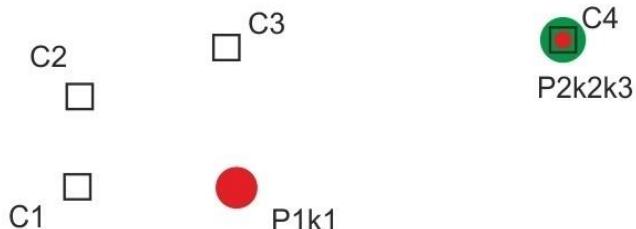


Figure 3-1 Localisation du cas d'étude P2k3C4 : 2 potentiels lieux de production (sur P1 la technologie k1 est autorisée et sur P2 les technologies k2 et k3 sont disponibles) et 4 consommateurs

Quatre sections composent ce chapitre. La section (3.1) décrit GAMS, l'environnement de résolution choisi, et la méthode de résolution employée (Outer Approximation, OA) dans le solveur DICOPT. Dans la section (3.2) sont détaillées les stratégies classiques de résolution (les bornes, l'initialisation et les différents solveurs). La section (3.3) explicite la méthode générique que nous proposons : une initialisation semi-automatique liant 3 modèles (MILP, NLP et MINLP), une génération de résultats utilisables pour de prochaines initialisations, des stratégies expertes éventuellement employées (détaillées section d'après) et la recherche des minima locaux. Enfin, la section (3.4) détaille les stratégies expertes adaptées aux RCU (différents modèles, résolution en sous- quartier, résolutions avec différentes fonctions objectifs et le choix du nombre d'années d'amortissement) que l'expert en optimisation des RCU peut utiliser en complément.

SOMMAIRE

3.1	ENVIRONNEMENT ET METHODE CHOISIS	117
3.1.1	<i>GAMS.....</i>	117
3.1.2	<i>Méthode déterministe approximation externe</i>	117
Problème primal.....	117	
Problème maître	118	
Critère de convergence.....	119	
3.2	STRATEGIES CLASSIQUES DE RESOLUTION DE PROBLEME MINLP	120
3.2.1	<i>Bornes.....</i>	120
3.2.2	<i>Initialisations</i>	121
Initialisations spécifiques du modèle.....	122	
Plusieurs résolutions à la suite.....	122	
3.2.3	<i>Utilisation de différents solveurs.....</i>	123
3.3	STRATEGIE DE RESOLUTION « EN PLUSIEURS ETAPES INTERMEDIAIRES »	125
3.3.1	<i>Synthèse</i>	125
3.3.2	<i>Détail de la liaison de 3 modèles.....</i>	126
3.3.3	<i>Détail génération de résultats.....</i>	127
3.3.4	<i>Détail analyse des minima locaux</i>	129
Synthèse de la recherche automatique des minima locaux	129	
Influence des bornes sur les minima locaux	130	
Influence de l'initialisation sur les minima locaux	134	
3.4	STRATEGIES DE L'EXPERT ADAPTEES AU RCU	136
3.4.1	<i>Résolution de différents modèles : du simple au complexe</i>	136
Les différents modèles disponibles.....	136	
Modèles non retenus par défaut dans la stratégie « en plusieurs étapes intermédiaires »	138	
3.4.2	<i>Résolution du réseau sur des sous-quartiers : liaison d'initialisation.....</i>	140
3.4.3	<i>Résolution du réseau à différentes échelles spatiales : agrégation des besoins thermiques de bâtiments.....</i>	141
3.4.4	<i>Résolution de différentes fonctions objectifs</i>	142
3.4.5	<i>Amortissement à différents horizons temporels</i>	143
3.5	CONCLUSION DU CHAPITRE	145

3.1 ENVIRONNEMENT ET METHODE CHOISIE

Le choix de l'environnement ainsi que la méthode choisie sont rapportés dans cette section, avant de parler des stratégies de résolutions employées.

3.1.1 GAMS

Les 5 plus grandes plateformes d'optimisation (BELOTTI *et al.* 2013) utilisant un langage de modélisation algébrique sont : AIMMS, AMPL, GAMS, LINDO/LINGO, et MPL. Étant donné que le LaTEP a développé des compétences sur GAMS et que des licences académiques sont disponibles, il paraît évident de travailler sur cette plateforme plutôt qu'une autre.

La question d'un autre environnement, faisant appel à des solveurs grâce à des scripts, a été posée en début de thèse. Étant donné que l'objectif de la thèse n'est pas de développer des algorithmes d'optimisation, mais de travailler à leur application sur les RCU, nous n'avons pas retenu cette option.

NEOS, malgré la disponibilité du solveur DICOPT que nous avons utilisé, n'aurait pas permis de travailler sur des cas d'étude conséquents (taille de mémoire maximale). De plus l'attente, entre une requête et les résultats, n'aurait pas facilité le travail de programmation.

3.1.2 METHODE DETERMINISTE APPROXIMATION EXTERNE

Dans l'environnement GAMS, nous avons utilisé le solveur DICOPT. L'algorithme de résolution est la méthode d'approximation externe (abrégé OA pour Outer Approximation). Une review des méthodes et solveurs pour résoudre les problèmes MINLP est réalisé par (BUSSIECK et VIGERSKE 2014).

Une telle méthode OA a été choisie pour le temps de calcul très rapide et la facilité d'intégrer de nombreuses contraintes au problème.

Le principe de l'algorithme est détaillé sur la Figure 3-2. Le déroulement est une résolution successive d'un problème NLP primal avec un problème MILP maître.

PROBLEME PRIMAL

Le problème primal est obtenu en fixant les variables binaires dans le problème MINLP initial. Les valeurs des variables binaires sont données soit par l'initialisation (première itération) soit par la solution du problème maître (itérations suivantes).

Dès lors, le problème devient un problème de programmation non linéaire (NLP) qui est résolu par une méthode adaptée : un GRG avec l'utilisation du solveur CONOPT (DRUD 2008) ou autre si spécifié par (Option# 6 nlp solver). Puisque les variables binaires sont ici fixées, le problème primal donne une borne supérieure du critère optimum du problème MINLP initial.

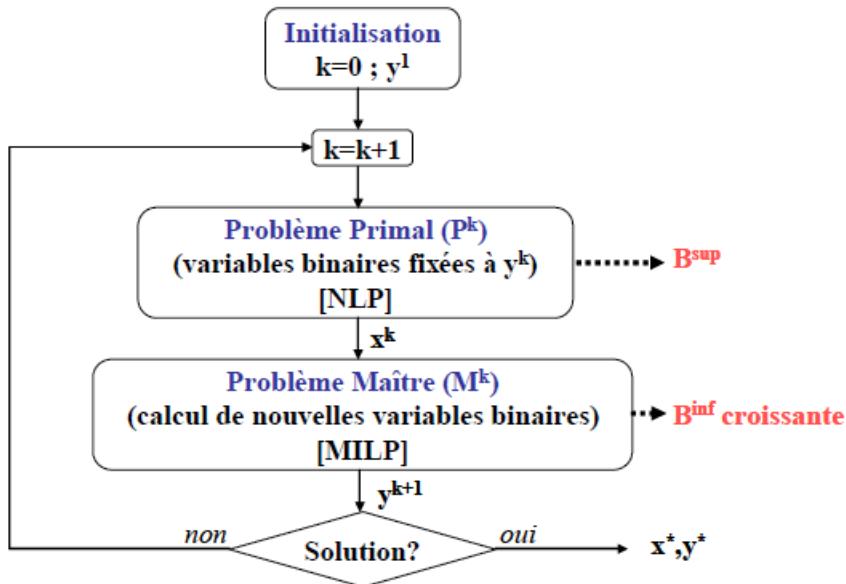
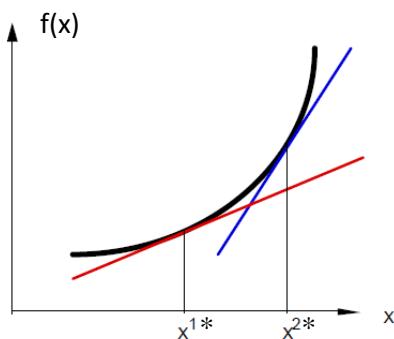


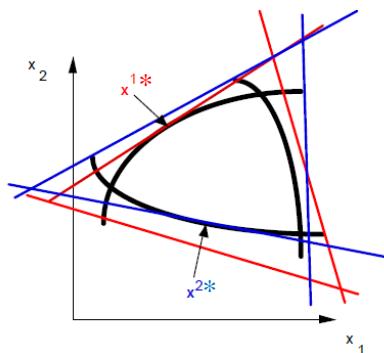
Figure 3-2 Structure de la méthode OA

PROBLEME MAÎTRE

Le problème maître est construit en accumulant les linéarisations des contraintes et de la fonction objectif aux différents points solutions des problèmes primaux. On forme donc ainsi un problème de programmation linéaire en variables mixtes (MILP). La **méthode de séparation et d'évaluation successive**, en anglais **Branch and Bound** (BB), est la plus communément employée pour résoudre les problèmes MILP. Cette méthode est expliquée en détail dans le livre (NEMHAUSER et WOLSEY 1988). Sur une fonction convexe (p. ex. Figure 3-3) la linéarisation conduit à une sous-estimation de la fonction objectif non linéaire. Sur un domaine de recherche convexe (p. ex. Figure 3-4), les linéarisations surestiment celui-ci.



[Figure 3-3 problème maître : sous-estimation de la fonction objectif convexe en linéarisant à la solution \(en \$x^1*\$ et \$x^2*\$ \) précédemment trouvée dans le problème primal](#)



[Figure 3-4 Problème maître : sur-estimation en linéarisant le domaine de recherche à la solution du problème primal \(\$x^1*\$ et \$x^2*\$ \) \(GROSSMANN 2007\)](#)

Lorsque le problème est non convexe, aucune méthode ne peut garantir rigoureusement l'optimalité. Le problème NLP peut avoir un minimum local (Figure 3-5) ou le problème MILP peut exclure l'optimum global du domaine de recherche (Figure 3-6).

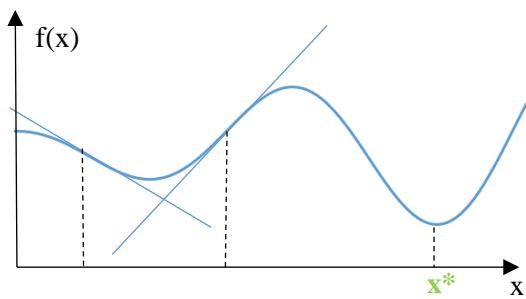


Figure 3-5 Problème maître : linéarisation à la solution du problème primal excluant la solution optimale $f(x^*)$ d'une fonction objectif non convexe

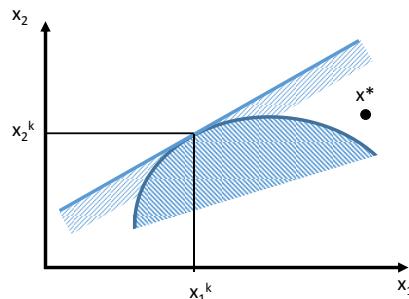


Figure 3-6 Problème maître : linéarisation excluant la solution optimale $f(x^*)$ du domaine de recherche non-convexe (fonction concave)

- La méthode OA/ER (Outer Approximation / Equation Relaxation) permet de traiter les problèmes MINLP ayant des contraintes non linéaires de type égalité. Ces dernières sont linéarisées, comme les inégalités, au point solution du problème primal précédent. Elles sont ensuite relaxées (transformées en inégalité). Le sens de l'inégalité (supérieur ou inférieur) est donné par le signe du facteur de Lagrange associé à l'égalité, à la solution du problème primal (KOCIS et GROSSMANN 1989).
- La méthode OA/ER/AP (Outer Approximation / Equation Relaxation / Augmented Penalty) (VISWANATHAN et GROSSMANN 1990) permet, dans une certaine mesure, de traiter les problèmes non convexes : elle autorise une violation des linéarisations de façon à pouvoir atteindre l'optimum exclu par un Cut Off (Figure 3-6). Cette violation est contrôlée par un terme de pénalisation dans la fonction objectif qui est donc « augmentée ».

CRITERE DE CONVERGENCE

Plusieurs critères de convergence sont utilisés (par défaut dans DICOPT) :

- lorsque le **problème NLP ne s'améliore plus** ou si le nombre maximal d'itérations du problème primal est atteint (Option# 2 iterlim) ;
- lorsque le temps de résolution alloué est atteint (Option# 1 reslim) ;
- lorsque le nombre d'itérations maximal du problème maître est atteint (Option# 4 maxcycles) ou lorsque la convergence du problème maître devient impossible.

3.2 STRATEGIES CLASSIQUES DE RESOLUTION DE PROBLEME MINLP

Avant de proposer dans la section (3.3) à une stratégie de résolution « en plusieurs étapes intermédiaires », les stratégies classiques sont détaillées dans cette section : bornes, initialisations et solveurs. Ces stratégies « classiques » sont nécessaires à la convergence, mais non-suffisantes pour assurer une confiance dans la solution optimale obtenue.

3.2.1 BORNES

L'ajout de bornes, ou autrement dit la définition d'un domaine de définition, est nécessaire pour résoudre un problème MINLP.

- Sans l'ajout de bornes, l'algorithme risque de ne pas converger (zone rouge Figure 3-7).
- Lorsque le problème est non-convexe, la définition des bornes est d'autant plus sensible (analyse de l'influence du choix des bornes sous-section 3.3.4). Par exemple, pour la borne supérieure en température dans le cas où les consommateurs requièrent un régime 70/50°C, le domaine possible se situe entre 80 et 130°C (zone orange et verte Figure 3-7). Mais sur ce domaine, il est intéressant d'analyser si la borne est saturée (zone orange), dans ce cas la borne ajoute une restriction. Il est possible que cette restriction soit justifiée (physiquement, règlementairement, techniquement). L'intérêt de l'analyse de l'influence des bornes est de tester si la convergence est améliorée, dans le cas où cette borne restrictive n'a pas lieu d'être.
- La borne ne doit pas poser de problème de définition du modèle. Par exemple, la borne supérieure ne doit pas être inférieure à la borne inférieure du modèle (zone jaune Figure 3-7).

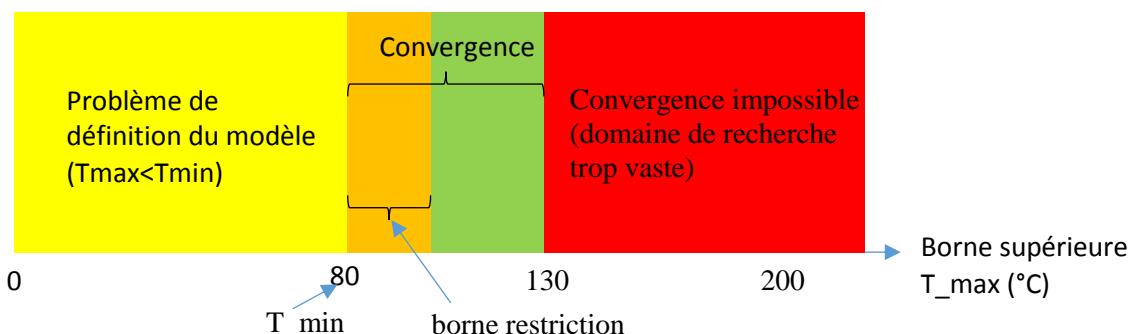


Figure 3-7 Illustration de la plage de borne possible (p. ex. T_{max}) sur le cas P2k3C4 avec tous les consommateurs 70/50°C

La définition des bornes a été détaillée au Chapitre 2, dans les sous-sections 2.2.3, 2.3.3 et 2.4.3.

Une synthèse de la définition des bornes est disponible dans le Tableau 3-1, afin de différencier si les bornes sont définies directement à partie des données renseignées en entrée ou alors si les bornes sont calculées avec des équations. De plus, les variables ont été différencier suivant qu'elles soient définies:

- A la fois par une borne inférieure (différente de zéro) et aussi par une borne supérieure. Ce qui est le cas pour 4 catégories de variables : les températures, les diamètres, les pressions ou les vitesses. Ces 4 définitions de bornes sont les 4 données d'entrée pour l'étude des minima locaux (sous-section 3.3.4) testant l'influence des bornes sur les résultats.

- Ou alors juste par une borne supérieure. Ces variables ont une borne inférieure nulle car, dans le cadre d'une optimisation structurelle, elles deviennent nulles quand l'unité de production, ou la canalisation, n'existe pas.

Tableau 3-1 Synthèse de la définition des bornes (inférieures et/ou supérieures)

Bornes inférieure ($\neq 0$) & supérieure ($\neq \infty$)		juste une borne supérieure ($\neq \infty$)
Défini avec les données d'entrées	T Dint P V (définie avec méthode bigM)	DTLM
Défini avec les équations et à partir des 4 principales bornes	DT Dout A_hx M_hx Fraction_Dint Rth Cp mu rho Gamma Psat	M (sauf M_hx) Hinst L Ppump FRACTION_loss DP_pump

3.2.2 INITIALISATIONS

L'initialisation des variables est primordiale en optimisation, pour augmenter la rapidité de la convergence et aussi tout simplement pour permettre la convergence. Ceci est d'autant plus important dans un problème MINLP non convexe.

Par défaut dans le solveur DICOPT, si aucune initialisation n'est spécifiée, l'initialisation se fait à la borne inférieure. **Mais si aucune initialisation n'est ajoutée, alors aucun des problèmes étudiés ici n'arrive pas à converger**, quelle que soit leur complexité (NLP ou MINLP).

Et comme souvent dans cette formulation, une borne inférieure (différente de zéro) ne peut être spécifiée sinon l'intérêt d'optimiser la structure est évincé. Sur les variables continues, comme elles sont toutes définies positives, l'initialisation se fait alors à zéro. Avec une telle initialisation, des problèmes numériques apparaissent (p. ex. division par zéro). **Ainsi une initialisation spécifique des variables est nécessaire.**

Une mauvaise initialisation peut également empêcher de résoudre le problème. Une mauvaise initialisation (couplée à de mauvaises définitions de borne) est facilement détectable avec le message de rapport de convergence sous GAMS. Par contre, la correction n'est pas évidente. De plus, l'initialisation peut permettre de trouver une solution, mais il est difficile de repérer si la solution est piégée dans un minimum local ou non. La stratégie « en plusieurs étapes intermédiaires » mise en place section (3.3) cherche justement à limiter, de façon automatisée, les résolutions piégées dans un minimum local.

INITIALISATIONS SPECIFIQUES DU MODELE

Ces initialisations ont l'avantage d'être « simples », chaque variable est initialisée soit à la borne inférieure, soit à une valeur spécifique, détaillée au Chapitre 2, dans les sous-sections relatives au consommateur (2.2.3), au producteur (2.3.3) et à la canalisation (2.4.3). Elles sont qualifiées de « spécifiques », car elles sont inhérentes à la formulation, un expert travaillant à l'optimisation des RCU n'a pas besoin de programmer d'autres initialisations dans GAMS lorsqu'il s'intéresse à un nouveau RCU. Ces initialisations spécifiques sont nécessaires afin de permettre la convergence, mais elles ont l'inconvénient de nécessiter plus de temps de calcul (que si initialisées à la solution d'un problème résolu précédemment), notamment du sous-problème NLP qui n'est pas initialisé finement, et d'accroître la possibilité de tomber dans des minima locaux.

Comme expliqué précédemment, il n'est pas possible d'omettre une étape d'initialisation. Une solution testée par le manuel CONOPT (DRUD 2008) et par exemple (LI et CHANG 2007) est d'initialiser toutes les variables à 1. Ce que nous avons testé, mais cela n'a pas été concluant. Néanmoins, il n'est pas nécessaire d'initialiser toutes les variables avec le même niveau de précision. Nous proposons d'initialiser 4 grandes catégories de variables : la température, la vitesse, la pression et les diamètres. Nous avons testé 3 stratégies pour les initialiser : en initialisant à la borne minimale, à la moyenne (entre la borne inférieure et la borne supérieure) et à la borne supérieure. Ce test n'est pas concluant non plus, le problème ne converge pas. Nous avons choisi **d'initialiser la plupart des variables (la vitesse, la pression, les diamètres et toutes les variables calculées à partir d'elles) à la moyenne, sauf pour les températures**, ce qui permet la convergence du problème MINLP. Il vaut mieux laisser une initialisation à la température maximale pour toutes les canalisations d'approvisionnement et à la température minimale pour toutes les canalisations de retour, ainsi qu'une température supérieure à la température requise par le consommateur à laquelle s'additionne le pincement de l'échangeur (voir Tableau 2-5).

De plus, concernant l'initialisation des variables binaires, tous les lieux de production avec les technologies EnR&R et les technologies sur les lieux de production principale sont initialisés comme existant ($Y=1$). De même, il est choisi à l'initialisation d'activer l'existence des canalisations de par la proximité des nœuds. Les canalisations en cascade sont aussi initialisées à exister lorsque les régimes requis par les consommateurs sont différents.

Cette méthode d'initialisation spécifique du modèle, notamment grâce aux valeurs fournies par un expert dans les données d'entrée, fonctionne et elle est utilisée pour les premières résolutions (section 3.3.2 et 3.3.3), mais elle nécessite du temps machine pour la convergence. Elle a également l'inconvénient de ne pas proposer de méthode pour détecter les minima locaux (celle-ci sera présentée section 3.3.4).

PLUSIEURS RESOLUTIONS A LA SUITE

Pour améliorer l'initialisation spécifique, une façon de faire intuitive est de résoudre plusieurs problèmes à la suite. Les résultats d'un problème servent d'initialisation pour le problème suivant. Nous utilisons de telles stratégies « multi-étape » et « multi-modèle » qui sont détaillées section 3.3 ou 3.4. Les principaux avantages de lancer plusieurs résolutions à la suite sont de faciliter et améliorer la convergence. Les inconvénients sont le temps de calcul et la non-gestion des initialisations, qui empêchent notamment de relancer la résolution sur un seul cas (pour regarder en détail le fichier résultat de GAMS par exemple, ou analyser en détail les valeurs de toutes les variables à la convergence).

Afin de ne pas avoir à gérer les initialisations consécutives, il est nécessaire de gérer l'export et l'import des résultats (Option# 3 savepoint). Il est ainsi possible d'alterner des résolutions à la suite avec :

- des initialisations différentes, avec une configuration gérée différemment (détailé ultérieurement sous-section 3.3.3) :
 - un maillage de réseau et des technologies fixés (problème NLP, plus de présence de variables binaires d'existence, elles sont renseignées en données d'entrée) ;
 - un problème (MINLP) où le maillage et technologie sont laissés libres, mais initialisés par le problème précédent ;
 - voire un problème (MINLP) où le maillage est forcé, mais la combinatoire est laissée libre sur le choix des technologies de production ;
- des bornes différentes (détailé ultérieurement sous-section 3.3.4) ;
- des modèles différents : sans pertes puis avec pertes, canalisation forcée AR puis sans obligation (détailé ultérieurement sous-section 3.4.1) ;
- des fonctions objectifs différentes (détailé ultérieurement sous-section 3.4.4) ;
- différents horizon temporel (détailé ultérieurement sous-section 3.4.5).

3.2.3 UTILISATION DE DIFFERENTS SOLVEURS

Le Tableau 3-2 est une liste des solveurs MINLP, disponible sous GAMS. Un tri a été réalisé suivant la convexité ou non du problème dans (BELOTTI *et al.* 2013).

Une analyse détaillée n'a pas été réalisée, car le solveur DICOPT, faisant appel à CPLEX et CONOPT, est satisfaisant. Néanmoins, voici un rapide aperçu des tests réalisés avec d'autres solveurs.

- Les solveurs en versions de démonstration n'ont pas pu être testés.
- Le solveur SCIP n'est pas retenu, car il est distribué uniquement sous licence académique, donc il ne pourra pas être utilisé en contexte commercial. Il fonctionne néanmoins pour résoudre ce problème MINLP. La meilleure solution entière trouvée avec SCIP est la même solution qu'avec DICOPT, mais la résolution est interrompue par critère de temps alloué par défaut, ce qui fait perdre un temps précieux.
- Le solveur BARON converge vers une solution supérieure - voire égale - à la solution trouvée par DICOPT, mais nécessitant le double du temps nécessaire avec DICOPT. Néanmoins, il a été testé, car un message permet d'identifier un système d'équations infaisables, avec l'indication sur les variables saturées à la borne inférieure ou supérieure. De plus, une option est disponible permettant d'initialiser automatiquement de manière aléatoire, mais malgré cette option, le solveur ne converge pas toujours vers la meilleure solution trouvée avec DICOPT.
- La résolution avec les solveurs BONMIN, couenne, LINDO et LINDOGLOBAL a été interrompue dans sa recherche (entre 12 et 17 min) avant de trouver une solution entière faisable.
- Les solveurs LINDO et LINDOGLOBAL sont particuliers. Dans le descriptif, ils sont capables de s'adapter au problème (LP, QP, QCP ou SOCP) pour profiter de la structure du sous-problème pour accélérer la résolution. De plus, une option permettrait de ne garder que le meilleur résultat à partir d'initialisation automatique intelligente. Malheureusement, ces 2 atouts de ce solveur n'ont pas pu être mis en valeur pour la résolution de notre problème, car aucune solution entière n'est trouvée (même au bout de 15 min sur le cas test P2k3C4). La résolution du problème simplifié avec 1 producteur et 1 consommateur n'admet pas non plus de solution avec ces solveurs.

Tableau 3-2 Liste de solveurs MINLP disponibles sous GAMS, dernière colonne pour l'efficacité du solveur à résoudre notre problème

Solveur MINLP	licence	opensource	algorithme	Non-convexe	autres solveurs appelés	⊕
alphaECP	démo		α-BB			?
BARON	licence		LP-BB	Non-convexe	MIP : CPLEX + NLP : IPOPT	⊖
BONMIN		oui	NLP-BB, LP-BB, OA, hybrid		MIP : CBC + NLP : IPOPT ou filter-SQP	X
COUENNE		oui	LP-BB	Non-convexe	NLP : IPOPT	X
DICOPT	licence		OA/ER/AP	Pseudo	MIP : CPLEX + NLP : CONOPT	⊕
LINDO	licence		LP-BB			X
LINDOGL OBAL			LP-BB	Non-convexe		X
SBB	démo		NLP-BB		NLP : CONOPT, SNOPT ou MINOS	?
SCIP	académique	oui	LP-BB	Non-convexe	MIP : CPLEX ou SoPlex + NLP : IPOPT + CCAD (calcul dérivé fonction non-linéaire)	⊕

Comme le sous-problème NLP est difficile à résoudre, nous avons essayé d'utiliser différents solveurs NLP. Il est possible avec DICOPT, et d'ailleurs même conseillé dans la description de l'option (Option# 6 nlp solver), de réaliser des résolutions par des solveurs différents (Tableau 3-3) des sous-problèmes NLP. Ce qui dans notre cas ne s'est pas avéré pertinent. En effet, pour résoudre uniquement un problème simplifié NLP, CONOPT est le seul solveur performant sur notre formulation. Et une fois une solution trouvée, les autres solveurs ne trouvent pas de meilleure solution.

Tableau 3-3 Liste de solveurs NLP disponibles sous GAMS

solveurs NLP	démo	opensource	algorithme	efficacité
CONOPT	licence		GRG	efficace
IPOPT		oui	Point intérieur	même résultat que CONOPT, mais temps calcul 40 fois plus long
SNOPT	démo			non testé
MINOS	licence		reduced gradient et quasi-Newton	infaisable, sauf si initialisation résultat de CONOPT, mais pas d'amélioration

Après avoir passé en revue les stratégies de résolution classique, nécessaires, mais non suffisantes, nous détaillons dans la section (3.3) suivante l'ensemble des stratégies employées sur plusieurs étapes intermédiaires ainsi que les liens entre elles.

3.3 STRATEGIE DE RESOLUTION « EN PLUSIEURS ETAPES INTERMEDIAIRES »

Les 3 étapes « automatiques » de la stratégie de résolution « en plusieurs étapes intermédiaires » sont détaillées dans cette section. Elles sont un complément permettant d'accorder plus de confiance dans la solution optimale trouvée à partir des stratégies « classiques ».

De telles stratégies globales de résolution ne sont pas nouvelles pour la résolution d'un problème MINLP. Par exemple, (KORAVIYOTIN et SIEMANOND 2015) traitent de l'optimisation MINLP d'un réseau d'échangeur de chaleur (HEN), avec de stratégie de résolution en plusieurs étapes (Figure 3-8). Leur stratégie est particulièrement complète. Un premier modèle A1 simplifié est résolu en minimisant le coût global du réseau (TAC ou total annual cost). Celui-ci sert d'initialisation à un problème NLP1 puis à un modèle MILP1 et de nouveau à un modèle NLP, mais cette fois-ci dans une version complexifiée (dite 2). De l'étape 2 à 4, les fonctions objectifs sont différentes du TAC. Ainsi leur problème global est résolu en 5 étapes.

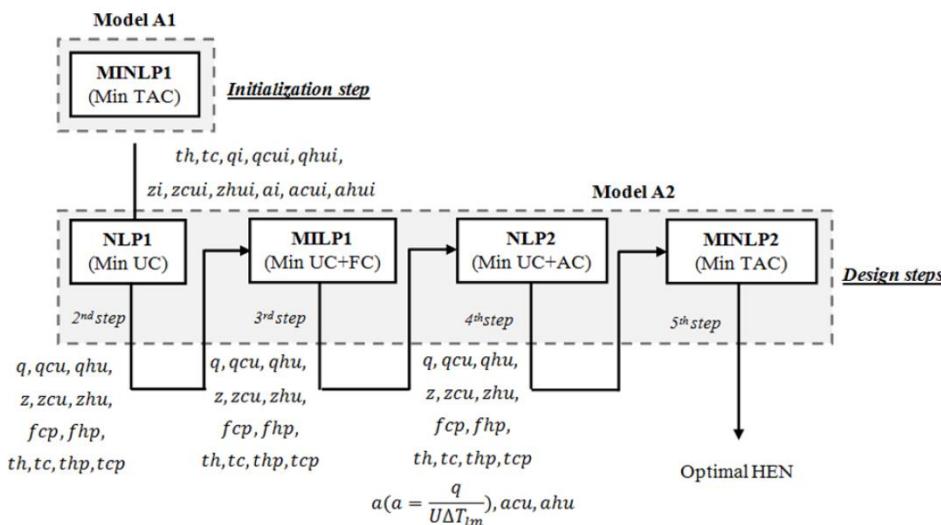


Figure 3-8 Exemple de stratégie de résolution d'un problème MINLP appliquée au réseau d'échangeur de chaleur (KORAVIYOTIN et SIEMANOND 2015)

De telles stratégies de résolution « en plusieurs étapes intermédiaires » exploitent les spécificités de l'application. Dans cette section, nous détaillons la stratégie de résolution « en plusieurs étapes intermédiaires » que nous avons développée pour l'optimisation de RCU.

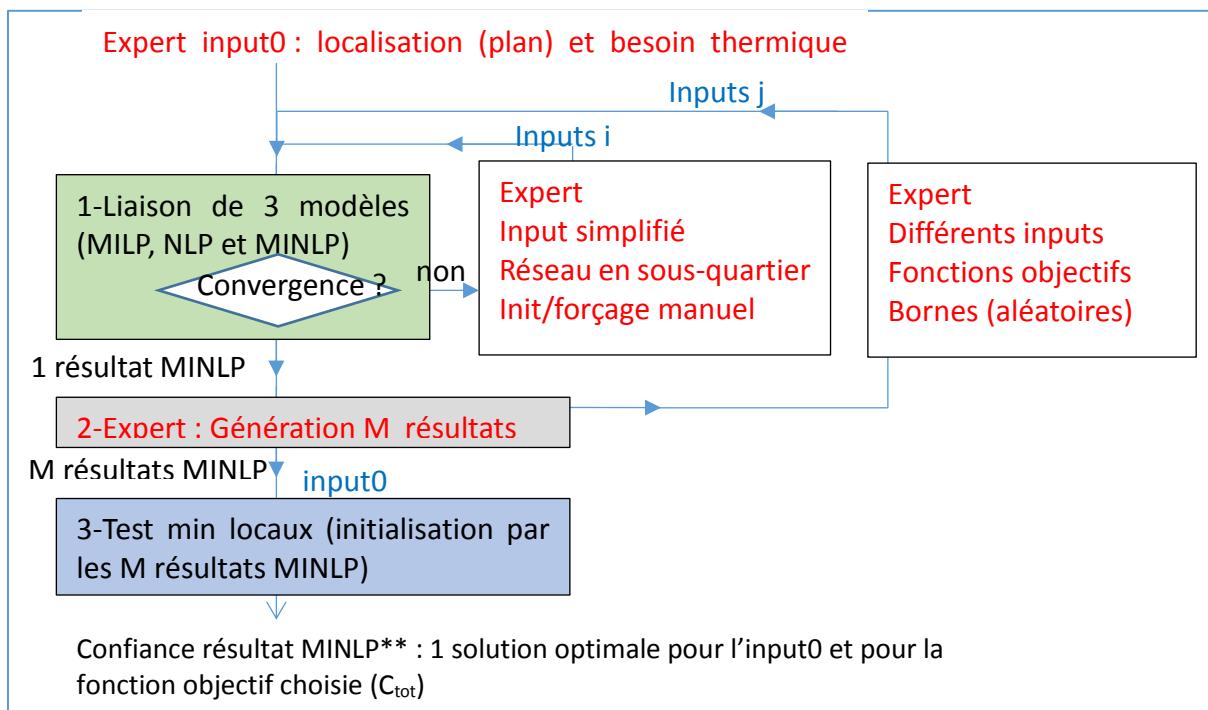
3.3.1 SYNTHESE

L'ordinogramme principal pour trouver une solution dite de confiance est représenté Figure 3-9. Il inclut 3 grandes étapes :

- 1) La stratégie d'initialisation « liaison de 3 modèles », (Figure 3-10) détaillée ultérieurement sous-section (3.4.1), permet d'obtenir un résultat au problème MINLP de manière semi-automatique. Pour cela, 3 résolutions sont lancées et les résultats des problèmes sont automatiquement exportés pour être importés dans les problèmes suivants. Les résolutions sont très rapides, inférieures à 1s pour les modèles simples et environ 5s pour le modèle MINLP, sur le cas d'étude P2k3C4. Dans l'ordre, le problème MILP permet d'exporter la structure. À cette structure fixée, un problème NLP est résolu permettant d'exporter les valeurs de variables continues. Enfin, le problème MINLP est initialisé avec la structure et les

variables continues. Un résultat est obtenu, mais les étapes suivantes permettent d'apporter de la confiance dans cette solution ou d'en trouver une meilleure.

- 2) Une étape de génération de résultats permet d'exporter le résultat du problème MINLP qui servira pour l'initialisation de prochaines résolutions.
 - Cette étape est réalisée par un expert qui sélectionne des données d'entrée spécifique qu'il estime pertinentes pour l'optimalité de telle ou telle configuration.
 - Eventuellement en complément de la génération par l'expert, un tirage aléatoire permet de tester, sur une gamme des données d'entrée, si une autre structure est optimale ou non. Si c'est le cas, il est nécessaire que l'expert génère cette nouvelle structure pour l'inclure dans le test des minima locaux.
- 3) Le test des minima locaux (détailé ultérieurement Figure 3-17 section 3.3.4) permet de lancer un grand nombre de résolutions (avec notamment des bornes et des initialisations différentes) afin d'essayer de ne pas rester bloquer dans une configuration ou un dimensionnement sous-optimal (minimum local). Cette étape est primordiale afin d'automatiser la recherche de minimum global, en évitant de nombreux minima locaux. A la fin de cette étape, si aucune nouvelle meilleure solution n'est trouvée par l'analyse des résultats par l'expert, alors une solution dite de confiance est conservée.



[Figure 3-9 Organigramme général de la stratégie de résolution en 3 étapes intermédiaires](#)

3.3.2 DETAIL DE LA LIAISON DE 3 MODELES

Nous avons retenu dans la stratégie « en plusieurs étapes intermédiaires » de commencer par une stratégie d'initialisation semi-automatique permettant de lier les solutions intermédiaires de 3 modèles (Figure 3-10) :

- Un problème MILP : ce problème est linéaire du fait de la diminution du nombre des variables (température et diamètre en données d'entrée) et de la non-modélisation précise des pertes (estimation dans le coût de la chaleur d'un ratio de pertes thermiques sur l'énergie totale livrée à 5%). Un tel modèle est résolu très rapidement (inférieur à 1s sur le cas P2k3C4), mais il a de nombreux inconvénients, comme le fait de ne pas valoriser différents régimes de température

ou de ne pas aider au dimensionnement du diamètre des canalisations. De plus, les résultats de ce problème ne permettent pas d'initialiser à eux seuls le problème MINLP, car de trop nombreuses variables (diamètre et température, servant à l'initialisation d'autres variables) ne sont pas optimisées dans le problème MILP. L'avantage de ce modèle est de pouvoir générer une structure de réseau, qui sert à définir le problème NLP et initialiser le problème MINLP. Ce modèle utilise 2 résolutions à la suite, la première minimise la longueur totale de canalisation et la deuxième seulement le coût global. La minimisation de la longueur totale du réseau permet de trouver de meilleure solution que si le coût total avait été minimisé seul.

- Un problème NLP : ce problème ne contient plus aucune variable binaire, **la configuration est fixée, aussi bien le maillage du réseau que le choix de la technologie de production**. L'avantage est de pouvoir dimensionner précisément le RCU, aussi bien sur les variables de température, diamètre, vitesse et pression. Ce modèle est initialisé avec les initialisations spécifiques à la formulation (détailé sous-section 3.2.2). Ce modèle converge également très rapidement (inférieur à 1s sur le cas P2k3C4). Ce dimensionnement précis sert d'initialisation pour le problème MINLP.
- Le problème MINLP : Le problème MINLP a une modélisation précise des pertes. Il est possible de laisser la configuration libre entièrement ou en partie (choix entre forçage du maillage ou de la technologie). Le temps de calcul de ce modèle reste raisonnable (5s sur le cas P2k3C4), même si plus de temps est nécessaire par rapport aux modèles simplifiés. Ce modèle est initialisé par les résultats de structure du modèle MILP et les résultats des variables continues du modèle NLP.

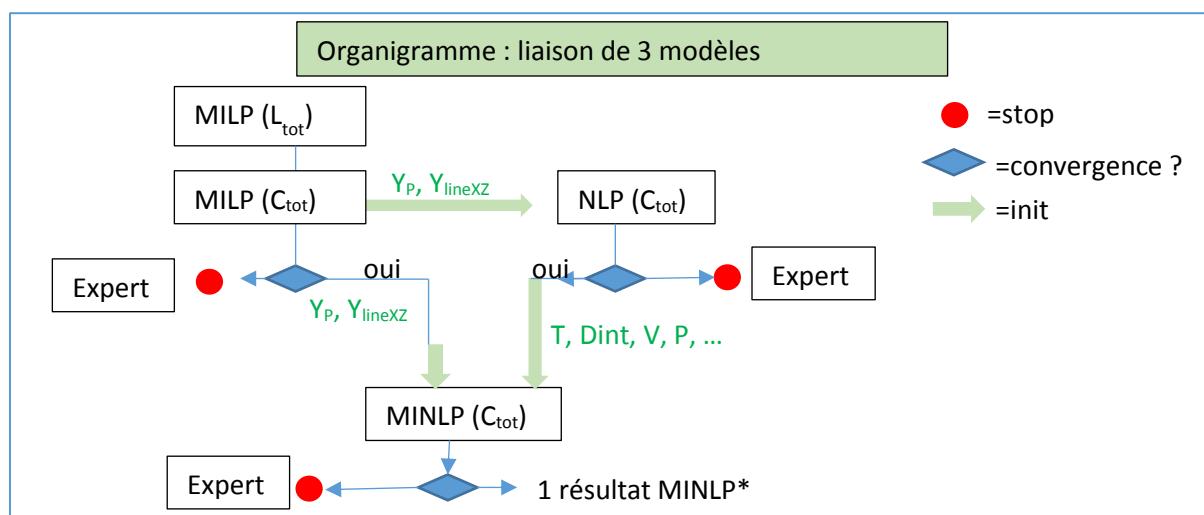


Figure 3-10 Ordinogramme de la stratégie d'initialisation « liaison de 3 modèles »

Voici pour la première étape de la stratégie de résolution « en plusieurs étapes intermédiaires », passons désormais à l'étape de génération de résultats (par l'analyse experte et tirage aléatoire) pour initialiser les prochaines résolutions, ce qui permet d'apporter de la confiance dans la solution trouvée, ou d'en trouver une meilleure, pour les mêmes données d'entrée.

3.3.3 DETAIL GENERATION DE RESULTATS

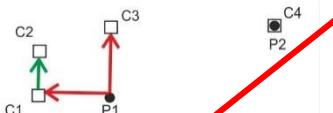
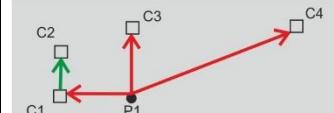
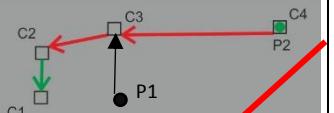
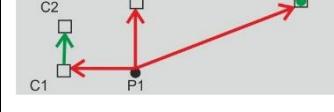
Comme souvent, une idée intuitive de configuration possible du réseau est présente à l'esprit de l'expert. Ce paragraphe propose d'exploiter cette expertise afin d'initialiser le problème. **Ce paragraphe illustre cette 2^{ème} étape de la méthode générique semi-automatique, en s'appuyant sur le cas d'étude P2k3C4.** A partir de 2 configurations sélectionnées par l'expert (Tableau 3-4, zones

3.3 : Stratégie de résolution « en plusieurs étapes intermédiaires »

encadrées), la génération de résultats a permis d'identifier 4 autres configurations, dont 2 écartées (celles rayées) par choix expert (expliqué ci-dessous) :

- Les 2 premières configurations sont obtenues en résolvant l'étape 1 (liaison de 3 modèles) avec des données d'entrée différentes, détaillées ci-dessous, sélectionnées par l'expert. L'export et l'import de ces résultats est très facile et rapide sous GAMS, grâce à l'option (Option# 3 savepoint).
- En supplément à cette analyse experte, il est possible de lancer une série des résolutions de problèmes avec des données d'entrée choisie de manière aléatoire et avec l'initialisation à structure laissée libre (init_Y5 et init_Y3). Cela a permis de détecter 4 autres structures auxquelles nous n'avions pas pensé. Parmi celles-ci, nous avons choisi d'en conserver deux (Figure 3-15 et Figure 3-16). La Figure 3-11 n'est pas conservée, car nous choisissons que la technologie fossile k3 ne puisse exister, et servir d'appoint, que lorsque k2 existe (Figure 3-11). Et la Figure 3-13 n'est pas conservée non plus, car c'est une solution non-optimale, elle admet un coût total prohibitif, notamment dû à la tranchée (P1C3) supplémentaire (à C4C3).

Tableau 3-4 Récapitulatif des générations utiles à l'initialisation du cas d'étude P2k3C4

fossile	 Figure 3-11 L300 P1k1P2k3	 Figure 3-12 L662 P1k1	 Figure 3-13 L676 P1k1P2k2
	init_Y1 init_Y2 structure fixée (k3 sans présence de k2)	init_Y5 init_Y6 structure fixée	init_Y11
EnR&R & appoint fossile	 Figure 3-14 L300 P1k1-P2k2k3	 Figure 3-15 L662 P1k1P2k2	 Figure 3-16 L556 P2k2k3
Ltot	L300	L662	L556
	init_Y3 init_Y4 structure fixée	init_Y7 init_Y8 structure fixée	init_Y9 init_Y10 structure fixée
Contrainte	HinstP2k2<90%HreqC4		HinstP2k2<90%Hreq_tot

Sur l'exemple illustratif P2k3C4, les 4 solutions, qui ne sont que des solutions intermédiaires de la stratégie « en plusieurs étapes intermédiaires », ont été obtenues en fixant les données d'entrées suivantes (soit par analyse experte, soit par tirage aléatoire, les ordres de grandeurs des données d'entrées sont rapportés Annexe A) :

- Figure 3-14 L300 P1k1-P2k2k3: lorsque le coût de la tranchée est élevé et l'EnR&R (p. ex. solaire thermique) est peu chère en termes de fonctionnement : la structure optimale est un approvisionnement isolé pour le consommateur éloigné C4, avec comme technologies une base d'EnR&R (k2) et un appoint en énergie fossile (k3) nécessaire pour satisfaire les pics d'appel de puissance sans surdimensionner l'EnR&R.
- Figure 3-16 L556 P2k2k3: lorsque le coût de la tranchée est abordable (comparée à la structure L300), et qu'il y a un fort potentiel de valorisation de k2 (p. ex. de la chaleur fatale « quasiment gratuite ») à la localisation du consommateur éloigné

- L662 : lorsque le coût de la tranchée est abordable également (comparée aux structures L300), mais qu'il n'y a pas de chaleur fatale « quasiment gratuite » à récupérer, et selon le prix de l'EnR&R :
 - Si l'EnR&R (p. ex. la géothermie) est trop cher à l'investissement et avec coût opérationnel pas assez bas (par rapport à l'énergie fossile), alors un réseau principal avec une production centralisée est optimal (Figure 3-12 L662 P1k1).
 - L'EnR&R (p. ex. le solaire thermique) est installable à un Capex et Opex très intéressant, mais que la technologie d'appoint k3 nécessaire est trop chère, alors la configuration de la Figure 3-15 L662 P1k1P2k2 est optimale.

Ces générations servent pour la prochaine étape de la stratégie de résolution « en plusieurs étapes intermédiaires » (test de minima locaux section suivante 3.3.4) et aussi pour des analyses de sensibilité post-optimale (Chapitre 4). À savoir que pour :

- L'illustration des minima locaux, nous avons choisi uniquement les initialisations init_Y3 et init_Y5, à structure laissée libre, afin d'illustrer l'influence de l'initialisation sur la qualité du résultat.
- Les analyses de sensibilités, au contraire, dans le cas où nous savons si telle ou telle configuration est autorisée (technologie k3 sans k2, grand gisement potentiel d'EnR&R en P2), nous pouvons donc proposer des initialisations à structures fixées. Nous ne pouvons tester sur un même problème les initialisations à structures laissées libres suivantes (init_Y3, init_Y5, init_Y7 et init_Y9), car elles admettent des contraintes différentes sur la puissance maximale de k2, mais nous pouvons tester à structures fixées (init_Y4, init_Y6, init_Y8 et init_Y10).

3.3.4 DÉTAIL ANALYSE DES MINIMA LOCAUX

SYNTHESE DE LA RECHERCHE AUTOMATIQUE DES MINIMA LOCAUX

La troisième étape de la stratégie de résolution « en plusieurs étapes intermédiaires » porte sur la détection automatisée des minima locaux. Cette étape exploite tout d'abord différentes définitions des bornes, ensuite les résultats générés précédemment pour initialiser les prochaines résolutions et enfin (éventuellement) la résolution à la suite de différentes fonction objectif pour ne conserver que le meilleur résultat pour une fonction objectif (le coût global). La procédure de test de minimum local est décrite Figure 3-17. Tous les résultats sont illustrés dans cette sous-section, aussi bien l'optimum, mais aussi tous les minima locaux et les résultats dont les bornes sont saturées sans justification. L'analyse de cette solution optimale sur plusieurs cas d'étude, ainsi qu'une analyse de sensibilité, seront rapportées Chapitre 4.

Les résultats proposés pour analyser les minima locaux **dus aux bornes** sont illustrés seulement à partir d'une initialisation à configuration libre (Figure 3-12 L662 P1k1 init_Y5). Et pour illustrer les minima locaux **dus aux initialisations**, 2 initialisations sont testées (init_Y5 et init_Y3) sans tester les bornes. Les coûts unitaires sont respectivement pour k1, k2 et k2 : en investissement 800 ; 1200 et 1 000€/kW et en fonctionnement 6 ; 2 et 6 ct€/kWh. Et les inflations respectives sont : 4 ; 1 et 4 %. Huit bornes sont testées. Elles correspondent aux 4 catégories de variables bornées directement avec les données d'entrée (cf. Tableau 3-1). Elles sont définies en suivant (borne inférieure/borne supérieure) sur le problème P2k3C4 : température (30/110 °C), diamètre (50/160 mm), pression (130/560 kPa) et vitesse (0,1/1 m/s).

Un tel test nécessite du temps de calcul supplémentaire à la résolution d'un unique problème MINLP, mais l'intérêt est de permettre d'éviter de tomber sur de nombreux minima locaux. Il y a un gain de temps unitaire (une résolution), qui est dû à la réduction du nombre d'itérations (initialisation précise

3.3 : Stratégie de résolution « en plusieurs étapes intermédiaires »

et dont le sous-problème NLP est faisable). Ponctuellement, le gain est significatif (division par 5 voire 10 du temps de calcul). Mais vu que plusieurs résolutions sont alors lancées pour vérifier si l'algorithme n'est pas resté bloqué dans un minimum local, le temps de calcul global (temps calcul unitaire multiplié par le nombre de résolutions avec des initialisations différentes) augmente considérablement (multiplication par le nombre d'initialisations).

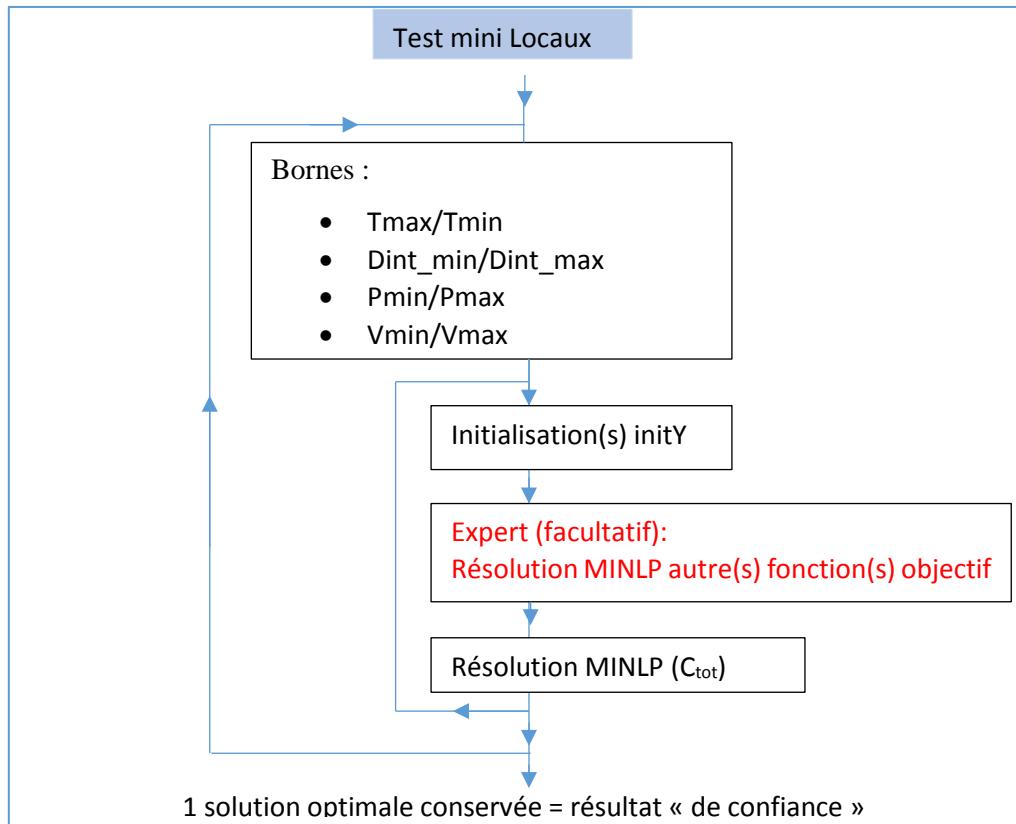


Figure 3-17 Ordinogramme de la structure des tests des minima locaux

Des représentations graphiques parallèles, issues du logiciel xdat (Enguerrand de Rochefort 2015), sont utilisées sur les figures suivantes (de Figure 3-18 à Figure 3-24). De gauche à droite sont analysés en données de sortie : la température maximale et minimale observée à la solution, la puissance à installer en P1 de la technologie k1 (omission par manque de place, de la puissance à installer en P2 suivant les technologies k2 et k3), la longueur totale du réseau, le coût total du réseau à 15 ans, les pertes thermiques spécifiques, les pertes de charge spécifique ainsi que des valeurs de dimensionnement de la canalisation P1C1 (diamètre, vitesse et perte de charge spécifique).

INFLUENCE DES BORNES SUR LES MINIMA LOCAUX

Nous détaillons ici uniquement un exemple d'analyse sur la borne supérieure de la température (T_{max}), par souci de synthèse. Sept bornes ont été définies pour T_{max} , dont 2 avec les bornes (90 et 100°C) et 5 par tirage aléatoire uniforme sur cette plage. L'analyse des minima locaux est présentée avec le tirage des bornes suivant : 103, 108, 93, 91 et 97°C.

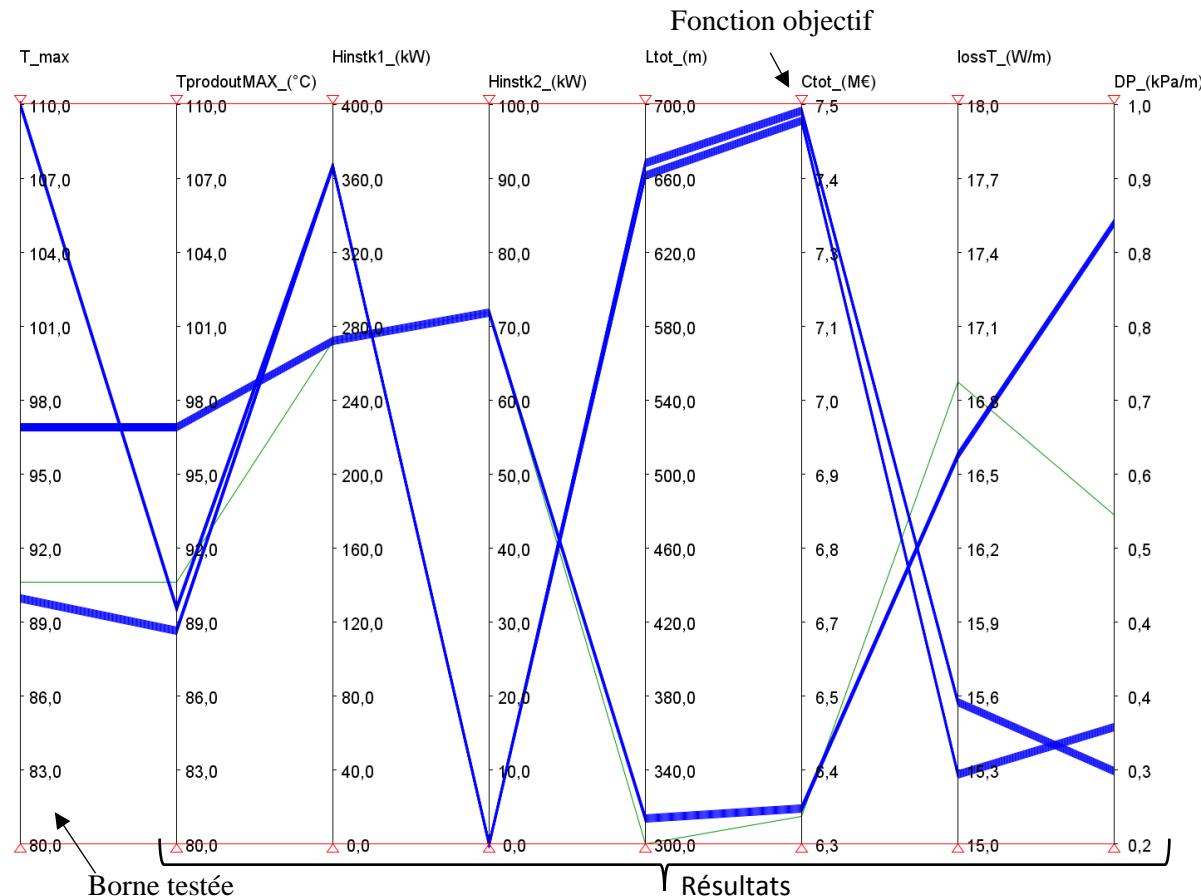
Influence de la borne supérieure de la température

La variation de la température maximale autorisée (borne renseignée par T_{max} en entrée du modèle, colonne de gauche Figure 3-18) implique des variations des résultats (autres colonnes Figure 3-18).

Nous avons initialisé à L662_P1k1 (init_Y5) en laissant libre la configuration, mais l'algorithme trouve bien (avec une EnR&R peu chère, stable dans le long terme et pas trop chère à l'investissement) une solution optimale L300_P1k1_P2k2k3, qui admet une longueur de réseau plus courte et qui valorise l'EnR&R. Et la solution (trait fin vert sur la Figure 3-18) est une solution, dont la résolution a bien convergé vers la configuration L300_P1k1_P2k2k3, mais dont la température est saturée à la borne supérieure.

Néanmoins, deux solutions (en trait gras bleu sur la Figure 3-18, $C_{tot}=7,48 \text{ M€}$) apparaissent clairement comme des minima locaux, car le coût global est 18% plus élevé que par rapport à la meilleure solution trouvée 6,34 M€. Cette différence s'explique facilement, car la configuration solution est L662_P1k1 (c'est-à-dire $L_{tot}=662 \text{ m}$ et $Hinstk1=376 \text{ kW}$). Cette solution admet également un dimensionnement en diamètre et vitesse différent (donc aussi perte de charge et perte thermique différentes).

Parmi ces solutions, une 3^{ème} solution se démarque également (trait gras bleu sur la Figure 3-18, $L_{tot}=314 \text{ m}$) avec une longueur de réseau de 314 m (et non 300m). En fait, P1 a approvisionné C2 et C2 a approvisionné C1 (et non P1C1 et C1C2). Notons bien que le diamètre a été saturé à la borne inférieure, mais il n'implique aucun coût, ni d'investissement ni de fonctionnement.



[Figure 3-18 Influence de la borne Tmax, pour l'init_Y5 \(L662-p1k1\)](#)

Remarquons qu'avec cette initialisation (initY5), seulement 4 résolutions sur 7 (résultats représentés Figure 3-18) ont convergé et seulement 2 vers une solution avec un coût global proche de l'optimal (6,34 M€). Ce qui n'est pas le cas lorsque l'init_Y3 est choisie, avec cette initialisation 100% des résolutions ont convergé et 5 sur 7 (représenté Figure 3-19) vers des solutions avec la configuration L300_P1k1_P2k2k3. **L'initialisation a donc une influence, tout comme le choix des bornes.**

3.3 : Stratégie de résolution « en plusieurs étapes intermédiaires »

Sur ces 2 initialisations et sans les minima locaux identifiés, la meilleure solution (trait gras bleu Figure 3-19) converge vers un coût global 6 345,3 k€, avec une température non saturée à Tmax Les autres solutions convergent en moyenne vers 6 645,9 k€, avec un écart-type de 754€ (à l'horizon de 15 ans). La borne supérieure a une influence, mais néanmoins des ordres de grandeur très proches sont trouvés. L'écart s'explique avec des dimensionnements légèrement différents : la température du réseau primaire oscille entre 90°C et 103°C, les pertes thermiques spécifiques varient entre 16,8-17,4 W/m et les pertes de charge entre 0,55-0,80 kPa/m. Des dimensionnements sont similaires en température minimale de réseau à 30°C (non représentée) et en puissance à installer (P1k1 autour de 272 kW à +/- 0,1 kW ; P1k2 saturé à 72kW, la borne maximale autorisée pour laisser 10% de technologie k3, HinstP1k3=16,8 kW non représentée).

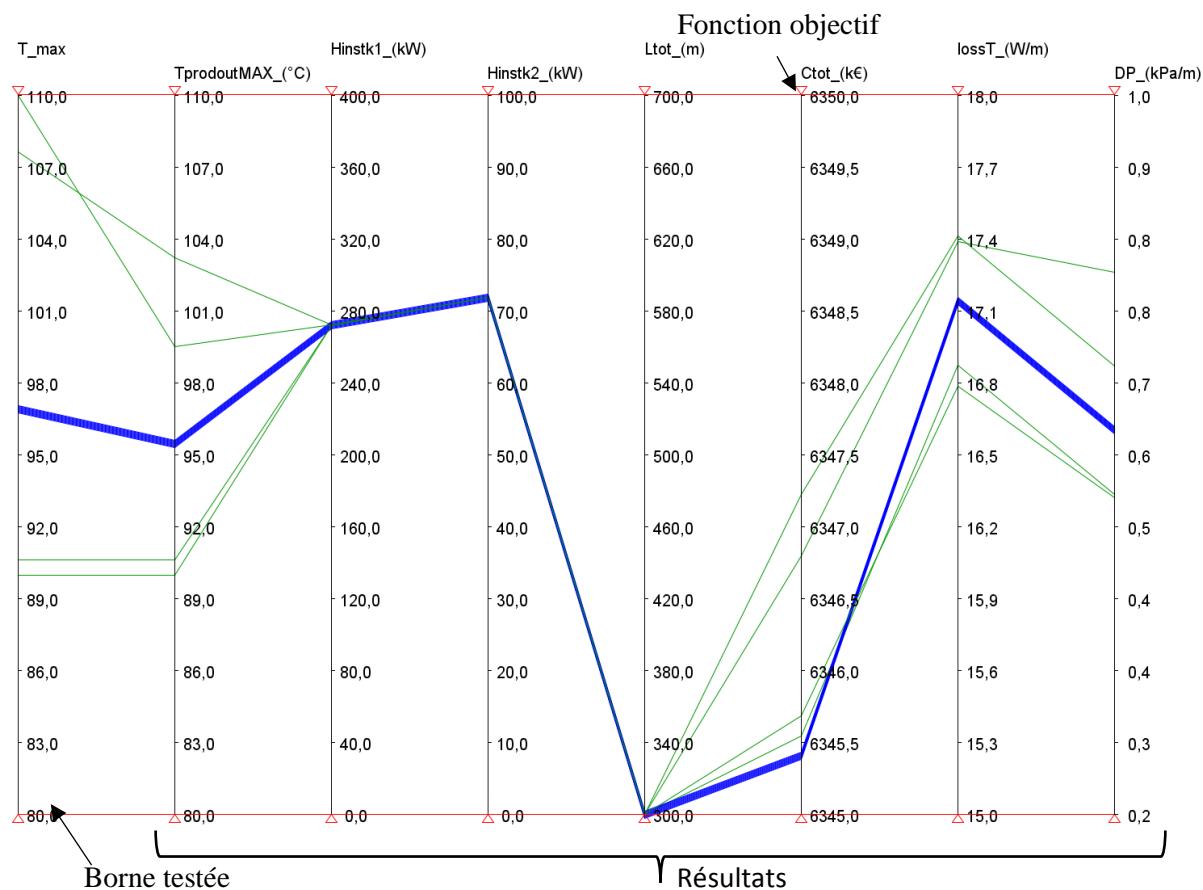


Figure 3-19 Influence de la borne Tmax, pour l'init_Y3 (L300-P1k1-P2k2k3), seules les résolutions ayant convergées vers L300-P1k1-P2k2k3 sont représentées

Analyse simultanée

L'analyse simultanée des variations des bornes « numériques » permet de **confirmer la pertinence de la méthode du « test des minima locaux »**. En effet, 7 bornes ont été définies, dont 2 avec les bornes (spécifiées dans le Tableau 3-5) et 5 par tirage aléatoire uniforme sur une plage de valeurs.

C'est un test « numérique ». Il a par exemple été vérifié que la pression minimale effective n'est jamais inférieure à 2 bar, malgré le fait que la borne inférieure testée soit même parfois inférieure à la pression atmosphérique.

Tableau 3-5 Plage de variations pour le test des bornes « numériques »

Bornes	Plage
Température maximale en sortie de chaudière	90 - 110°C
Température minimale en entrée de chaudière	15 - 35°C
Diamètre minimum	35 - 70 mm
Diamètre maximal	130 - 170 mm ;
Pression minimale	80 - 180 kPa
Pression maximale	440 - 560 kPa
Vitesse minimale	0,05 - 0,1 m/s
Vitesse maximale	0,5 - 1,5 m/s

Le fait de réaliser un **tirage aléatoire sur l'influence des bornes permet d'aller très vite sur la génération d'un fichier input** pour tester les minima locaux (conservation du résultat le plus petit, pour les mêmes données d'entrée, testée avec des bornes différentes). Nous pourrions choisir de faire augmenter chaque borne, une à une, de manière croissante, mais l'inconvénient serait alors que l'initialisation avec le résultat précédent est moins intéressante pour détecter des minima locaux. De plus, si nous choisissons de tester l'influence de ces 8 bornes, si nous prenons N valeurs pour chacune de ces 8 bornes, l'énumération de toutes les possibilités mènerait à 8^N tests nécessaires.

Les résultats des 7 tests sur toutes les 8 bornes simultanément sont rapportés Figure 3-20, pour une seule initialisation (init_Y5). Une majorité de résolutions (5 sur 7) ont convergé, mais 2 vers des minima locaux (identifiés trait gras bleu Figure 3-20). La meilleure solution trouvée est plus faible (6319 k€, au lieu de 6 345€, soit une réduction -0,40%). Le dimensionnement en puissance est similaire (271kW k1, 72kW k2 et 16,8 kW k3) à la Figure 3-19, alors que les pertes thermiques ont été diminuées à 13,7 W/m malgré une température de distribution autour de 107°C et une température retour à 43°C.

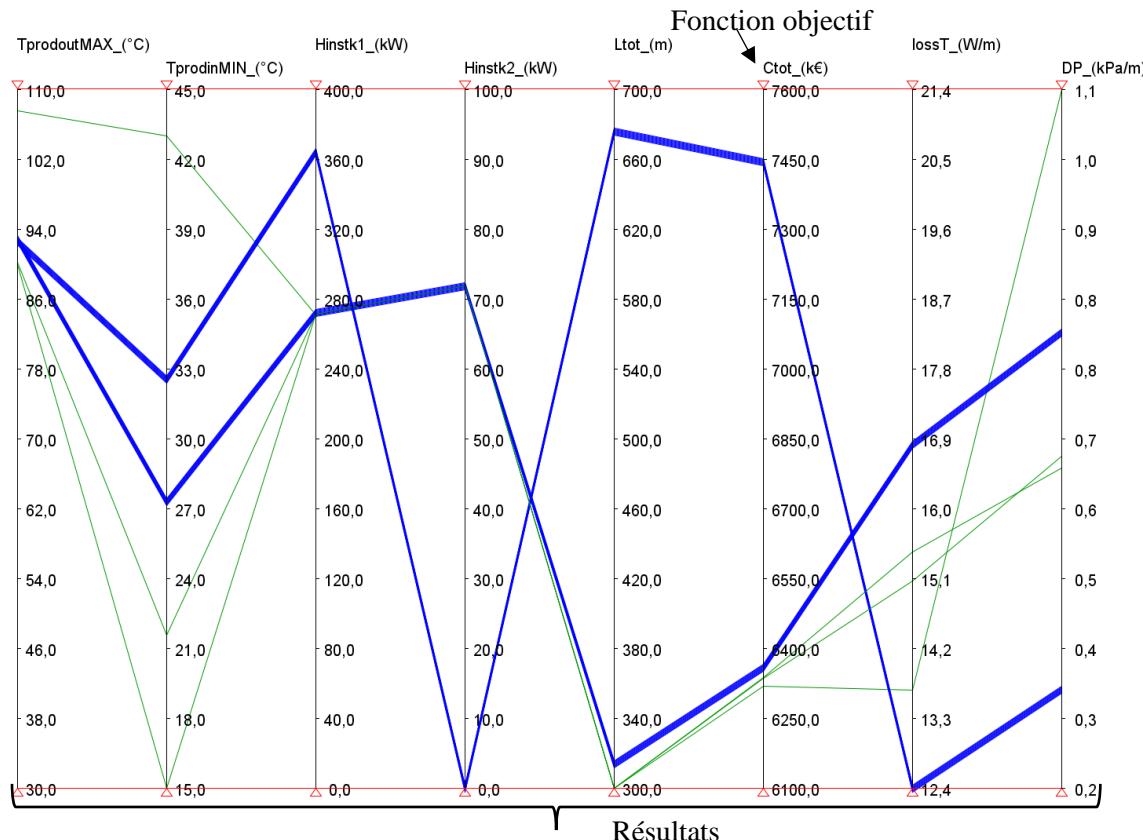


Figure 3-20 Résultats de l'analyse simultanée avec 8 bornes aléatoires pour une initialisation (init_Y5)

INFLUENCE DE L'INITIALISATION SUR LES MINIMA LOCAUX

Comme précédemment pour l'étude de l'influence des bornes, la détection de minima locaux est illustrée sur le cas d'étude académique P2k3C4. Cette étude sur les initialisations inclut l'analyse précédente de l'influence des bornes. Rappelons qu'avant, les figures ne représentaient les résultats qu'à partir d'une seule initialisation, ici les résultats sont illustrés pour les 2 initialisations.

Ainsi sur les 2 tests d'initialisation et sur chacun des 7 tests aléatoires des 8 bornes, 80% des résolutions ont convergé (Figure 3-21), les configurations à exclure sont clustérées avec un trait gras bleu.

Toutes les solutions, excepté les minima locaux écartés précédemment, correspondent à un coût global moyen de 6 338 k€ avec un écart-type de 20 k€ (Figure 3-22). La meilleure solution (clustérée en trait gras bleu Figure 3-22) propose une solution avec un coût global à 6 320 k€ à l'horizon 15 ans, des pertes thermiques spécifiques à 13,7 W/m et des pertes de charge spécifiques de 1,1 kPa/m. Une solution moins chère est bien obtenue en testant différentes bornes.

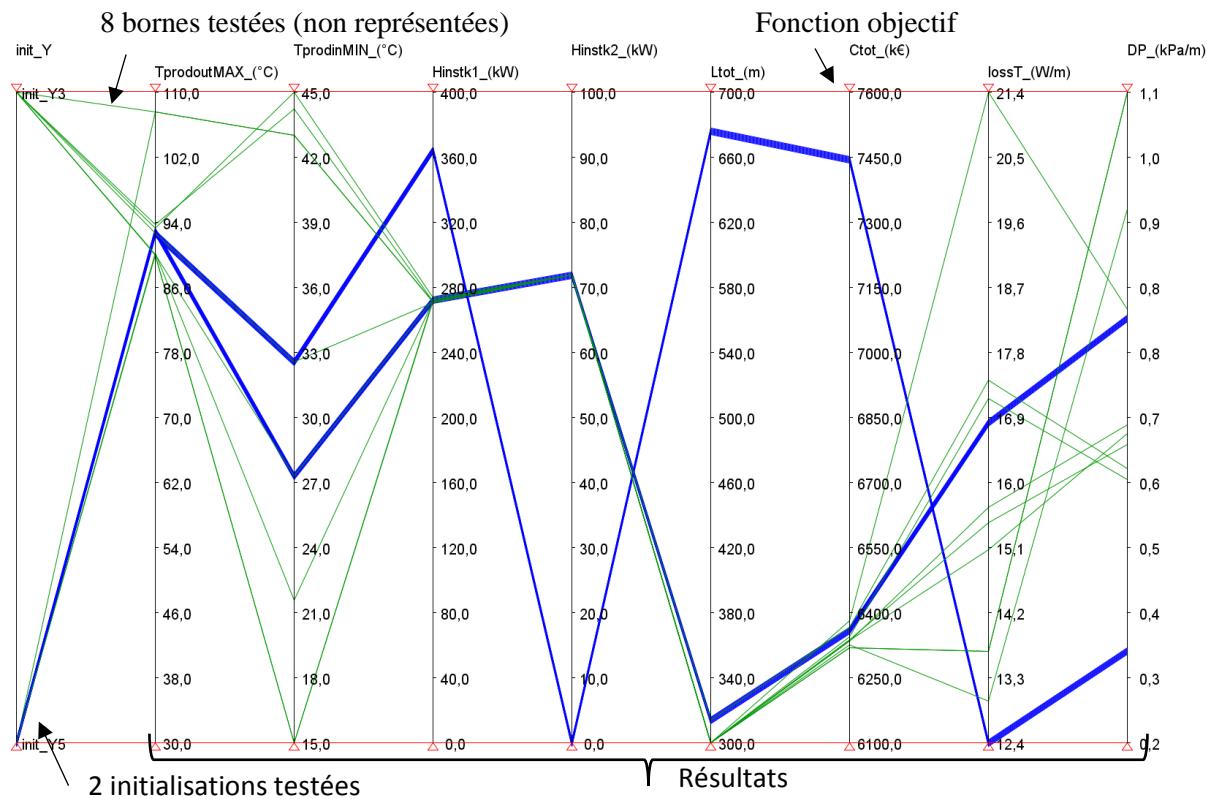


Figure 3-21 Toutes les solutions (en trait bleu les résultats à écartier, facilement identifiable à cause d'un maillage différent observable à Ltot)

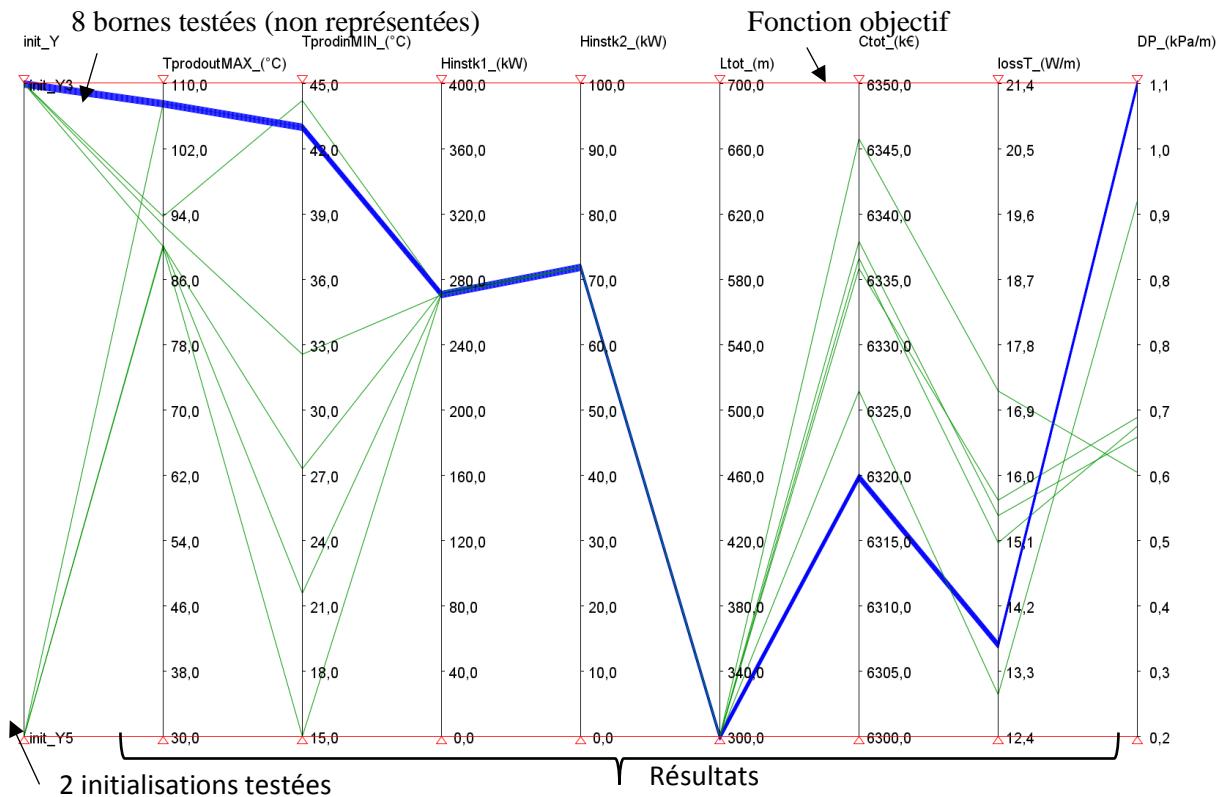


Figure 3-22 Différenciation du coût (après avoir éliminé les minima locaux précédents de la Figure 3-21), la solution optimale est représentée en trait gras bleu)

Ainsi nous utilisons cette méthode de résolution « en plusieurs étapes intermédiaires », qui est semi-automatique et facile à mettre en place par l'utilisateur de l'outil proposé. Néanmoins des stratégies d'un expert de l'optimisation peuvent apporter une plus-value intéressante pour l'optimisation des RCU.

3.4 STRATEGIES DE L'EXPERT ADAPTEES AU RCU

Étant donnée la complexité du problème MINLP à résoudre, diverses stratégies adaptées pour l'optimisation de la configuration et du dimensionnement de RCU ont été mises en place, que l'expert peut éventuellement ajouter en complément de la méthode générique semi-automatique développée.

Les dernières sous-sections (3.4.4 et 3.4.5) présentent déjà des solutions optimales, mais vu qu'elles traitent de différentes fonctions objectifs, de telles analyses ont plutôt leurs places dans la stratégie de résolution. Nous souhaitons montrer que malgré une formulation avec une seule fonction objectif, il est possible (et logique) d'obtenir des résultats différents lorsque différentes fonctions objectifs sont considérées, mais aussi que la résolution à la suite de problèmes résolus avec des fonctions objectifs différentes permettent d'apporter plus de confiance dans la solution trouvée.

3.4.1 RESOLUTION DE DIFFERENTS MODELES : DU SIMPLE AU COMPLEXE

Dans le cadre de l'optimisation simultanée de la configuration et du dimensionnement de RCU, il est judicieux de résoudre des problèmes intermédiaires. Une telle analyse a déjà été proposée sous-section (3.3.2), nous proposons ici de compléter le choix des modèles selon les besoins de l'expert, de façon non automatisée.

L'avantage de telles résolutions simplifiées intermédiaires est de procurer une initialisation de qualité au problème MINLP complet. Il est possible d'exporter les résultats, tous ou en partie, d'un modèle simplifié afin d'initialiser le problème plus général. Seulement une partie des résultats ou l'ensemble des variables peuvent être utilisés. Dans le cas partiel, on pense notamment à toutes les variables binaires, les variables continues étant quant à elles initialisées de façon générique (min, max, moyenne).

L'inconvénient est de devoir traiter différents problèmes, ce qui nécessite du temps de la part de l'expert. Le temps de calcul machine supplémentaire est négligeable devant le temps expert, même lorsque de nombreuses résolutions sont lancées à la suite (comme pour les tests de minima locaux ou les analyses de sensibilité post-optimales).

LES DIFFERENTS MODELES DISPONIBLES

Le Tableau 3-6 est l'énumération des différents modèles qui sont envisageables pour l'optimisation des RCU. Dans l'étape 1 de la stratégie de résolution « en plusieurs étapes intermédiaires » retenue (nécessité de liaison des modèles par un expert Figure 3-10), il est possible de choisir certaines caractéristiques (Tableau 3-7) :

- Forçage de la configuration et résoudre un problème NLP, ou forcer juste certaines variables de configuration (la technologie ou le maillage) pour résoudre un problème MINLP.
- Modélisation des caractéristiques de l'eau, guidée par la gamme de température visée. Si $<100^{\circ}\text{C}$ les caractéristiques de l'eau sont considérées comme constantes alors que sur la gamme de 30 jusqu'à 150°C , nous avons pris des corrélations dépendantes de la température (détaillées Annexe B).
- Forçage AR ou non des canalisations dans une même tranchée (expliqué sous-section 2.5.2 sur le coût de la tranchée).

Tableau 3-6 Détails des différents modèles, classé par type de problème d'optimisation (lignes grisées jamais retenues)

Type de problème	Détail du modèle	Rapidité de résolution	Efficacité pour l'initialisation du problème MINLP
MILP	Aucune modélisation précise des pertes (le ratio des pertes thermiques sur l'énergie totale livrée est fixé à 5% et le coût de pompage est estimé à 1% du coût total) + Température et DN fixé.	+++	-- Il n'est pas possible d'initialiser problème MINLP avec les résultats du problème MILP, trop de variables ne sont pas correctement initialisées.
NLP	Modélisation physique des pertes, mais à configuration fixée (maillage du réseau ET technologie de production).	+++	++ Comme le sous-problème NLP est coûteux à résoudre dans le problème MINLP, une bonne initialisation par ce sous-problème NLP est essentielle.
MINLP	Aucune modélisation précise des pertes (juste un %).	-	-- La convergence n'est pas guidée pour l'équilibre des pertes de charge/perte thermique.
	Avec des ratios (thermique en W/m et de charge en kPa/m).	---	-- Convergence difficile. Les bornes peuvent être saturées, sans justification physique.
	Avec une borne restrictive sur les distances.	+++	-- De nombreuses solutions peuvent être écartées.
modélisation précise des pertes	Configuration libre.	+	++ Solution retenue, détail section 3.3.
	Avec forçage de la configuration (maillage de réseau OU technologie production).	++	++ Solution retenue, pour vérifier si une configuration (maillage de réseau OU technologie production) est optimale, détail section 3.3.

Tableau 3-7 Énumération des 4 modèles différents étudiés (9 modèles disponibles)

Nom du modèle	Choix configuration	Gamme température	Choix canalisation AR
MILP	libre	[60-100°C]	aller-retour obligé
NLP	fixée	étendue [30-150°C]	
MINLP_AR_Cp	libre (ou soit maillage fixé, soit technologie fixée)	[60-100°C]	
MINLP_aller_Cp(T)		étendue [30-150°C]	aller ou retour

La comparaison des 3 premiers modèles sur la gamme de température commune [60-100°C] est réalisée ultérieurement sous-section (4.1.1), en réalisant une analyse de sensibilité sur la température requise par les consommateurs.

L'analyse de sensibilité est étendue, ultérieurement sous-section (4.1.2), jusqu'à 150°C pour le modèle MINLP_aller_Cp(T), afin d'étudier l'impact de ces variations sur la configuration et le dimensionnement.

MODELES NON RETENUS PAR DEFAUT DANS LA STRATEGIE « EN PLUSIEURS ETAPES INTERMEDIAIRES »

MINLP sans perte

Certes le fait de ne pas prendre en compte les pertes évite de nombreuses équations non linéaires. Néanmoins, il reste des équations non linéaires dans l'écriture des bilans d'enthalpie où des variables se multiplient entre elles (un débit multiplie un écart de température). Ainsi ce modèle qui ne tiendrait pas compte des pertes, n'est pas précis et s'écarte de notre positionnement, mais surtout il ne permet pas de simplifier le modèle MINLP en modèle MILP.

MINLP avec restriction par ratio sur les pertes de charge

Au lieu de calculer la borne supérieure des pertes de charge spécifique (ramenée au mètre de canalisation) avec l'équation [Eq 2-50] en prenant la borne supérieure de la vitesse et la borne inférieure du diamètre, la borne supérieure est renseignée à priori.

Comme illustré Figure 3-23, il a été choisi de ne pas borner les pressions (sous-section 3.2.1), et de directement borner les pertes de charge (entre 0,01 et 2 kPa/m) pour toutes les canalisations. Un écart de 1,6% a été constaté entre le coût global obtenu (8,71 M€) avec la borne minimale imposée (0,05 kPa/m) et le coût global obtenu (8,57M€) avec la borne maximale imposée (10 kPa/m). Il n'a pas été constaté d'écart lorsque la borne maximale des pertes de charge était plus élevée.

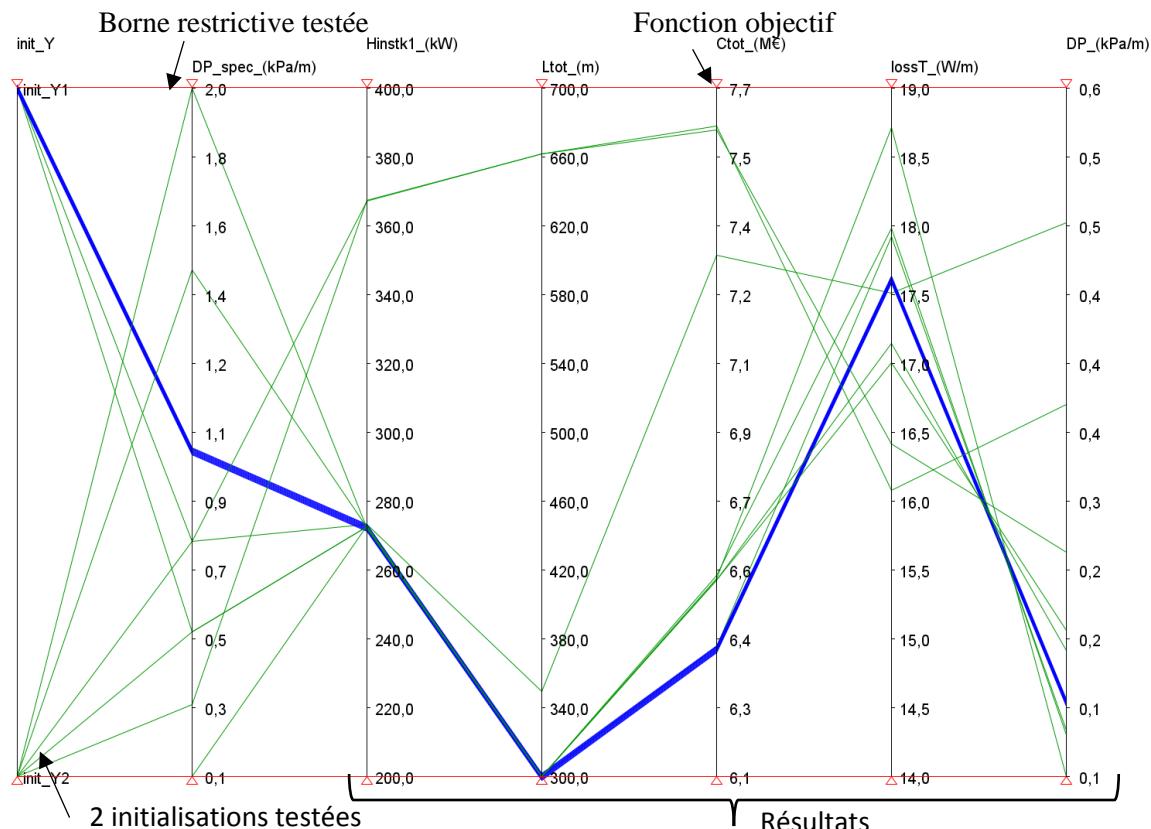


Figure 3-23 Résultats pour différentes bornes maximales renseignées pour les pertes de charge (entre 0,1 et 2 kPa/m)

MINLP avec restriction par ratio sur les pertes (thermique)

Un modèle simplifié est testé ici concernant la prise en compte des pertes thermiques avec un ratio de perte de température pour 100 m de canalisation (un ratio proposé dans les données constructeurs de canalisations). Celui-ci est pris en compte à la place de l'équation [Eq 2-44] pour la définition de la température de sortie de canalisation et les équations de résistance thermiques [Eq 2-45 à Eq 2-47] sont enlevées.

Comme pour les modèles retenus, toutes les résolutions n'ont pas convergé, donc ce modèle simplifié ne permet pas d'améliorer la convergence en simplifiant le modèle. De plus, les résultats (Figure 3-24) impliquent une grande variation du coût global du réseau : avec 2 résultats distinctement trop chers (7,3 et 7,7 M€ du fait d'un changement de configuration respectivement L662 et L314) et également une moyenne (6,40 M€) avec un écart-type à 54 k€.

Mais surtout, la physique n'est pas prise en compte, en effet nous constatons logiquement une variation des pertes thermiques, mais sans variation des pertes de charge.

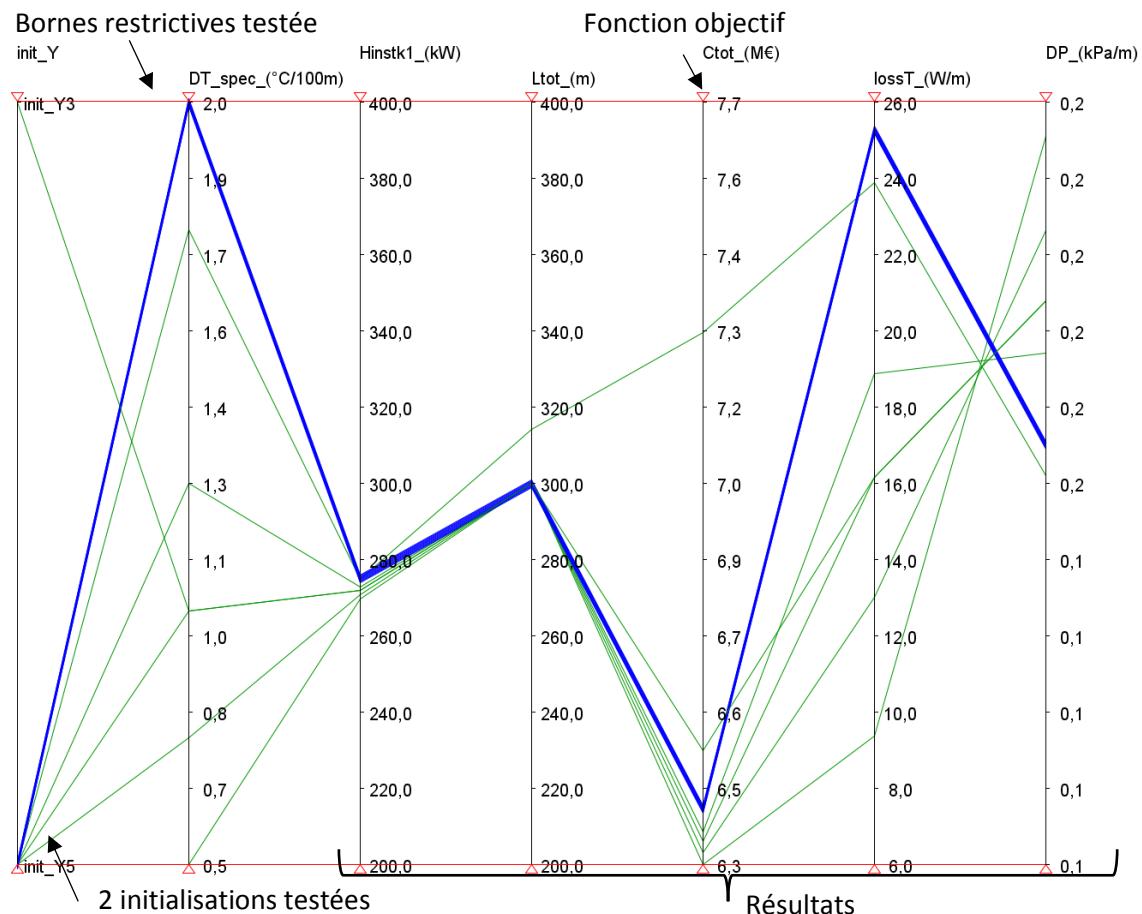


Figure 3-24 Résultats pour différentes bornes maximales renseignées pour les pertes de thermique rapportées à 100m de canalisation (entre 0,5 et 2 °C/100m)

MINLP avec restriction sur les distances de canalisations

Ce paragraphe permet illustrer l'intérêt de laisser la possibilité d'optimiser le maillage du réseau. En effet, une valeur de distance maximale renseignée en entrée permettrait de limiter la combinatoire. Sur l'exemple P1k1C4, les 4 configurations en bas du Tableau 3-8 seraient éliminées si la distance entre consommateurs (DistCCmax) était limitée à 61m. La limitation à 183m a l'avantage d'exclure l'approvisionnement les canalisations C1C4 et C2 C4, qui paraissent absurdes. Des gains de calcul ont été ainsi réalisés et il est possible de travailler avec une borne sur les distances (à 201m) sur des réseaux fictifs jusqu'à 20 consommateurs alignés et espacés régulièrement (à 200m), sans stratégie « en plusieurs étapes intermédiaires » de résolution.

Mais cette solution « de restriction » a l'énorme inconvénient d'exclure des solutions acceptables de l'espace de recherche, lorsque :

- Le consommateur éloigné (ici C4) est tellement éloigné, que la distance de restriction inclut quasiment toutes les autres connexions entre consommateurs.
- Les régimes de températures sont différents. Les conditions de régimes de température sont représentées dans les lignes du tableau sous les schémas.
- Un autre producteur est autorisé sur la localisation du consommateur éloigné.

Tableau 3-8 Plusieurs topologies de réseaux différentes, suivant la distance maximale (entre consommateurs) servant de borne : en haut 61m et en bas 183m. Les configurations sont optimales si les régimes de température coïncident et s'il n'y a pas de restriction sur la distance

DistCC max=61	
régime de température	peu importe, sauf Treq(C1) ≥ Treq(C2)
DistCC max= 183	
régime de température	C1 HT, C2 BT et C3 TBT C3 HT, C2 BT et C1 TBT C1 THT, C2 HT, C3 BT et C4 TBT C3 HT et C4 BT

3.4.2 RESOLUTION DU RESEAU SUR DES SOUS-QUARTIERS : LIAISON D'INITIALISATION

La stratégie d'initialisation liant 3 modèles, détaillée sous-section précédente Figure 3-10, est efficace jusqu'à une certaine taille de problème. Il a été en effet constaté, sur le problème (Figure 3-25) avec 38 consommateurs, que l'algorithme ne converge pas sans une initialisation précise du maillage du réseau. Il a été testé de :

- Limiter la distance des canalisations : ce modèle est détaillé paragraphe précédent, mais non retenu pour la stratégie d'initialisation liant 3 modèles. Il sert parfois pour l'analyse experte afin d'éviter que le consommateur C1 puisse potentiellement tester la combinatoire de se connecter avec des consommateurs présents dans un autre quartier (>C23).
- Ou alors de résoudre le problème sur plusieurs sous-quartiers. Comme illustré Figure 3-25, c'est-à-dire de renseigner un premier problème sur une partie du quartier, puis un deuxième problème avec l'autre partie du quartier, pour finalement utiliser le résultat de ces 2 problèmes sur des sous-quartiers pour initialiser le problème sur le quartier en entier. Ainsi il est possible de traiter des problèmes de grande taille, en « automatisant » en grande partie l'initialisation. Néanmoins, un temps expert est toujours nécessaire pour le raccord des initialisations.

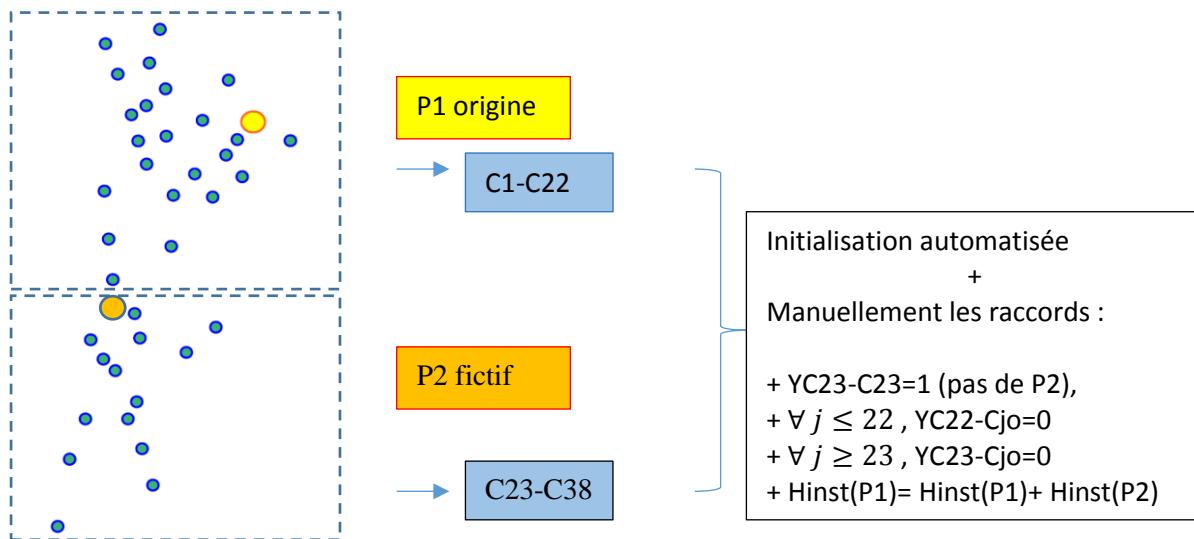


Figure 3-25 Exemple de résolution en 2 sous-parties du réseau

3.4.3 RESOLUTION DU RESEAU A DIFFERENTES ECHELLES SPATIALES : AGREGATION DES BESOINS THERMIQUES DE BATIMENTS

Afin de résoudre un problème à l'échelle territoriale plus large (Figure 3-27), il peut être utile d'agréger différents quartiers (Figure 3-26). La résolution du problème à grande échelle peut permettre de savoir si l'approvisionnement à partir d'un site de production éloigné (rectangle vert au sud Figure 3-27) est rentable ou non. L'étude « typique » permettrait de vérifier la pertinence de la récupération de chaleur sur un site éloigné. Les résultats de ce 1^{er} problème d'optimisation permettent de proposer l'initialisation (voire le forçage) de la canalisation principale (ou « feeder ») et de considérer le problème à résoudre plus proche de l'échelle du quartier.

Un raisonnement similaire à différentes échelles s'applique lors de l'extension potentielle d'un réseau, ou de la réflexion d'interconnexion de réseau. Une limite de ce raisonnement est le choix des structures agrégées (nombre, taille, localisation). Des méthodes de clustering seraient appréciées.

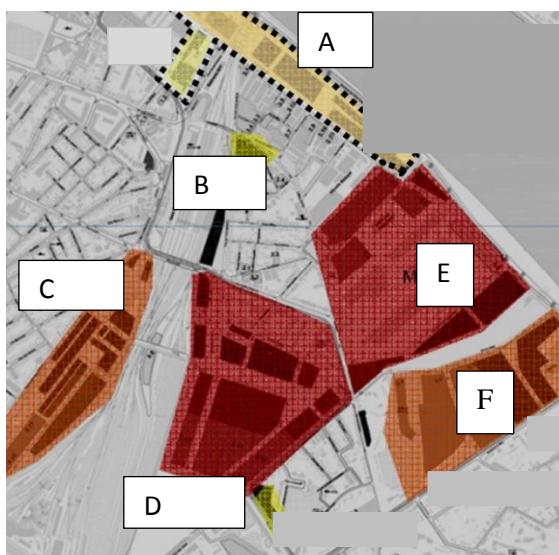


Figure 3-26 Agrégation des différents quartiers

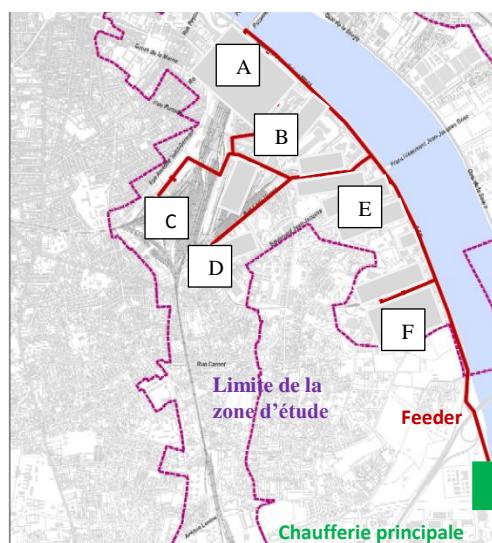


Figure 3-27 Pré-structure (dire feeder) établie

3.4.4 RESOLUTION DE DIFFERENTES FONCTIONS OBJECTIFS

Une résolution à la suite de 2 problèmes, minimisant une fonction objectif différente (L_{tot} et C_{tot}), est déjà utilisée dans la stratégie d'initialisation liant 3 modèles pour résoudre le problème simplifié MILP (détailé sous-section 3.3.2). Il est intéressant et complémentaire d'analyser les résultats obtenus, pour un même problème, mais avec différentes fonctions objectifs. L'inconvénient est qu'il faut du temps expert afin d'aider au choix, parmi ces solutions optimales. Un autre avantage (à une analyse complémentaire) est de pouvoir améliorer la convergence du problème.

Dans le Tableau 3-9, chaque colonne représente une résolution avec la fonction objectif indiquée (une seule, sauf la dernière colonne, où 2 résolutions sont lancées à la suite avec des fonctions objectifs différentes). À l'optimum trouvé (meilleur résultat sélectionné parmi les résolutions selon $init_Y5$ et $init_Y3$, ainsi que le test aléatoire sur les 8 bornes), les indicateurs de sorties sont rapportés sur les lignes du tableau.

Toutes les fonctions objectifs sont minimisées, sauf la puissance installée d'énergie renouvelable (dans P2k3C4, la technologie k2 est considérée comme renouvelable) qui est maximisée.

Il est nécessaire ensuite d'aider à choisir parmi les optima trouvés :

- Solutions non-Pareto optimales :
 - La solution trouvée, en minimisant l'OPEX en fonction objectif (nombre surligné en rouge), est dominée par un résultat optimum trouvé avec une autre fonction objectif. Cette solution est donc non-Pareto optimal.
 - Lorsque l'on considère 2 résolutions lancées à la suite (la dernière colonne, résultats surlignés en vert), la première maximisant $HinstEnR$ et la deuxième minimisant C_{tot} , une telle résolution à la suite permet de surclasser les résultats trouvés en minimisant le coût global, les GES et l'OPEX.
- Solutions pareto-optimal (ou non dominées) :
 - La solution de la dernière colonne convient si le décideur s'intéresse au plus faible coût global et à la plus faible émission de GES. L'installation d'EnR&R est favorisée, mais elle est dominée par des résultats obtenus avec d'autres fonctions objectifs.
 - Si l'investissement est de première importance pour le décideur, le résultat obtenu avec la minimisation de ceux-ci est à conseiller.
 - Concernant la longueur totale de réseau, le choix est plus compliqué. La solution issue de la minimisation des investissements semble appropriée. Néanmoins, nous ne pensons pas que la minimisation de la distance totale du réseau soit un critère pertinent pour l'aide à la conception des réseaux. Nous conseillons plutôt une analyse de sensibilité sur l'impact du coût de certaines tranchées (p. ex. moins cher si passage en vide sanitaire, ou coût prohibitif pour le passage d'un pont)

Nous retiendrons que :

- Des résultats optimaux différents peuvent être obtenus en fonction de la priorité du décideur, ou autrement dit de la fonction objectif considérée.
- Mais également que le changement de fonction objectif aide à la convergence, en choisissant une fonction objectif différente dans plusieurs problèmes à la suite (comme dans cette section). Rappelons que nous avons choisi cette option dans la méthode de résolution globale, où dans la première étape de liaison de modèle, un problème MILP minimise la longueur totale de réseau dans un 1^{er} temps, puis le coût total dans un 2^{ème} temps.

Tableau 3-9 Analyse des 7 résultats obtenus avec des fonctions objectifs différentes

Indicateurs	unité	Fonctions objectifs						
		Ctot	Ltot	GES	CAPEX	OPEX	HinstEnR	HinstEnR+Ctot
Ctot	k€	4 836	6 387	4 975	6 353	8 259	5 888	4 315
Ltot	m	936	300	1 196	300	1 326	1 566	556
GES	tCO ₂	54	593	47	588	790	59	46
CAPEX	M€	3 335	2 088	3 558	2 077	2 877	4 219	2 921
OPEX	M€	1 501	4 299	1 418	4 275	5 383	1 669	1 139
HinstEnR	kW	367	89	368	88	0	417	361

3.4.5 AMORTISSEMENT A DIFFERENTS HORIZONS TEMPORELS

Il est intéressant lors de la résolution de raisonner à l'horizon temporel, car il est important que les ordres de grandeur entre postes de consommation soient semblables, une importance du « scaling » souligné dans la notice CONOPT (DRUD 2008). Mais en changeant aussi rapidement la durée d'amortissement, l'amortissement des appareils ou leur renouvellement ne sont pas pris en compte. Et il ne faudrait pas proposer cette étude pour un horizon temporel supérieur à 30 ans, sinon il faudrait prendre en compte le renouvellement de certains gros équipements (réfection de chaudière et/ou de canalisation), ce qui n'est pas proposé pour l'instant.

Les résultats (Tableau 3-10) recensent 2 configurations principales :

- La première configuration optimale trouvée, à l'horizon temporel 1 an, correspond à la configuration de l'initialisation init_Y3 (Figure 3-14 L300 P1k1-P2k2k3), un approvisionnement à partir d'une énergie fossile.
- La deuxième configuration trouvée, suite à l'autre initialisation laissée possible init_Y5 (Figure 3-12 L662 P1k1), est un approvisionnement à partir de l'EnR&R.

Plusieurs constats :

- L'init_Y5 a permis de trouver une autre configuration, car la puissance en EnR&R n'est pas bornée à 90% du seul consommateur éloigné, ainsi dès que le raisonnement long terme intervient, le choix de sécuriser l'approvisionnement énergétique est privilégié. Dans le cadre d'une analyse de sensibilité, où seulement un faible potentiel d'EnR&R est exploitable en P2, il ne faut pas initialiser à l'init_Y5 MINLP, mais init_Y6 à configuration fixée.
- A 30 ans, la solution trouvée est non-pareto optimale, car elle est dominée par la solution trouvée à l'horizon temporel de 5 ans. Ainsi, nous choisissons de ne pas minimiser le coût global à 30 ans, car le dimensionnement est délaissé au profit d'un choix de la configuration. De plus, nous souhaitons que la solution soit rentable à un horizon temporel plus proche, **nous avons donc choisi la plupart du temps de minimiser le coût global à 15 ans dans le Chapitre 4.**
- La longueur de réseau que nous estimons Pareto optimale ($I=556m$) n'est obtenue qu'à l'horizon temporel de 5 ans. Ainsi nous retiendrons l'intérêt d'effectuer des initialisations à maillage de réseau fixé (en laissant libre le choix de la technologie).
- La répartition des coûts de fonctionnements par rapport aux investissements (Tableau 3-11) semble intéressante (12%) pour la solution trouvée avec Ctot1, mais dès lors que la réflexion long terme intervient, les proportions s'inversent (84% à 30 ans) du fait notamment de l'inflation de l'énergie fossile. Ce qui est moins le cas avec les solutions trouvées avec les fonctions de coût total considérées à l'horizon temporel étudié, même si les coûts de fonctionnement représentent jusqu'à 45% à 30 ans.

3.4 : Stratégies de l'expert adaptées au RCU

Tableau 3-10 Comparaison des résultats obtenus en fonction de différents horizons temporels (de 1 à 30 ans) testés

Fonction objectif	Hinst (kW)			Ltot (m)	Ctot1	Ctot5	Ctot10	Ctot15	Ctot30	H_spec (W/m)	DPspec [kPa/m]	GEStot (tCo ₂)
	k1	k2	k3		(M€)							
Ctot1	26 9	65	24	300	1,350	2,364	4,102	6,579	22,633	8,11	2,94	635,7
Ctot5		361		556	1,751	2,328	3,211	4,315	9,599	9,59	4,52	46,8
Ctot10		362		666	1,812	2,402	3,305	4,434	9,840	8,91	4,38	48,0
Ctot15		362		592	1,771	2,353	3,241	4,351	9,660	9,78	4,75	46,5
Ctot30		363		592	1,774	2,356	3,245	4,355	9,662	10,95	4,22	46,1

Tableau 3-11 Comparaison de la répartition CAPEX/OPEX

horizon (année)	solution Ctot1			solution CtotN		
	Ctot	OPEX	CAPEX	Ctot	OPEX	CAPEX
1	1,35	12%	88%	1,35	12%	88%
5	2,36	41%	59%	2,33	15%	85%
10	4,10	59%	41%	3,30	25%	75%
15	6,58	69%	31%	4,35	32%	68%
30	22,63	84%	16%	9,66	45%	55%

Des études complémentaires sur des scénarios d'inflation du cours de l'énergie seraient également appréciées dans le cadre d'étude d'opportunité énergétique. De telles études ne sont pas réalisées dans ce manuscrit. Néanmoins, une analyse de la variation du coût global sur plusieurs horizons temporels sera proposée sur un RCU 100% fossile (Figure 4-11). De plus, une comparaison en coût global de l'introduction d'EnR&R par rapport à une solution d'approvisionnement fossile sera proposée au Chapitre 4, p. ex. Figure 4-14.

L'intérêt de la comparaison en coût global est d'aider à la décision, sur le long terme, pour l'approvisionnement énergétique le plus rentable et le moins risqué financièrement. Toute la pertinence de l'analyse est un équilibre entre les coûts unitaires initiaux, l'inflation et l'horizon temporel considéré. C'est pourquoi ces données d'entrée sont à l'étude des analyses de sensibilité dans le Chapitre 4 Résultats.

3.5 CONCLUSION DU CHAPITRE

Nous avons choisi l'environnement GAMS pour la modélisation algébrique du modèle de RCU. L'usage de cet environnement permet de faire appel facilement à de nombreux solveurs commerciaux d'optimisation performants. La résolution est réalisée avec le solveur DICOPT, qui utilise la méthode OA/ER/AP (Outer Approximation / Equation Relaxation / Augmented Penality). Cette résolution déterministe d'approximation externe permet de résoudre **rapidement** un problème MINLP, avec de **nombreuses contraintes** (grâce au complément d'une méthode de relaxation d'équations) et avec un traitement, dans une certaine mesure, des problèmes non convexes (grâce à une méthode de pénalisation augmentée).

Les stratégies classiques de résolution (bornes et initialisation) sont nécessaires pour la convergence du modèle MINLP. Nous qualifions ces stratégies classiques de « simples et spécifiques », car elles sont inhérentes à la formulation, un expert travaillant à l'optimisation n'a pas besoin de programmer d'autres initialisations ou bornes dans GAMS. De plus, elles sont qualifiées de simples quand elles sont résolues indépendamment (un seul modèle, une seule fonction objectif, aucun lien entre les résultats de différentes résolutions antérieures). Cette stratégie simple peut se résumer :

- Initialisation de la plupart des variables (la vitesse, la pression, les diamètres et toutes les variables calculées à partir d'elles) à la moyenne entre leurs bornes inférieures et supérieures, sauf pour l'aire de l'échangeur et pour les températures.
- Définition des bornes pour ces 4 catégories de variables (borne inférieure/borne supérieure) : température (30/110 °C), diamètre (50/160 mm), pression (130/560 kPa) et vitesse (0,1/1 m/s).

Mais l'analyse des résultats a souligné la présence de minima locaux, aussi bien sur le cas d'étude P2k3C4 que sur le cas basé sur un RCU réel P1k1C7. C'est pourquoi un travail minutieux a été effectué sur une stratégie de résolution permettant d'écartier ces minima locaux. Un travail générique a été réalisé:

- Pour éviter les bornes « numériques » (les bornes étant saturée ou engendrant une initialisation différente menant à un résultat différent) sans pour autant laisser un domaine de recherche excessivement large (sinon des problèmes de convergence commencent à se poser également), illustration Figure 3-7 pour la borne supérieure de la température,
- Ainsi que pour générer de manière « semi-automatique » des résultats qui serviront pour l'initialisation de prochaines résolutions.

La stratégie « en plusieurs étapes intermédiaires » est explicitée Figure 3-9. En partant d'une stratégie d'initialisation en liant 3 modèles, il est possible d'exporter des résultats servant pour l'initialisation et permettre de réaliser le test des minima locaux. Une seule solution qualifiée d'optimale est ainsi trouvée en 3 étapes :

1. L'ordinogramme Figure 3-10 explique plus en détail les interactions liant les 3 modèles (MILP, NLP et MINLP) du module initialisation semi-automatique. Tout d'abord, il faut résoudre le modèle MILP (sans calcul physique des pertes et à température et diamètre fixé). Le résultat de ce 1^{er} modèle permet d'initialiser un modèle NLP (à configuration fixée, avec la modélisation physique des pertes). Enfin, le résultat de ces 2 modèles sert à initialiser le modèle MINLP (avec les pertes qui sont modélisées physiquement et à une configuration qui est laissée libre).

2. Dans la stratégie « en plusieurs étapes intermédiaires », avant le test des minima locaux, il est nécessaire de générer une liste de solutions optimales. Cette génération de résultat se fait à partir de la procédure semi-automatique en sélectionnant des données d'entrée (coût unitaire principalement) et en effectuant un tirage aléatoire de certaines données d'entrée sensibles (p. ex. le coût de la tranchée, le coût de l'énergie ou la puissance requise).
3. Le test des minima locaux est une procédure de résolution à la suite. Pour un seul jeu de données d'entrée, nous testons différentes initialisations (résultats précédemment générés à l'étape 2) et ceci sur différentes bornes. Nous ne retenons que le meilleur résultat parmi les résolutions ayant convergées. Parfois une borne restrictive est justifiée (p. ex. une température maximale en sortie de telle technologie, ou un espace en galerie limitant le diamètre maximal). Autrement, les bornes ont été définies par 7 valeurs (Tableau 3-5).
4. Des stratégies « expertes » adaptées au RCU sont également proposées en complément. Il a été choisi d'exploiter différentes échelles spatiales (îlot, quartier, ville). Pour des problèmes conséquents, à même échelle spatiale, il est parfois nécessaire d'initialiser le problème complet avec des solutions trouvées sur des sous-parties de réseau (découpage par quartier et réflexion d'une ligne d'approvisionnement principale, dit « feeder »). Il est également possible d'utiliser une autre fonction objectif ou un autre horizon temporel pour l'analyse en coût global.

Le dernier Chapitre 4 s'appuie sur cette méthode de résolution globale afin de démontrer la pertinence de la formulation développée.

Chapitre 4. RESULTATS

Les résultats présentés dans le Chapitre 3 précédent servent d'illustration de la stratégie de résolution « en plusieurs étapes intermédiaires », dont l'objectif est d'éviter que la résolution reste bloquée dans des minima locaux et d'aider à la convergence sur les problèmes de grande taille. Ainsi, ce présent chapitre 4 ne présente que des solutions optimales (Figure 4-1). Un cas (ou exemple) correspond à une donnée d'entrée, avec une solution optimale. Une analyse de sensibilité sur les données d'entrée présente plusieurs solutions optimales, relatives à un jeu de données d'entrée.

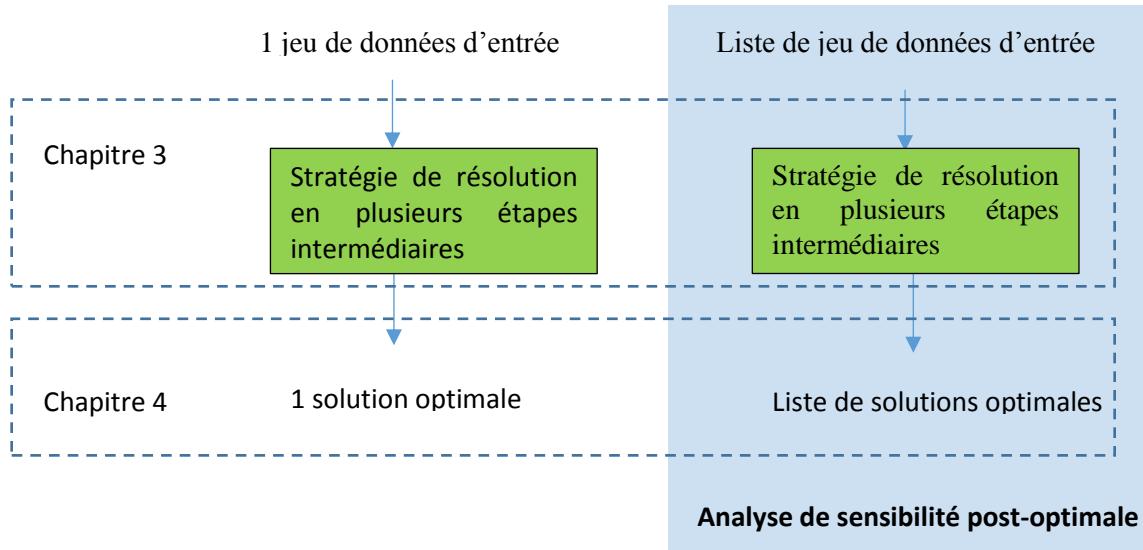


Figure 4-1 Comparaison des ambitions du chapitre 3 par rapport au chapitre 4

Ce 4^{ème} et dernier chapitre présente les résultats d'optimisation de RCU sur un cas d'étude académique, ainsi que sur une extension menant à des réseaux de tailles conséquentes, basés sur un réseau existant P1k1C7. Le positionnement de chaque section est synthétisé dans le Tableau 4-1, leurs principaux intérêts sont explicités ci-dessous par section :

- Dans la section (4.1), les 5 modèles présentés dans la section (3.4.1) sont comparés (temps de calcul et précision de la solution) sur le cas 1, un cas d'étude réduit P1k1C2 (1 producteur, 1 technologie et 2 consommateurs). La rentabilité de l'approvisionnement en cascade (par rapport à l'approvisionnement en parallèle classique) et celle des réseaux bouclés est étudiée.
- Dans la section (4.2), quatre cas d'étude sont étudiés sur l'exemple P2k3C4. Ces cas traitent de la rentabilité de l'approvisionnement décentralisée ou isolée (localisée en P2, sur le lieu du consommateur éloigné C4) basée sur une EnR&R, en comparaison avec l'approvisionnement centralisé basé sur une énergie fossile (P1k1).
- Dans la section (4.3), le cas 5 étudie la conception optimale en comparaison avec la conception effective d'un réseau existant (P1k1C7).
- Dans la dernière section (4.4), l'application de notre méthode est réalisée sur des réseaux de tailles conséquentes, en envisageant la création ex-nihilo d'un RCU sur tout le quartier C1C19 ou l'extension du réseau existant (sur l'îlot C1C7) pour approvisionner jusqu'à un quartier avec 19 consommateurs.

Tableau 4-1 Synthèse des ambitions des cas d'étude réalisés dans ce chapitre

Section	Modèle(s)	Cas d'étude	Analyse sensibilité
(4.1)	5 modèles sont comparés : MILP, NLP MINLP_AR_Cp, MINLP_AR_Cp(T) et MINLP_aller_Cp(T) 1 modèle est conservé MINLP_aller_Cp(T)	cas 1 : P1k1-C3. Les consommateurs C2 et C3 ont un régime basse température BT (50/30°C)	Non réalisée. L'analyse de sensibilité porte sur : le régime de température de C1 (T_reqC1), l'épaisseur de l'isolant (tk_insul) et le coût de la tranchée (Capex_tr)
(4.2)	1 modèle est conservé MINLP_AR_Cp	cas 2 P1k1-C4, cas 3 P1k1-P2k2-C4 et cas 4 P1k1-P2k2k3-C4. Pour les cas 2 à 4, tous les consommateurs ont un régime HT (70/50°C). Lorsque P2k2 existe, sa puissance est limitée à 90% de la puissance requise par le consommateur éloigné C4	L'analyse de sensibilité porte sur : CAPEX et OPEX de k2 (EnR&R) et Capex_tr.
(4.2.4)		Le cas 5 est comme le cas 4, sauf que la limite de puissance sur P2k2 est de 90% de la somme de tous les consommateurs	L'analyse est similaire à celle de la section (4.2) avec en plus l'analyse sur l'éloignement (x_P)
(4.3)		Le cas 6 est basé sur un îlot de bâtiment existant et les résultats sont comparés au réseau existant (P1k1C7)	Non réalisée.
(4.4)		Dans le cas 7, une extension du réseau est envisagée, de l'îlot C1C7 à un quartier de taille conséquente (jusqu'à 19 consommateurs). Le cas 8 propose la valorisation de chaleur fatale lors de cette extension.	

SOMMAIRE DU CHAPITRE

4.1	AVANTAGE DE LA CASCADE ET DES RESEAUX BOUCLES	150
4.1.1	<i>Comparaison des différents modèles sur 2 régimes de température du consommateur « haute température »</i>	150
4.1.2	<i>Analyse de sensibilité pour aider aux choix de la cascade et/ou du réseau bouclé</i>	155
4.2	APPROVISIONNEMENT CENTRALISE/DECENTRALISE/ISOLE DU CONSOMMATEUR ELOIGNE ET INTEGRATION D'ENR&R	158
4.2.1	<i>Ajout d'un 4ème consommateur et analyse de sensibilité sur le coût de l'énergie fossile</i>	158
4.2.2	<i>Ajout d'une potentiel de valorisation EnR&R uniquement disponible sur la localisation P2</i>	161
4.2.3	<i>Ajout d'une technologie fossile d'appoint : approvisionnement centralisé ou isolé du consommateur éloigné ?</i>	162
4.2.4	<i>Potentiel de récupération de chaleur fatale sur un producteur éloigné</i>	164
4.3	OPTIMISATION DU RESEAU SUR L'ILLOT EXISTANT C1C7	167
4.4	CAS DETUDE DE TAILLES CONSEQUENTES	169
4.4.1	<i>Création ex-nihilo d'un RCU sur le quartier C1C19</i>	169
4.4.2	<i>Extension du réseau existant P1K1C7</i>	171
4.5	CONCLUSION DU CHAPITRE	173

4.1 AVANTAGE DE LA CASCADE ET DES RESEAUX BOUCLES

Cette section sert à démontrer que la formulation développée permet :

- d'utiliser des modèles de précision différente ;
- de choisir entre un réseau ramifié (classique) ou un réseau bouclé ;
- de proposer une cascade de température entre consommateurs.

4.1.1 COMPARAISON DES DIFFERENTS MODELES SUR 2 REGIMES DE TEMPERATURE DU CONSOMMATEUR « HAUTE TEMPERATURE »

Pour réaliser une optimisation, le modèle a besoin de connaître les données caractéristiques du réseau envisagé. Il est nécessaire de renseigner la localisation des nœuds consommateurs (C) qui dans notre cas d'étude (Figure 4-2), sont limités à 3 afin de rendre plus synthétiques les résultats.

Chaque consommateur a besoin de 80 kW de puissance nominale. Pour les consommateurs C2 et C3, les températures de distribution dans le réseau secondaire (distribution dans le bâtiment) sont fixées à 50 °C - départ de l'échangeur et 30 °C - retour à l'échangeur. Nous testons, dans cette section, deux régimes de températures pour le consommateur C1, soit légèrement plus haute 60/40 °C (pour qu'il y ait un intérêt à envisager une cascade en température), soit significativement plus haute 120/100 °C afin de pouvoir valoriser la récupération de chaleur sur une gamme de température industrielle (d'où l'intérêt de comparer la différence de modélisation des caractéristiques de l'eau). Par simplicité, le régime de température de C1 sera qualifié respectivement de « haute température » HT pour les températures 60/40°C ou de « très haute température » THT pour 120/100°C.

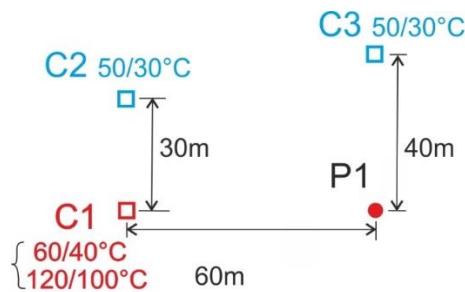
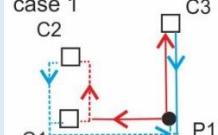
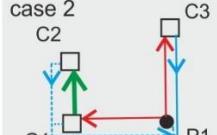
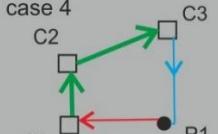


Figure 4-2 Données d'entrée du cas 1 (P1k1C3)

Il est ensuite nécessaire de donner la localisation d'un nœud producteur (P) ainsi que l'information sur le type d'unité de production. On note k1, la technologie « fossile classique » (p. ex. gaz) avec les caractéristiques suivantes : le coût d'investissement (Capex) est fixé à 800 €/kW, le coût de la chaleur (Opex) à 8c€/kWh, l'inflation annuelle du coût de l'énergie sur 30 ans à 4%, une température maximale en sortie de production à 150 °C, une température minimale en entrée de production à 30 °C, un rendement de production à 90 % et les émissions de gaz à effet de serre unitaire à 0,243 kgCo₂/kWh (valeur pour du gaz en France en 2014 de la base carbone ADEME). Le coût unitaire d'investissement de la tranchée est pris à 300€/m (rases campagnes).

Nous avons testé 5 modèles pour résoudre cet exemple. Ils ont été développés dans la formulation sous-section 3.4.1 et synthétisés Tableau 3-6. Les résultats sont disponibles dans le Tableau 4-2 pour les schémas de configuration et dans le Tableau 4-3 pour les informations concernant les indicateurs de sorties (coûts, dimensionnement en température, vitesse, diamètre et indicateurs de performance). Trois configurations optimales sont obtenues (Tableau 4-2) selon le modèle utilisé, et ce même pour des données d'entrée identiques (à l'exception du régime de température requise pour C1).

Tableau 4-2 Résultats optimaux, selon 2 niveaux de température du consommateur C1 (lignes) et selon les 5 modèles (colonnes) du cas d'étude P1k1C1

	MILP	NLP	MINLP_AR cp_cst	MINLP_AR Cp(T)	MINLP_aller Cp(T)
HT 90/70	 <i>Figure 4-3 Config. opt. L300-par</i>	la structure (Figure 4-3) n'est pas un résultat, mais une donnée d'entrée		 <i>Figure 4-4 Config. opt. L300-cascade</i>	
THT 120/100	Même configuration et même résultat	dimensionnement différent	Même configuration et dimensionnement différent	hypothèse Cp, ρ, μ constant discutable au-delà (60-100°C)	 <i>Figure 4-5 Config. opt. L217-bouclé</i>
avantage inconvenient	rapide (0,1 à 0,4 s)		temps calcul X15 - X20		
	T et Dint fixé, perte par ratio	aide au dimensionnement			
	connexion parallèle entre consommateurs		possibilité de prendre en compte l'approvisionnement en cascade		
	gamme de température [60-100°C]			gamme étendue à 150°C	
	réseau ramifié			réseau bouclé possible	

- Le modèle MILP trouve une configuration « classique », P1 alimente C1 (et C3) puis C1 alimente C2 en parallèle. La résolution est très rapide (en comparaison avec les autres modèles) et l'ordre de grandeur du coût est respecté (par rapport aux autres modèles). Par contre, l'aide au dimensionnement n'est pas réalisée, notamment concernant la température de distribution, le coût de pompage, les diamètres et le taux de perte thermique, qui sont des données d'entrée du modèle, elles sont soulignées en jaune dans le Tableau 4-3.
- Le modèle NLP, aide au dimensionnement précis, à une configuration fixée, renseignée dans les données d'entrée (ici la configuration renseignée est sans cascade). Grâce à la prise en compte physique des pertes, l'équilibre entre les pertes thermiques et les pertes de charge est réalisé. Nous ne comparons pas ces performances par rapport aux résultats du problème MILP. La comparaison du dimensionnement est réalisée en fonction du régime de température de C1 (HT / THT) qui entraîne influe sur la température maximale en sortie de chaudière (de 98 à 141°C). **Cette augmentation de température de distribution implique une augmentation des pertes thermiques spécifiques (de 16,4 à 29,8 W/m), néanmoins le ratio de perte thermique sur l'énergie totale livrée reste inférieur à 3,2% (très performant).** Et inversement les pertes de charge spécifiques diminuent (de 2,40 à 1,52 kPa/m, ratios relativement haut comparés aux abaques des données constructeurs de canalisation). **Cette diminution permet de maintenir les coûts de pompage faible (de 0,3 à 0,6 % du coût total).** Ce problème est aussi résolu très rapidement (0,39s en moyenne, suivant l'initialisation). L'aide au dimensionnement peut être réalisée grâce à ce modèle. Du point de vue des considérations court terme ou long

terme (sous-section 3.4.5), il est intéressant de constater que **la prise en compte précise du dimensionnement (équilibre des pertes thermiques avec les pertes de charge) permet de réduire (-5,60%) le coût total du réseau à 5 ans, mais l'augmente (+2,23%) à 30 ans par rapport au modèle MILP (écart pour C1 THT). La précision du modèle a donc un impact sur la qualité des estimations financières** et ce quel que soit l'horizon temporel considéré. Un constat identique est valable pour les modèles MINLP suivants, mais ces écarts ne sont pas chiffrés dans le Tableau 4-3.

- Le modèle MINLP_AR_Cp trouve une autre configuration de réseau (Figure 4-4), désormais C1 alimente C2 en cascade. Cette **connexion en cascade permet de diminuer d'un palier supplémentaire les pertes thermiques** (de 29,8 à 26,2 W/m ou de 16,4 à 14,1 W/m suivant le niveau de température requis de C1) et de **diminuer aussi le coût global (à 5 ou 30 ans) d'environ -0,2% par rapport à la solution précédemment optimisée** (Figure 4-3) quel que soit le niveau de température requis pour C1. Le passage d'un problème NLP à un problème MINLP nécessite un temps de calcul conséquent (6,53s soit environ 15 fois plus de temps), ce qui reste malgré tout rapide.
- Le modèle MINLP_AR_Cp(T) trouve la même configuration, mais la dépendance à la température des caractéristiques physiques de l'eau permet de « corriger » le dimensionnement ce qui implique une diminution de -0,62% du coût global, par rapport à la solution MINLP_AR_Cp, pour C1 HT, mais par contre une augmentation conséquente de 2,22% pour C1 THT. L'erreur précédente s'explique par le fait que l'hypothèse des caractéristiques constantes n'est plus valable pour des trop grandes gammes de température.
- Le dernier modèle MINLP_aller_Cp(T) trouve 2 configurations différentes (détaillées ci-dessous). Le gain de précision, notamment dans un contexte de cascade de température (avec un consommateur THT), nécessite en contrepartie un temps de calcul supplémentaire (+12% par rapport au modèle précédent) incluant le test des minima locaux présenté (3.3.4). Ce modèle le plus complexe est au moins aussi performant que le précédent :
 - La première configuration optimale est la même qu'obtenue précédemment (Figure 4-4) avec le même dimensionnement et un coût exactement identique pour le régime HT de C1.
 - La deuxième configuration optimale est un réseau bouclé (Figure 4-5) pour le régime de température le plus élevé. Le coût total de ce réseau à 30 ans est réduit de -1,65% par rapport à la solution optimale trouvée avec MINLP_AR_Cp(T). L'utilisation de ce modèle le plus complexe est utile, car autrement une configuration différente est optimale avec le modèle MINLP_AR_Cp(T). Désormais la longueur totale du réseau est diminuée de 300 à 217m. Bien qu'il y ait moins (4 canalisations au lieu de 6) de matière (isolant et acier) il y a en revanche davantage de tranchées (augmentation de 3 à 4) : au final la somme de ces coûts (C_line_tot) augmente de 59 à 83 k€. Cette solution est rentable en cout global, car la diminution du nombre de canalisations, couplée à une optimisation du dimensionnement de celles - ci, entraîne moins de surface d'échange et donc moins de perte thermique : **à THT le ratio de perte thermique (sur l'énergie totale livrée) de ce réseau bouclé est encore plus faible (1,4%) que comparé à la configuration non bouclée (3,4%).**

Chapitre 4 : Résultats

La cascade de température (Figure 4-4) sera toujours optimale par rapport à l'approvisionnement en parallèle, dès lors qu'un consommateur possède un niveau de température plus élevé que les autres.

Le coût de pompage n'est pas reporté ici. Il est en effet négligeable. Par exemple pour le modèle MINLP_aller_CP(T), les valeurs sont 0,65 k€ pour C1 HT (0,03% du coût global) et de 2,0 k€ pour C1 THT (0,1% du coût global).

Étant donné que les gains d'un réseau bouclé sont minimes, afin de limiter la prise de risque financière (notamment pour creuser une tranchée supplémentaire), nous effectuons une analyse de sensibilité post-optimale dans la sous-section suivante.

4.1 : Avantage de la cascade et des réseaux bouclés

Tableau 4-3 Dimensionnement et indicateurs de sortie des solutions optimales du cas d'étude P1k1C3 (les écarts relatifs sont valables par rapport au modèle précédent)

	modèles	MILP		NLP		MINLP_AR_Cp		MINLP_AR_Cp(T)		MINLP_aller_Cp(T)	
Sorties	Treq pour C1 :	HT	THT	HT	THT	HT	THT	HT	THT	HT	THT
temps calcul	s (%)	0,10s		0,39s (x4)		6,53 (x15)		7,66s (+17%)		8,58s (+12%)	
C_{heat}		1150		1122	1141	1121	1139	1116	1167	1116	1146
C_{Hinst}		790		803	816	802	815	798	835	798	820
C_{hx}		20		20	20	20	20	20	20	20	20
C_{line_tot}		190		59	59	59	59	59	59	59	83
C_{tot Sans}		2170		2010	2049	2007	2045	1996	2090	1996	2076
écart au modèle précédent (%)				-7,37%	-5,60%	-0,15%	-0,18%	-0,54%	2,23%	0,00%	-0,69%
C_{tot 30ans}		24700		24713	25250	24666	25194	24513	25755	24513	25330
écart au modèle précédent (%)				0,05%	2,23%	-0,19%	-0,22%	-0,62%	2,22%	0,00%	-1,65%
T_{prod_out}	°C	NA		98	141	100	141	99,4	145,5	99,4	145,5
T_{prod_in}		NA		64	117	60	114	40,4	113,8	40,4	99,0
Hinst	kW	266		272,1	276,6	271,9	276,3	270,6	283,0	270,6	277,9
L_{tot}	m	300		300	300	300	300	300	300	300	217
GES	tCO ₂ /kWh	243		248,2	244,2	243,5	244,1	243,3	243,8	243,3	243,7
E_{loss}	MWh	116,8		43	78	37	69	30	84	30	34
T_{xloss}	%	5%		1,8%	3,2%	1,6%	2,8%	1,3%	3,4%	1,3%	1,4%
H_{loss_spec}	W/m	44,44		16,4	29,8	14,1	26,2	11,6	32,0	11,6	17,9
DP_{spec}	kPa/m	0,39		2,40	1,52	3,61	1,52	1,41	0,45	1,41	2,70
Psat	bar	NA		1,25	4,91	1,34	4,91	1,34	5,55	1,34	5,55
P_{pump}	bar	NA		5,68	8,80	5,49	8,76	4,33	8,28	4,33	10,34
V_{c1c2_par / cascade}	m/s	0,95		0,97	0,89	1,5	0,4	0,99	0,14	0,99	0,85
Dint_{c1c2_par / cascade}	cm	10,5		40,4	54,3	61,6	100,6	29	44	29	44
DP_{c1c2_par / cascade}	kPa/m	1,37		2,90	1,94	9,8	0,6	3,88	0,05	3,88	2,77

4.1.2 ANALYSE DE SENSIBILITE POUR AIDER AUX CHOIX DE LA CASCADE ET/OU DU RESEAU BOUCLE

Pour illustrer le choix d'une configuration en cascade sur un réseau ramifié (Figure 4-4) ou bouclé (Figure 4-5), nous avons effectué une analyse de sensibilité, avec le modèle le plus complet MINLP_allerCp(T), avec les plages de variations suivantes :

- 4 valeurs pour le coût unitaire de la tranchée : 100 €/m, 300€/m, 500€/m ou 800€/m.
- 5 valeurs de température requise (départ/retour) par le circuit secondaire du consommateur C1 : 130/110, 120/100, 100/80, 80/60 et 60/40°C. Les autres consommateurs (C2 et C3) ont été renseignés comme des consommateurs BT (50/30°C).
- 3 valeurs d'épaisseur d'isolation : 15, 30 ou 45 cm.

Ainsi cette analyse de sensibilité comporte 60 jeux de données d'entrée (4x5x3). Le test de minima locaux a été réalisé grâce à 3 initialisations (les 3 configurations optimales trouvées Tableau 4-2) et 7 bornes différentes (spécifiées Tableau 3-5).

Les résultats sont représentés Figure 4-6, uniquement pour un coût unitaire de la tranchée de 300€/m. Cette représentation graphique parallèle xdat (Enguerrand de Rochefort 2015) est facile à appréhender de manière dynamique. Il est possible de sélectionner avec les curseurs (triangle rouge) les données d'entrée souhaitées (les colonnes de gauche, par exemple, nous avons choisi un coût de tranchée à 300 €/m, non représenté) pour constater les résultats correspondants : puissance à installer (Hinstk1), la longueur totale du réseau (Ltot), la fonction objectif du coût total à l'horizon 5 ans (Ctot5), la projection du coût total projeté à 10 et 30 ans, ainsi que la densité thermique (Dth).

Un filtre de couleur a été choisi pour différencier le changement de configuration, en vert la configuration ramifiée L300 (Figure 4-4) et en bleu la configuration bouclée L217 (Figure 4-5). Ainsi, visuellement et rapidement, nous constatons que la configuration bouclée est choisie pour des coûts totaux les plus élevés (en revenant à gauche, les données d'entrée correspondante sont THT et peu d'isolant). Ou encore que le cout global optimisé à 5 ans implique des variations significatives de celui-ci dès que l'on raisonne à plus long terme. Cette représentation graphique permet d'identifier facilement que la configuration bouclée admet une densité thermique nettement supérieure (autour de 11 MWh/m) à celle obtenue avec une configuration ramifiée (autour de 8 MWh/m, ce qui reste très dense et éligible au fonds de chaleur de l'ADEME tant que supérieur à 3 MWh/m). La solution de référence (trait gras vert) est choisie pour un régime de température 80/60 et 30mm d'isolant.

Concernant tous résultats (incluant la variation du coût de la tranchée de 100 à 800€/m), la plage de variations des données d'entrée implique une augmentation du coût global conséquente : à l'horizon 5 ans de 1 953 à 2 275 k€, soit une différence de 322 k€, une somme conséquente. Et lorsqu'une réflexion long terme intervient cet écart ne cesse d'augmenter : à l'horizon de 10 ans, le coût global varie de 3 785 à 4 334 k€ (soit 549 k€ d'écart) et à 30 ans entre 24,33 et 27,33 millions d'euros (soit un écart de 3 millions). L'approvisionnement énergétique ne peut se passer de projection au long terme afin sécuriser l'approvisionnement.

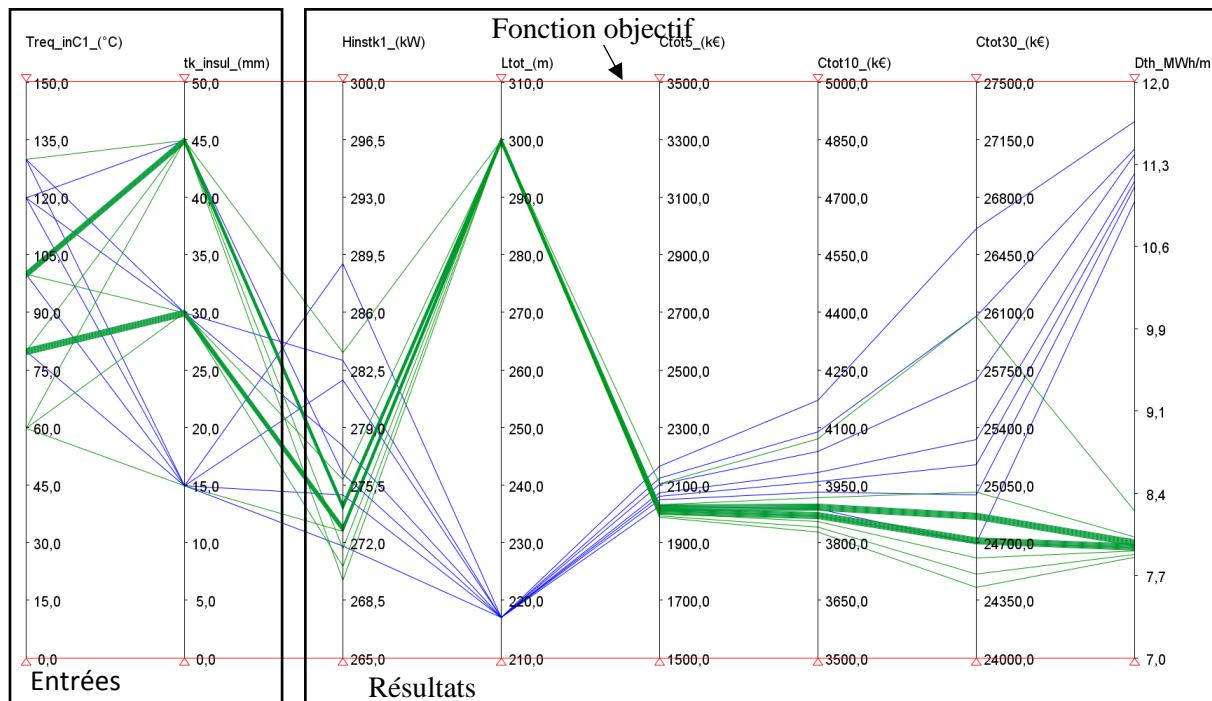


Figure 4-6 Résultats optimaux (représentés à $C_{-tr} = 300\text{€}/\text{m}$) de l'analyse de sensibilité sur le cas 1 (P1k1C3)

Le Tableau 4-4 propose une lecture filtrée de ces résultats. La configuration optimale dépend donc des valeurs des 3 données d'entrée testées :

- Si le coût de la tranchée est égal ou supérieur à 800€/m (une valeur communément usitée), la configuration ramifiée classique (Figure 4-4) est optimale, quel que soit le niveau de température ou l'épaisseur d'isolant. C'est avec ce coût de tranchée que le coût global du réseau atteint son maximum à 30 ans (27,33 M€).
- Si le coût de la tranchée est de 500€/m, la configuration bouclée (Figure 4-5) n'est rentable que si le niveau de température est dans les gammes de température les plus hautes (100/80 ou 120/100°C). Sinon, on retrouve la solution précédente.
- Si le coût de la tranchée est de 300€/m (la valeur moyenne inférieure des coûts de tranchée rencontrée en rase campagne), le réseau bouclé sera optimal suivant les conditions de température et de la qualité de l'isolant. Ainsi la structure classique est rentable si la température est haute ($\geq 100^\circ\text{C}$) et l'isolant très performant (45mm d'épaisseur), si la température est de 80/60 et l'isolant d'épaisseur supérieure à la moyenne (30 mm d'épaisseur) et quelle que soit la performance de l'isolant à C1 60/40 (un régime de température à peine 10°C plus élevé que pour les autres consommateurs).
- Si le coût de la tranchée est très faible 100 €/m (rase campagne et mutualisation des travaux de voirie), la structure bouclée est quasiment toujours rentable (sauf si C1 60/40°C et si l'isolant est moyennement ou très performant).

Le minimum du coût global (24 336 k€) est atteint logiquement pour le coût minimal de la tranchée, une température requise pour C1 la plus basse (60/40) et l'isolant le plus performant. Dans ce cas, nous avons vu que la configuration optimale était un réseau ramifié classique (L300). Par contre, dès que la température de retour du consommateur C1 peut être valorisée (à partir de 80/60), c'est un réseau bouclé qui devient optimal (24 337 k€). Etant donné qu'il existe un certain risque financier à innover dans de tels réseaux bouclés, il serait judicieux dans le cadre d'une prestation de service, de fournir l'écart à la solution du réseau classique de référence. Pour ce cas (tranchée à 100€/m, régime 80/60°C et isolant performant), le réseau classique (dimensionnement optimisé) est chiffré à 24 514 k€, soit un écart de 175 k€ à 30 ans (+0,7%) avec la solution - configuration et dimensionnement - optimisée.

4.1 : Avantage de la cascade et des réseaux bouclés

Tableau 4-4 Récapitulatif des conditions sur les données d'entrée pour obtenir une configuration ramifiée classique (L300) ou un réseau bouclé (L217)

Entrées		Résultats					
Capex tranchée (€/m)	régime de température C1 (°C)	épaisseur isolation (mm)	Ltot (m)	Puissance installée (kW)	Coût global 30 ans (M€)	émission GES (gCO ₂ /kWh)	densité thermique (MWh/m)
800	tous	tous	L300	269-293	24,53- 27,33	245-630	7,87-8,57
500	≤100/80			269-283	24,43-26,08	574-609	7,87-8,28
300	≥100/80	45					
	≤80/60	≥30					
60/40		tous					
100	60/40	≥30					
Autres (24 cas sur 60 cas testés)		L217		269-289	24,33-26,6	574-619	10,8-11,7

Sans analyser le changement de configuration, le Tableau 4-5 permet d'analyser le coût global moyen (tenant compte des variations du coût de la tranchée). Nous constatons logiquement que :

- Plus le niveau de température requis est élevé, plus le coût global augmente (jusqu'à +6,4%).
- Plus l'épaisseur d'isolant est importante, moins le coût global est cher (par rapport aux résultats avec 30mm d'isolant, l'épaisseur prise par défaut dans tous nos autres exemples). Cette réduction du coût global augmente avec le niveau de température requis (de -0,3% pour C1 HT à -1,0% pour C1 THT). Au contraire, moins d'isolant est présent, plus les pertes thermiques sont importantes, ce qui fait augmenter significativement le coût global (de 0,7 à 2,2% avec l'augmentation du niveau de température requis par C1), par rapport aux résultats avec 30mm d'isolant.

À noter tout de même que ses résultats ne tiennent pas compte d'un changement du coût unitaire des matériaux de la canalisation (Capex_pipe), néanmoins les conclusions de l'étude ne changerait pas, le coût de la tranchée étant le coût majoritaire (même à Capex_tr=300€/m, Capex_pipe <4% de Capex_line_tot) dans l'équation [Eq 2-66].

Tableau 4-5 Analyse du coût global à 15 ans (moyenne en fonction du coût de la tranchée), suivant le niveau régime de température requis par le consommateur (Treq) et l'épaisseur d'isolant (tk_insul)

Ctot15	(k€)	écart/Treq	écart/ tk_insul=30 mm
Treq in/out	tk_insul= 30 mm	tk_insul =15mm	tk_insul =45mm
60/40	2 019	0,7%	-0,3%
80/60	2 032	0,7%	-0,4%
100/80	2 053	1,7%	-0,5%
120/100	2 102	4,1%	-0,7%
130/110	2 148	6,4%	-1,0%

4.2 APPROVISIONNEMENT CENTRALISE/DECENTRALISE/ISOLE DU CONSOMMATEUR ELOIGNE ET INTEGRATION D'ENR&R

Nous proposons désormais de compléter l'étude de la section précédente (cas 1 Figure 4-2), mais en diversifiant les possibilités, résumées dans le Tableau 4-6 :

- Cas 2 : sous-section (4.2.1) en ajoutant un 4^{ème} consommateur (C4) éloigné du quartier (C4 est 3 fois plus loin de l'unité de production P1 par rapport à C1 ou C3) (Figure 4-7).
- Cas 3 : sous-section (4.2.2) en proposant une 2^{ème} technologie de production assimilée à une énergie renouvelable sur un 2^{ème} lieu de production (P2) (et non en P1, où le potentiel de valorisation n'existe pas) localisée au même endroit que le consommateur éloigné (Figure 4-8). La puissance maximale délivrée par la technologie k2 est de 90% des besoins de C4. Cette contrainte est ajoutée, car d'un point de vue technologique et financier, il serait trop cher de satisfaire 100% des appels de puissance à partir d'EnR&R uniquement.
- Cas 4 : sous-section (4.2.3) une 3^{ème} technologie d'appoint basée sur une énergie fossile est ajoutée à la localisation P2 afin de pouvoir satisfaire les pics d'appel de puissance (Figure 4-9).
- Cas 5 : section (4.2.4), la seule différence avec le cas 4 est sur la contrainte maximale autorisée pour cette technologie k2, désormais il peut être envisagé de dimensionner k2 afin de pouvoir alimenter 90% des besoins totaux des consommateurs.

Tableau 4-6 Récapitulatif des ambitions des cas d'étude de la section 4.2

Paragraphe	(4.2.1)	(4.2.2)	(4.2.3)	(4.2.4)
Cas	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5
Localisation	 Figure 4-7 Localisation cas 2	 Figure 4-8 Localisation cas 3	 Figure 4-9 Localisation cas 4 et 5	 Figure 4-9 Localisation cas 4 et 5
Contrainte sur Hinst_k2	N/A		$\leq 90\% \text{ H_req}_C4$	$\leq 90\% \text{ H_req}_\text{tot}$

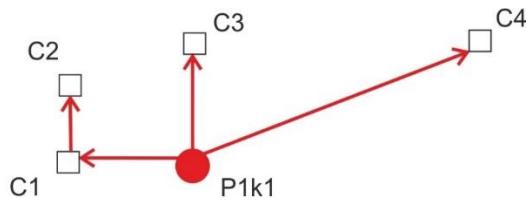
Afin de présenter plus facilement les résultats, nous nous intéressons à un unique régime de température (70/50°C) pour tous les consommateurs. Nous faisons l'hypothèse que les caractéristiques de l'eau sont prises constantes à la valeur de 80°C, ce qui se justifie, car la température optimale de distribution est proche de 100°C et que la température de retour est autour de 60°C. Et comme nous ne comparons pas les régimes de consommateurs entre eux, l'intérêt de la cascade et les réseaux bouclés ne sont pas illustrés. Tous les prochains résultats sont obtenus avec le modèle MINLP_AR_Cp, en minimisant le coût global du réseau à 15 ans.

4.2.1 AJOUT D'UN 4EME CONSOMMATEUR ET ANALYSE DE SENSIBILITE SUR LE COUT DE L'ENERGIE FOSSILE

Pour ce cas 2, comme précédemment au cas 1, l'unique technologie de production k1 est localisée en P1 (Figure 4-7). Nous proposons de réaliser une étude de sensibilité, sur le coût de la tranchée et le coût de l'inflation de l'énergie fossile, afin de voir leurs influences sur le coût global du réseau.

La structure optimale trouvée est L662-P1k1 (Figure 4-10) soit une longueur totale du réseau de 662m et une puissance installée en P1 de la technologie k1 de 365 kW.

4.2 : Approvisionnement centralisé/décentralisé/isolé du consommateur éloigné et intégration d'EnR&R



*Figure 4-10 Configuration optimale L662-P1k1 du cas 2
(les canalisations sont aller-retour, seulement celles aller sont représentées)*

Nous pouvons constater sur la Figure 4-11 que le coût global du réseau varie de manière significative en fonction de l'inflation choisie, et ce quel que soit les coûts moyens d'investissement (CAPEX) et du coût de l'énergie (OPEX). Nous proposons une analyse en coût global sur différents horizons temporels (de 5 à 30 ans). La comparaison est réalisée pour un coût optimisé sur 15 ans. Ainsi, pour les valeurs d'inflation testée pour l'énergie fossile :

- Avec 4% d'inflation (cluster vert Figure 4-11), le coût global est compris entre 6,25 et 8,93 M€.
- Avec une inflation à 6 % (cluster rouge), le coût global est plus élevé (augmentation supérieure à 42%), il varie entre 6,83 et 10,02 M€, soit une augmentation entre 9,3% et 12,2% par rapport à 4% d'inflation.

Une telle étude permet de mettre en avant l'importance de raisonner à long terme, afin de limiter les risques d'explosion des factures énergétiques. Une étude stratégique de marché pour réaliser des scénarios d'inflation n'est pas l'objet de ce manuscrit. Nous nous réfèrons aux analyses réalisées par l'observatoire de l'énergie. Afin de simplifier les prochaines analyses des cas d'étude, nous prendrons un unique scénario qualifié de modéré (trait gras bleu sur la Figure 4-11). Il comprend un coût d'énergie fossile à 6 ct€/kWh avec une inflation contenue à 4%, qui est la moyenne du prix du gaz vendu aux entreprises françaises en 2013 et son inflation (SoeS 2014). L'investissement de référence est pris à 800 €/kW. Ce scénario fossile de référence admet un coût global de 7,43 M€ à 15 ans et 26,4 M€ à l'horizon 30 ans.

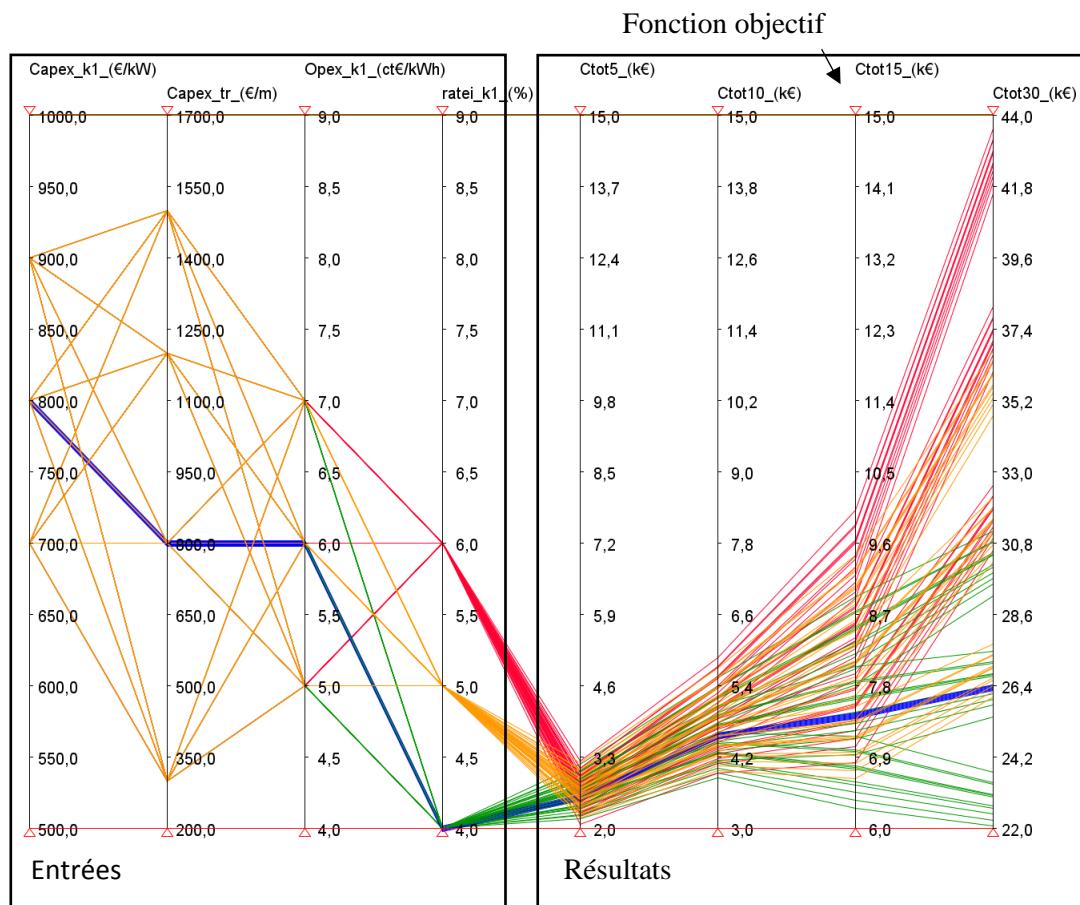
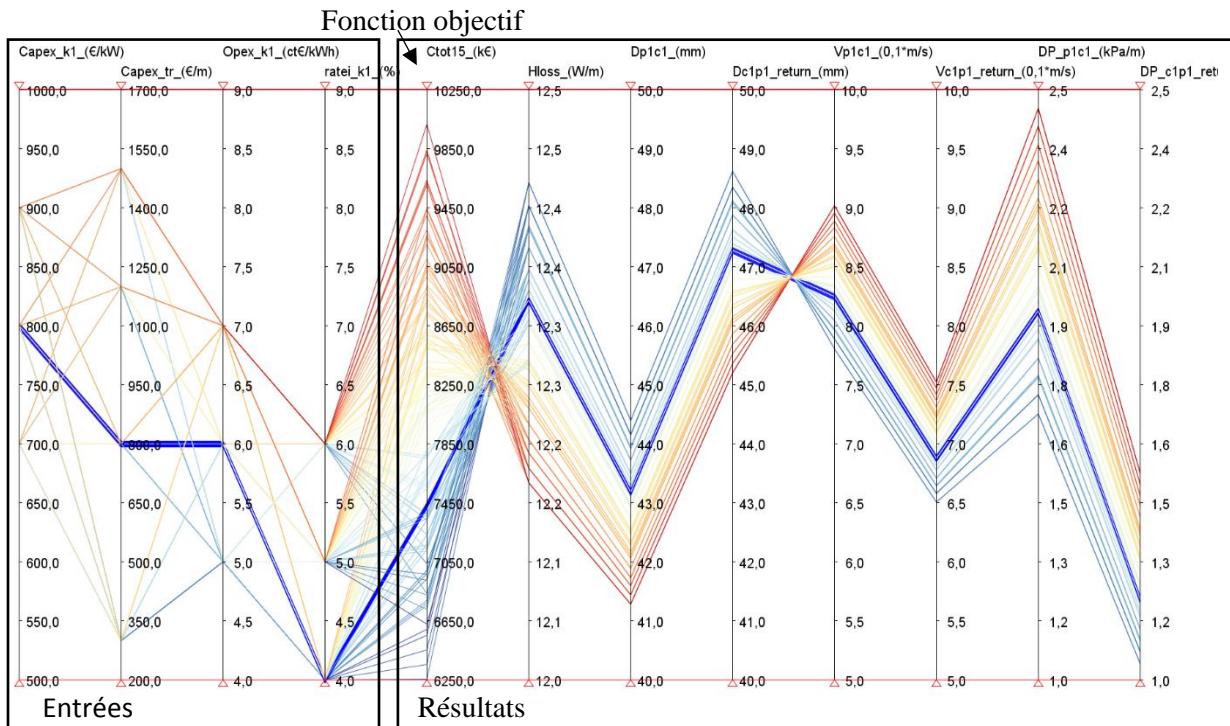


Figure 4-11 Analyse en coût global des résultats du cas 1, à la configuration optimale (L662-P1k1)

Après avoir analysé l'évolution en coût global, la Figure 4-12 représente l'influence sur le dimensionnement. La solution de référence est représentée par un trait gras en bleu. Certes toujours une seule configuration est obtenue (L662-P1k1), mais le dimensionnement est influencé par la variation des données d'entrée. Néanmoins les variations restent minimes, par exemple les pertes thermiques spécifiques (H_{loss}) sont contenues entre 12,42 et 12,16 W/m.

Profitons qu'il n'y ait qu'une seule configuration pour étudier l'équilibre des pertes thermiques et des pertes de charge entre la canalisation aller et la canalisation retour. Le diamètre d'une canalisation aller (colonne D_P1C1) est toujours inférieur au diamètre d'une canalisation retour (D_C1P1_return), ce qui permet de limiter les pertes thermiques dans la canalisation aller où la température est plus élevée (92°C) comparée à la température retour (60°C). Inversement, la vitesse d'une canalisation aller (V_P1C1) sera toujours supérieure à celle d'une canalisation retour (VC1P1_return). Ainsi pour une canalisation retour, à la solution de référence, il est possible de diminuer (-37%) les pertes de charge spécifique entre l'aller 1,94 kPa/m (DP_P1C1) et le retour 1,21 kPa/m (DP_C1P1return), sans pénaliser les pertes thermiques.

4.2 : Approvisionnement centralisé/décentralisé/isolé du consommateur éloigné et intégration d'EnR&R



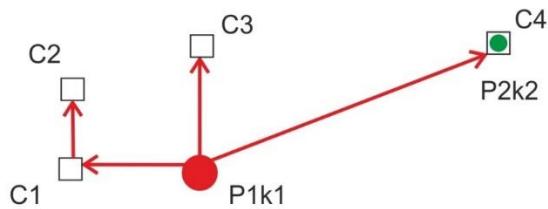
[Figure 4-12 Analyse en dimensionnement des résultats du cas 2 à la configuration optimale \(Figure 4-10\)](#)

4.2.2 AJOUT D'UNE POTENTIEL DE VALORISATION ENR&R UNIQUEMENT DISPONIBLE SUR LA LOCALISATION P2

Alors que la sous-section précédente étudiait l'influence des données d'entrée de l'énergie fossile, désormais, dans les prochains cas, ces dernières sont fixées aux valeurs suivantes (cas « référence fossile ») : inflation_k1=4%, Capex_k1=800€/kW et Opex_k1=6 ct€/kWh.

Une analyse de sensibilité sur les données d'entrée suivante est réalisée : l'investissement de l'EnR&R est testé sur 3 valeurs (100 ; 800 et 1500 €/kW) et le coût du kWh de l'EnR&R sur deux valeurs 2 ou 4 ct€/kWh. L'investissement de la tranchée était comme précédemment fixé à 800 €/m.

Dès lors qu'un potentiel de valorisation d'EnR&R est envisagé à la localisation P2, la configuration optimale (Figure 4-13) exploite cette EnR&R. Le consommateur isolé C4 est néanmoins relié au réseau, car une contrainte est ajoutée sur la puissance Hinst_P2k2 qui est limitée à 90% de la puissance requise par C4. Cette contrainte est restrictive, la puissance à installer est saturée à cette borne, mais elle est justifiée d'un point de vue technologique et financier : il serait trop cher de dimensionner une EnR&R (et un organe de stockage) afin qu'elle puisse satisfaire 100% des appels de puissance, incluant les pointes de demande.

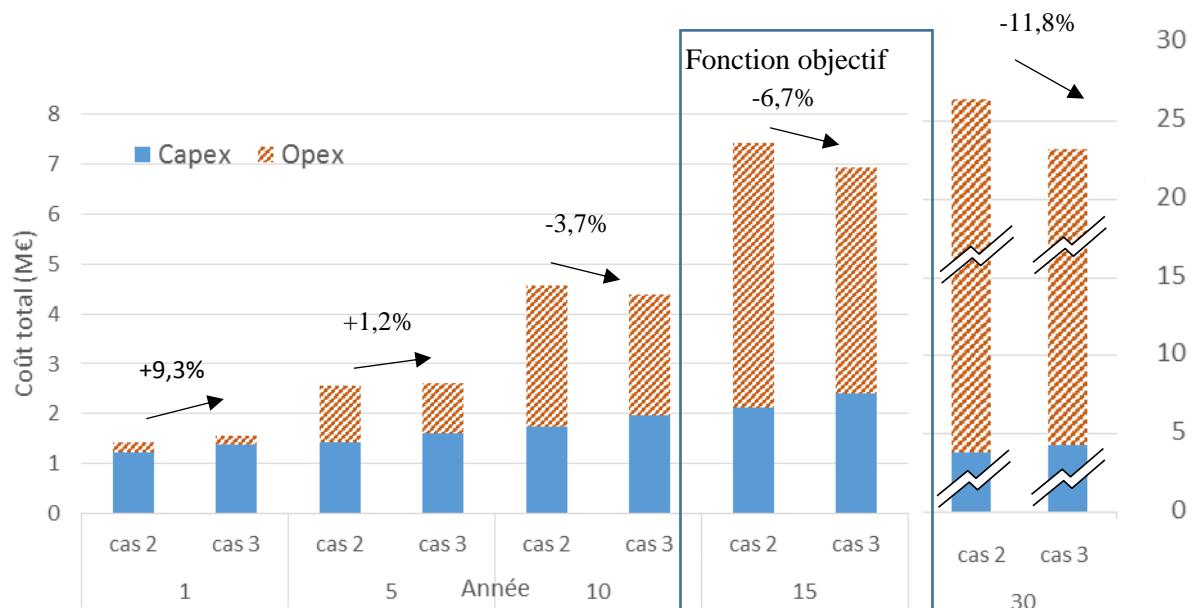


[Figure 4-13 La structure optimale pour le cas 3 \(L662-P1k1-P2k2\)](#)

Sur l'analyse de sensibilité réalisée (mais non représentée), le coût global varie entre 6,38 et 7,21 M€ à l'horizon 15 ans. Ainsi l'intégration d'EnR&R décentralisée permet de réduire le coût global par rapport à la solution fossile de référence (7,43 M€), respectivement de -14,1% et -3,0%.

Une telle introduction d'EnR&R permet de sécuriser l'approvisionnement (Figure 4-14) :

- À court terme, l'introduction d'EnR&R est une solution plus chère, notamment à cause de l'investissement supplémentaire nécessaire (à 1 an, surcoût de +9,3% et à 5 ans cet écart n'est plus que de 1,2%).
- Dès 10 ans, l'introduction d'EnR&R devient rentable et permet de réduire de -3,7% le coût global. La valorisation d'EnR&R sera d'autant plus rentable que l'on raisonne à long terme : à 15 ans, le coût global est réduit de -6,7% et à 30 ans, cet écart augmente à -11,8%.



[Figure 4-14 Comparaison de la répartition des coûts à 30 ans \(investissement représenté actualisé à 30 ans\), de la solution de référence du cas 2 avec celle du cas 3](#)

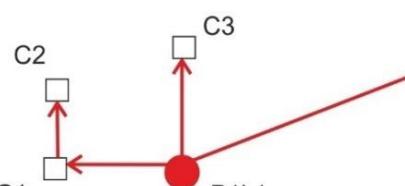
4.2.3 AJOUT D'UNE TECHNOLOGIE FOSSILE D'APPOINT :

APPROVISIONNEMENT CENTRALISE OU ISOLE DU CONSOMMATEUR ELOIGNE ?

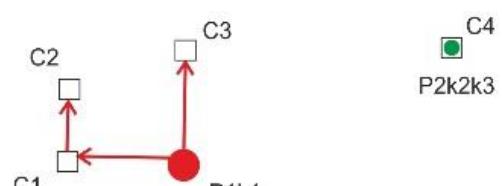
Dans ce cas 4, une technologie d'appoint k3, basée sur une énergie fossile est désormais potentiellement disponible en C4. Deux différentes configurations sont optimales suivant les données d'entrée, résumées dans le Tableau 4-7 :

4.2 : Approvisionnement centralisé/décentralisé/isolé du consommateur éloigné et intégration d'EnR&R

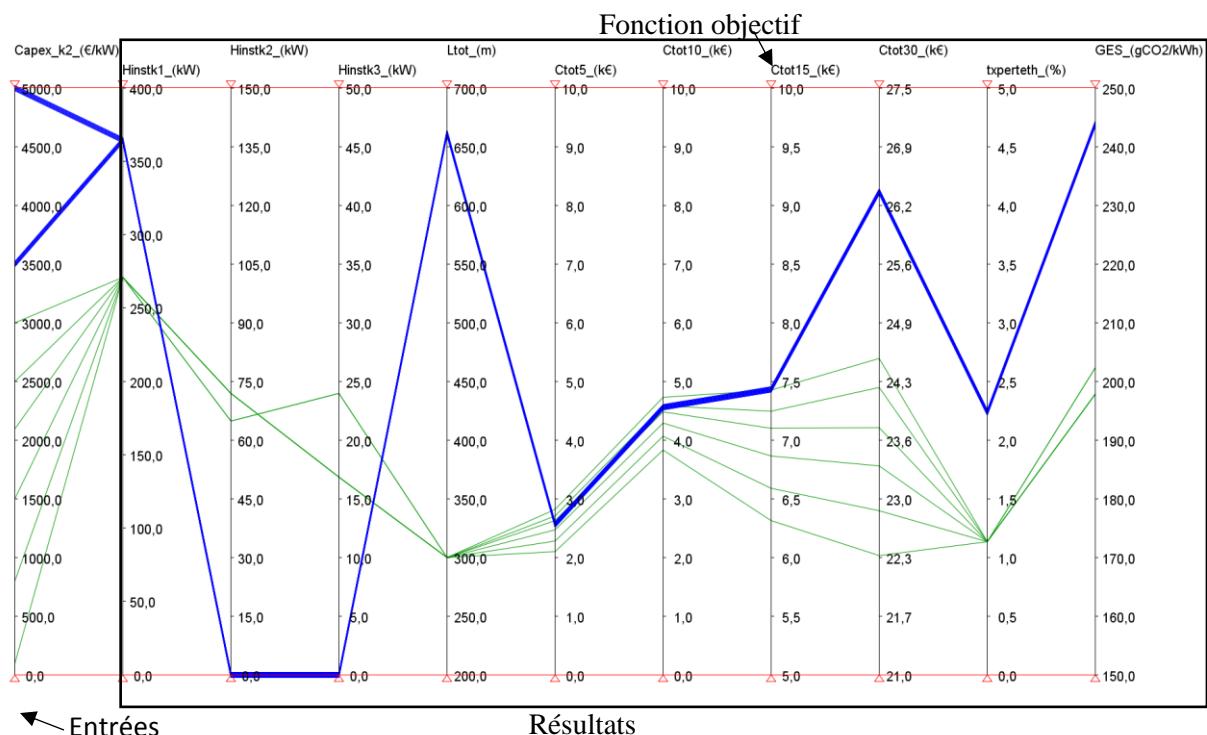
- La précédente configuration (Figure 4-10) L662-P1k1 est optimale dans 30% des cas de l'analyse de sensibilité (22 sur 72). Cette production centralisée à partir d'énergie fossile est optimale lorsque le coût d'investissement de l'EnR&R est prohibitif, les coûts de tranchée élevée et le prix du kWh pas si bon marché, pour les combinaisons en détail se référer au Tableau 4-7. En considérant un coût de tranchée fixé à 800€/m et une EnR&R avec un Opex de 4 ct€/kWh, la production centralisée fossile est optimale si l'investissement de l'EnR&R est supérieur ou égal à 3500€/kW (Figure 4-16).
- Au contraire, une production d'EnR&R décentralisée pour le consommateur éloigné (Figure 4-15) est optimale dans 70% des cas de l'analyse de sensibilité. Le coût global est contenu entre 5,91 et 7,80 M€ à 15 ans. A l'horizon 30 ans, la fourchette de variation de cette solution (21,24-25,29 M€) est strictement inférieure à la fourchette de variation de la solution précédente (25,8-27,1M€). Le taux de perte est plus faible (1,1% au lieu de 2,3%, ce qui reste un ratio de perte de charge très faible). De même, l'introduction d'EnR&R permet de réduire les émissions de GES de 244 à 199 gCO₂/kWh.



Rappel de la Figure 4-10 L662-P1k1



[Figure 4-15 Configuration optimale L300-P1k1- P2k2k3](#)



[Figure 4-16 Résultat de l'analyse de sensibilité sur le cas 4, à Capex-tr=800€/m et Opex-k2=4ct€/kWh](#)

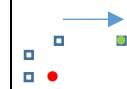
Tableau 4-7 Récapitulatif des conditions sur les données d'entrée différenciant les 2 solutions optimales obtenues : une production centralisée fossile classique (L662-P1k1) ou une production isolée à base d'EnR&R en C4 (L300-P2k2k3)

Entrées			Résultats					
Capex_k2 (€/kW)	Capex tranchée (€/m)	Opex_k2 (ct€/kWh)	Ltot (m)	Puissance installée EnR&R (kW)	Coût global		taux perte (%)	GES (gCO ₂ / kWh)
					15 ans	30 ans		
5 000	tous	tous	L662	0	7,13- 7,85	25,8- 27,1	2,3	244
3500	1500	6						
	800	4-6						
	300	tous						
3000	800-1500	6						
	300	4-6						
2500	300-800	6						
2100	300	6						
Autres (50 cas sur 72 cas testés)			L300	64,8-72	5,91- 7,80	21,24- 25,29	1,1	199

4.2.4 POTENTIEL DE RECUPERATION DE CHALEUR FATALE SUR UN PRODUCTEUR ELOIGNE

Une analyse similaire à la sous-section précédente (4.2.3) est réalisée, avec la même localisation des nœuds consommateurs (Figure 4-9), mais avec un éloignement du lieu de valorisation P2 (Tableau 4-8) et avec une contrainte différente sur la puissance disponible de k2 (grand potentiel de valorisation à l'échelle de tout le quartier). Étant donné le grand potentiel, cette technologie k2 peut être assimilée à de la récupération de chaleur fatale. La question est de savoir jusqu'à quelles limites (en distance et coût prohibitif de tranchée,) la valorisation d'un tel potentiel de récupération est rentable pour l'approvisionnement du réseau principal.

Tableau 4-8 Localisation en fonction de l'éloignement du lieu de valorisation de la chaleur fatale

Localisation P2	en C4	3x plus loin	5x plus loin
Input			

Pour faciliter la lecture des résultats, nous avons choisi d'exposer uniquement les résultats suivants, avec les coûts unitaires pour la technologie k2 (récupération de chaleur) fixés à :

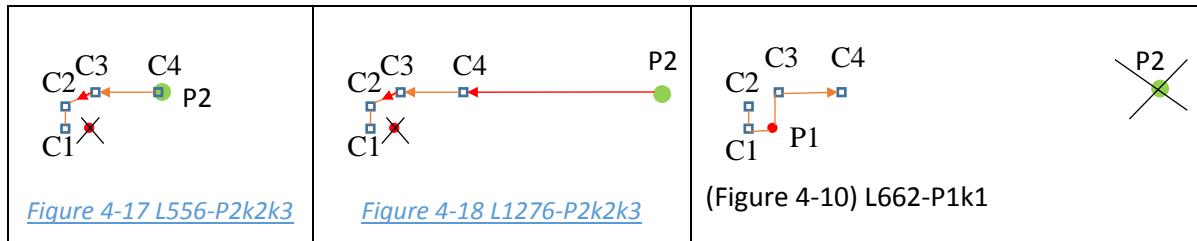
- Capex_k2=800€/kW : l'investissement pourrait très bien être fixé à une valeur plus faible si aucun travail ne doit être réalisé, p. ex. pour aménager la récupération de chaleur sur un procédé existant.
- Opex_k2=2ct€/kWh : la chaleur pourrait être gratuite également, mais admettons qu'il faille la payer, p. ex. à un gestionnaire d'usine d'incinération d'ordure ménagère (UIOM).

Trois configurations sont trouvées :

- Deux en valorisant la chaleur fatale avec des longueurs de réseau différentes :
 - une longueur de 556m lorsque P2 est localisé en C4 (Figure 4-17),

4.2 : Approvisionnement centralisé/décentralisé/isolé du consommateur éloigné et intégration d'EnR&R

- une longueur de 1276m lorsque P2 est 3X éloigné (Figure 4-18),
- La troisième gardant la production à partir d'énergie fossile, pour une longueur de réseau de 662m. Cette configuration a été précédemment trouvée Figure 4-10, elle est illustrée ci-dessous également, car c'est la configuration optimale lorsque P2 est 5X éloigné.



Les résultats sont dépendants de l'éloignement de la valorisation potentielle, mais aussi des coûts de l'EnR&R (capex et opex) ainsi que du coût de la tranchée. Une représentation simplifiée est visible par cluster de couleur sur le graphique de représentation parallèle (Figure 4-19). Le Tableau 4-9 est une synthèse de cette représentation afin de faciliter la différenciation des 3 configurations optimales trouvées :

- Lorsque P2 est localisé en C4, la chaleur fatale est toujours valorisée, configuration L556-P2k2k3 visible sur la Figure 4-17. Forcément lorsque P2 est le plus proche, l'estimation en coût global est dans les ordres de grandeur les plus bas, entre 3,0 et 6,9 M€ (pour toute l'analyse de sensibilité, la Figure 4-19 est à capex et opex de k2 fixé pour simplifier la lecture).
- Lorsque P2 est 3 fois plus loin, 2 configurations sont trouvées :
 - Dans la grande majorité des cas testés 94%, 17 tests sur 18, c'est la configuration valorisant la chaleur fatale qui est optimale (Figure 4-18). La valorisation de la chaleur fatale est rentable malgré l'investissement supplémentaire pour créer les tranchées (longueur de réseau de 1276m) et les déperditions supplémentaires (5,7% de ratio de perte thermique).
 - Sinon, comme spécifié dans l'avant-dernière ligne du Tableau 4-9, l'approvisionnement centralisé basé sur une énergie fossile (Figure 4-10) est optimal lorsque tous les autres coûts sont maximaux. Dans ce cas le coût global est estimé à 7,9 M€. Les inconvénients d'une telle solution basée sur l'énergie fossile uniquement sont que les émissions de GES sont les plus élevées et que le projet n'est pas éligible au fonds de chaleur (car entre autre, le cahier des charges spécifie au moins 50% d'EnR&R dans le mix énergétique).

[Tableau 4-9 Récapitulatif des conditions sur les données d'entrée différenciant les 3 solutions optimales obtenues pour le cas 5](#)

Entrées	Résultats								
	Eloignement par rapport à P2 (m)	Capex_k2 (€/kW)	Capex tranchée (€/m)	Opex_k2 (ct€/kWh)	Ltot (m)	Puissance EnR&R (kW)	Coût global (M€)	per te (%)	GES (gCO2/kWh)
1x(180m)	tous	tous	tous	556	288	3,0-6,9	9,5-17,9	1,7	62
3x(540m)	autres	autres	autres	1276	0	3,6-7,1	11,2-19,0	5,7	70
	1500	1500	4	7,9		27,1	2,3	244	
5x(900m)	tous	tous	tous	662		7,1-7,9			25,8-27,1

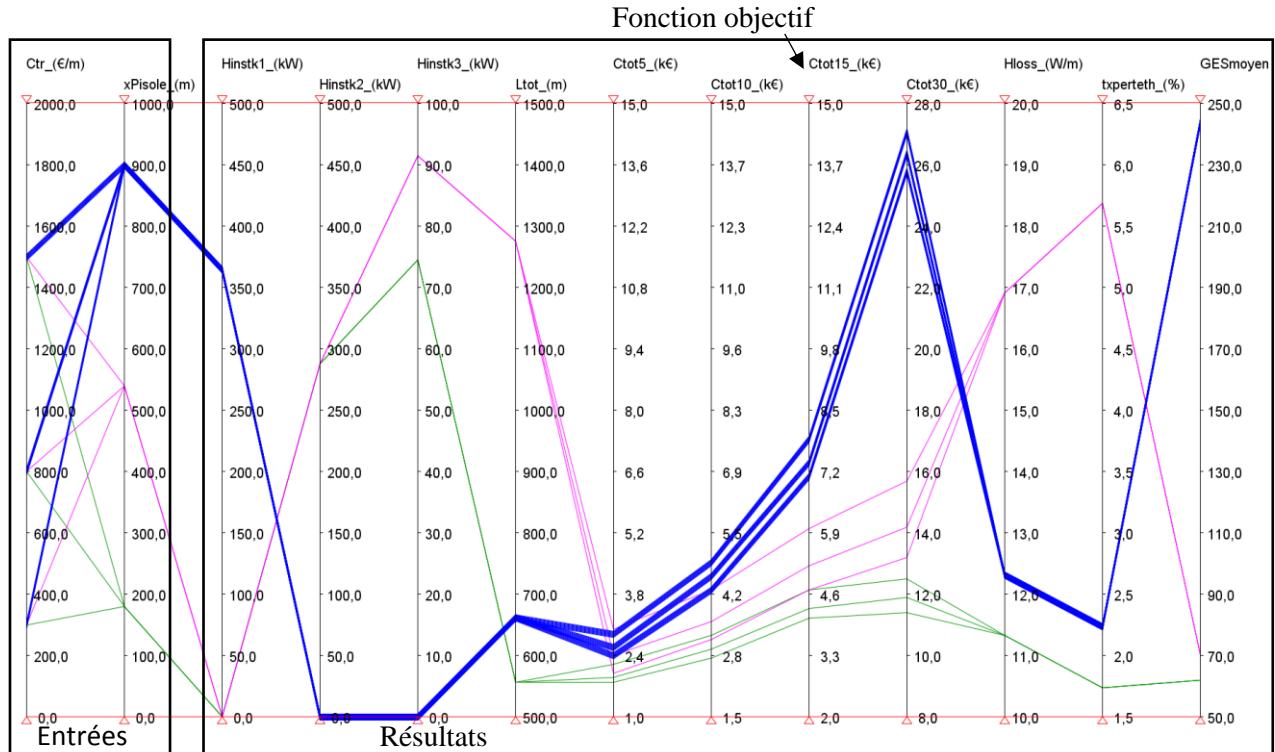


Figure 4-19 Résultat de l'analyse de sensibilité sur le cas 5, à Capex-k2=800€/kW et Opex-k2=2ct€/kWh

La répartition de l'investissement par rapport aux factures énergétiques est représentée Figure 4-20. Rappelons que la fonction objectif est la minimisation du coût total à 15 ans. Mais en fait, dès 5 ans, les solutions valorisant la chaleur fatale (localisée 1X ou 3X plus loin) sont toujours moins chères que l'approvisionnement à partir d'énergie fossile. La distinction se fait plus facilement à 30 ans, la part des factures énergétiques est significativement plus faible (autour de 60%) lorsque de la chaleur fatale est valorisée, alors qu'autrement les factures énergétiques sont moins maîtrisées et représentent 85% du coût total.

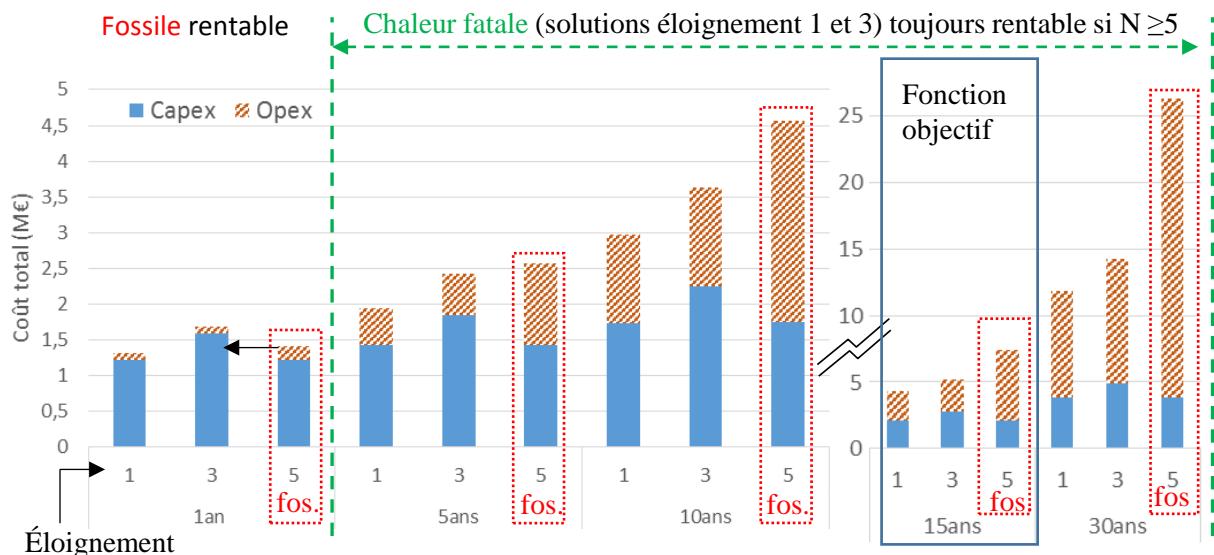


Figure 4-20 Comparaison à différent horizon temporel pour 3 éloignements du lieu de production P2 (à P2, 3X plus loin et 5X plus loin), à Capex-k2=800€/kW, Capex-tr=800€/m et Opex-k2=2ct€/kWh

4.3 OPTIMISATION DU RESEAU SUR L'ILLOT EXISTANT C1C7

Après avoir étudié des cas d'étude à échelle réduite, afin de démontrer le potentiel de la formulation développée, nous proposons deux dernières sections portant sur l'étude de la conception de réseau à « échelle quartier ».

Le cas 6 est une étude basée sur un réseau existant dont le plan est représenté en arrière-plan de la Figure 4-21. Les coordonnées ainsi que les besoins respectifs des consommateurs sont rapportés dans le Tableau 4-10. La somme des puissances requises des 7 consommateurs est de 496 kW. Nous avons fait l'hypothèse que tous les consommateurs ont un régime de température de 70/50°C.

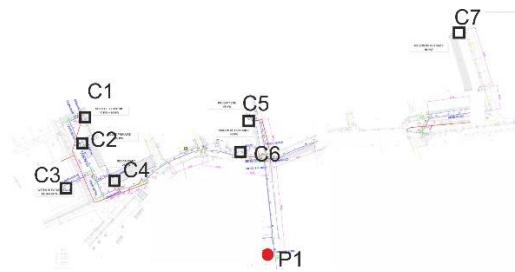


Tableau 4-10 Localisation et besoin thermique nominal des consommateurs du cas 6

	P1	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
x (m)	280	91	91	69	146	267	245	465
z (m)	24	166	136	94	105	167	133	248
H _{req} (kW)	0	135	60	90	25	45	45	96

Figure 4-21 Localisation du cas 6 P1k1C7

La configuration optimale de ce cas d'étude 6 est la Figure 4-22. Elle est similaire à la configuration du réseau existant. L'ajout de bifurcation n'est pas illustré dans ce manuscrit, mais nous avons testé pour ce réseau d'ajouter des bifurcations au carrefour des routes. Ainsi avec un coût de tranchée moins important le long des routes, comparé au tracé « à vol d'oiseau », un maillage du réseau suivant les routes a été trouvé optimal. Toutefois l'objet de cette section n'est pas d'étudier si la solution optimale suit ou non le tracé des routes, mais plutôt de s'intéresser à : l'ajout potentiel d'un autre lieu de production, l'intégration d'EnR&R ou l'extension de réseau. En effet, la diversification du mix paraît importante car à l'horizon 30 ans, la part des factures de fonctionnement en combustible fossile représente 83% du coût total (Figure 4-23).

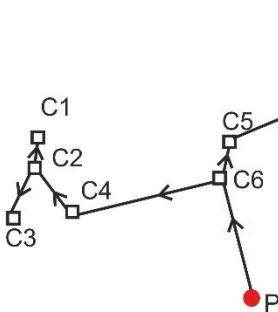


Figure 4-22 Configuration optimale L1440-P1k1 du cas 6

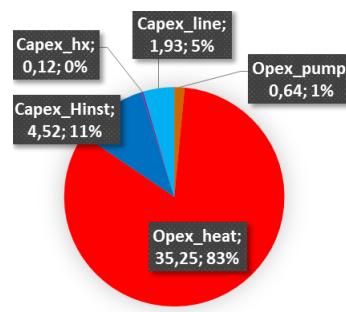


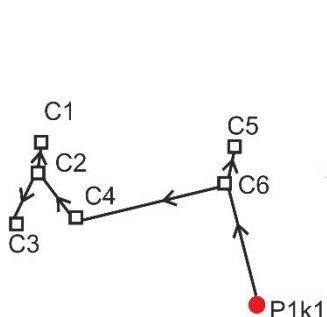
Figure 4-23 Répartition des coûts de la solution optimale (Figure 4-22)

Le dimensionnement optimal indique une puissance fossile k1 à installer en P1 de 574 kW. Ainsi 78 kW sont installés en plus des 496 kW (correspondant à la somme des puissances nominales requises Tableau 4-10), afin de compenser les pertes thermiques et pour satisfaire les appels de puissance (avec l'hypothèse d'un facteur de capacité de 33%). Un tel résultat est du même ordre de grandeur que la puissance réellement installée (600 kW).

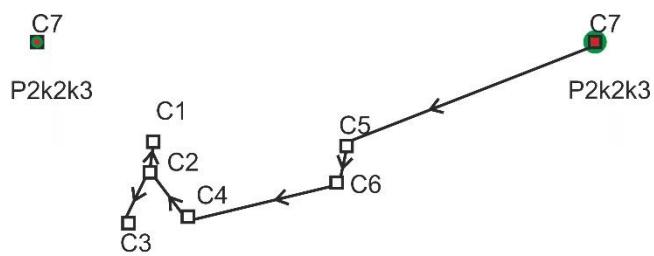
Chapitre 4 : Résultats

L'intégration d'EnR&R est testée à la localisation du consommateur éloigné (C7), de manière similaire à l'étude de la section (4.2) :

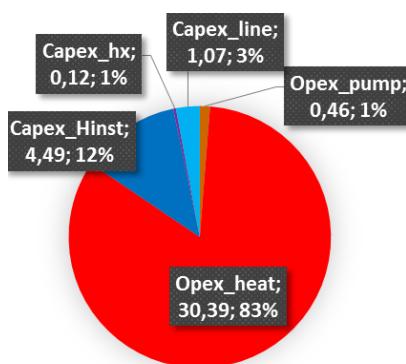
- Dès lors qu'une EnR&R potentielle avec un appoint fossile est disponible à la localisation du consommateur éloigné (C7), mais limité à 90% de la puissance requise par C7, l'approvisionnement isolé de C7 à partir de P2k2k3 est toujours optimal (Figure 4-24) : la puissance fossile à installer en P1 diminue de 574 kW à 458 kW et en compensation 86 kW d'EnR&R sont installés avec un appoint k3 de 20 kW. Une telle solution permet d'économiser 13,4 % du coût global à 30 ans (réduction de 42,5 M€ à 36,5 M€). La longueur totale du réseau est diminuée à 796 m, ce qui permet une réduction de l'investissement de la tranchée (de 1,93 M€ à 1,07 M€). La densité thermique est plus élevée 6,21 MWh/m (au lieu de 3,5 MWh/m).
- Dès lors qu'une chaleur fatale est disponible pour approvisionner 90% de l'ensemble du besoin de l'îlot C1C7, cette solution est optimale (Figure 4-25) : aucune puissance fossile n'est installée en P1 alors qu'en P2 sont installés 446 kW de k2 et 118 kW de k3. L'analyse de la répartition des coûts permet de constater que l'investissement des puissances à installer est légèrement augmenté (de 4,52 à 4,68 M€), mais en contrepartie les factures énergétiques sont significativement diminuées (de 35,25 à 12,51 M€). L'économie en coût global en est d'autant plus conséquente : dès la première année, des factures énergétiques mieux maîtrisées (pompage et chaleur Figure 4-27 par rapport à Figure 4-26) permettent 12,5 % d'économie sur le coût global, ce qui à l'horizon de 30 ans mène à une économie de 55 % (coût global à hauteur de 19,2 M€).



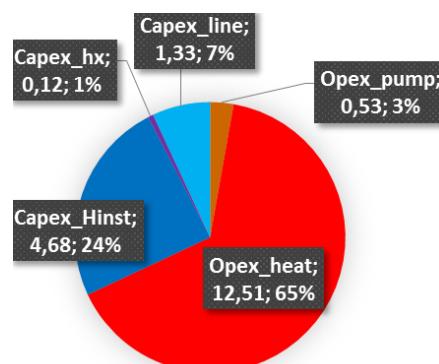
[Figure 4-24 Configuration optimale du cas 6 agrémenté de l'ajout potentiel de P2k2 pour C7](#)



[Figure 4-25 Configuration optimale du cas 6 agrémenté de l'ajout potentiel de P2k2 pour l'îlot C1C7](#)



[Figure 4-26 Répartition des coûts de la solution optimale représentée sur la Figure 4-24](#)



[Figure 4-27 Répartition des coûts de la solution optimale représentée sur la Figure 4-25](#)

4.4 CAS DETUDE DE TAILLES CONSEQUENTES

4.4.1 CREATION EX-NIHILO D'UN RCU SUR LE QUARTIER C1C19

Dans cette sous-section est étudié un cas de réseau étendu. La disposition des consommateurs précédents est reprise et 2 groupes de consommateurs voisins sont ajoutés, correspondant à des « motifs » géométriques similaires, l'un situé à 500m à l'Est du premier groupe de consommateurs et l'autre à 200m au Nord.

Une telle taille de problème complexifie le problème. Comme explicité section 2.7 Tableau 2-11, avec 2 producteurs, 3 technologies et 19 consommateurs, le modèle le plus complexe MINLP_aller_Cp(T), admet plus de 20 000 variables et 30 000 contraintes (égalités ou inégalités). Nous avons choisi de résoudre ce problème avec le modèle MINLP_AR_Cp, ce qui réduit d'environ 15% le nombre de variables continues et de 20% le nombre de contraintes égalités (Tableau 2-10). La stratégie de « résolutions en plusieurs étapes intermédiaires » de ce cas d'étude a nécessité 224 résolutions (12 initialisations, testées sur 7 bornes, pour 1 jeu de données d'entrée). Pour le cas 8, le temps de calcul correspondant est de 40min au total (soit environ 11s par résolution) avec un processeur Intel i5 2,60 GHz et 4 Go de RAM. Pour le cas 7, avec moins de combinatoire le temps de calcul est diminué de 50% environ.

Nous faisons l'hypothèse, pour ces cas d'étude 7 et 8, qu'aucun réseau existant n'approvisionne l'îlot C1C7, c'est-à-dire que toutes les canalisations et puissances à installer ont un coût d'investissement (comme tous les cas précédents). L'aide à la conception intervient pour la création d'un RCU sur tout le quartier C1C19. Les données d'entrée sont rapportées dans le Tableau 4-11.

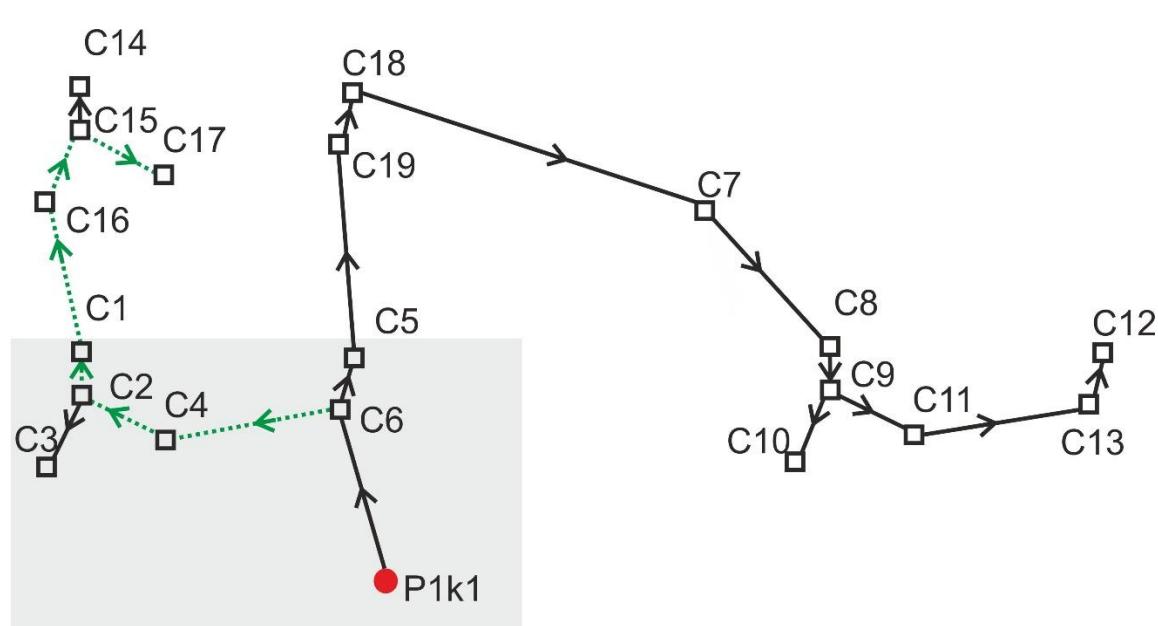
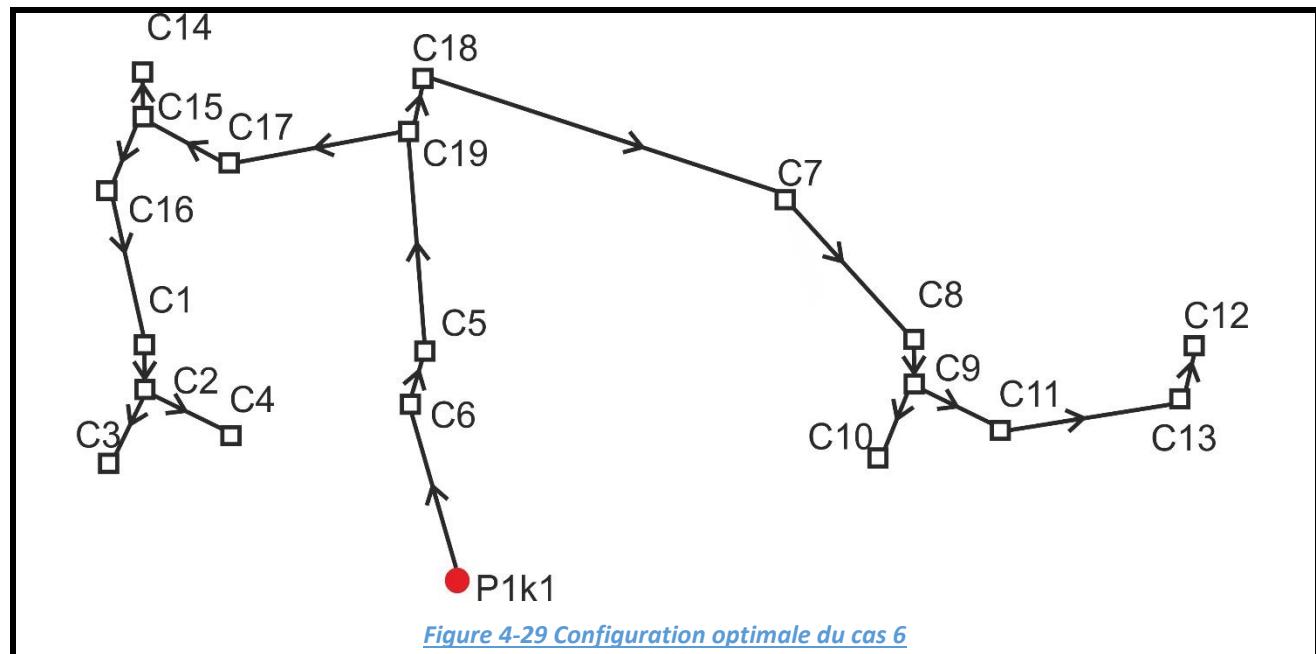
Tableau 4-11 Données d'entrée des cas 7 et 8 (basés sur un réseau existant)

Cas	Localisation	Borne supérieure de la puissance P2k2
Cas 7		N/A
Cas 8	Localisation identique au cas 7 (Figure 4-28), avec l'ajout potentiel d'EnR&R (k2) en P2, localisée en C7, ainsi qu'une technologie d'appoint fossile (k3).	90% de la somme des besoins de tout le quartier C1C19

Les résultats sont disponibles (Tableau 4-12) pour le cas 7, le dimensionnement et le maillage du réseau sont optimisés (le choix de la technologie n'étant pas diversifié dans les données d'entrée, il n'est pas possible de l'optimiser). La configuration optimale est représentée sur la Figure 4-29. Il est intéressant de constater que le sous-quartier C1C6 a la même configuration que précédemment (Figure 4-22).

- Ainsi, le phasage des travaux peut s'étaler dans le temps, avec une première phase de construction du réseau sur l'îlot C1C7, puis dès lors que les îlots suivants se construisent, le RCU peut s'étendre (à condition que l'îlot C14C19 se construise avant l'îlot C8C13, sinon il faudra penser à une chaufferie provisoire (p. ex. en C7).
- A noter qu'une configuration (Figure 4-30) via C19C17 (au lieu de C6C4) est identique en longueur à 1 mètre près et le coût global est quasiment identique (+0,09%). Ainsi si l'une la canalisation C6C4 n'est pas faisable technique ou avec un prix prohibitif (par exemple création d'un pont nécessaire), l'autre chemin (C19C17) convient également.

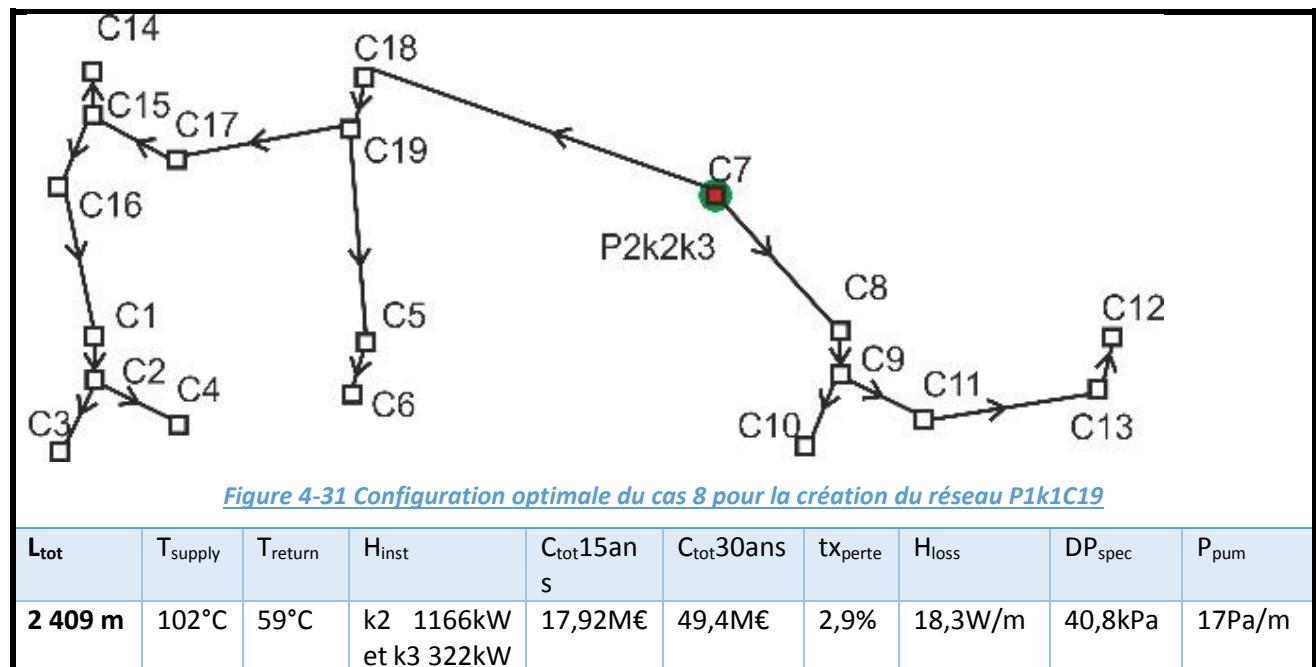
[Tableau 4-12 Configuration et dimensionnement optimal du cas 7](#)



[Figure 4-30 Configuration sous-optimale, néanmoins proche de la configuration optimale \(Figure 4-29\), en trait pointillé vert toutes les canalisations ayant changées \(le sens étant important\).](#)

Les résultats en configuration et dimensionnement pour le cas 8 sont rapportés dans le Tableau 4-13. Comme vu précédemment section 4.2, l'intégration d'EnR&R est optimale, car les factures énergétiques sont mieux maîtrisées sur le long terme. Ainsi la configuration optimale est différente (Figure 4-31) : L'approvisionnement à partir de 1166 kW l'EnR&R est optimal.

Tableau 4-13 Configuration et dimensionnement optimal du cas 8

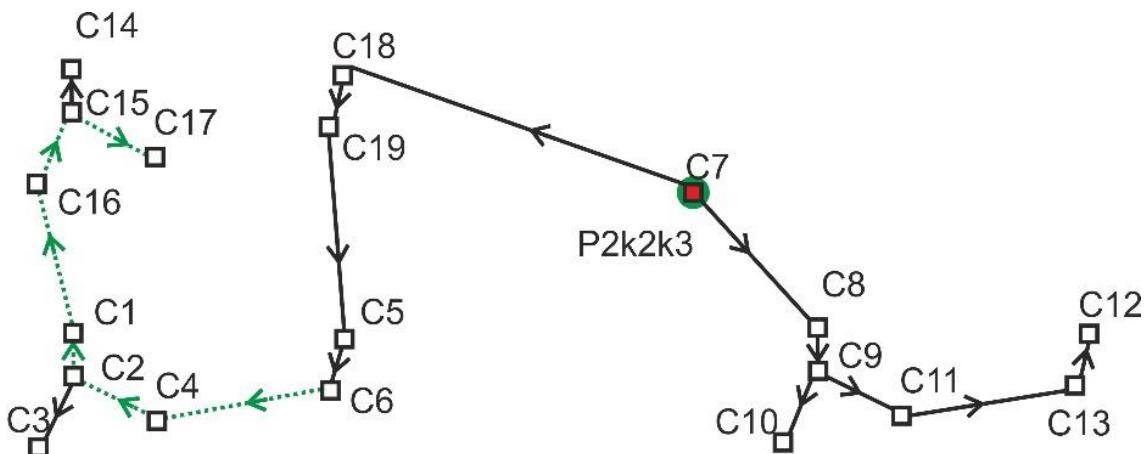


4.4.2 EXTENSION DU RESEAU EXISTANT P1K1C7

Considérons désormais, contrairement à la sous-section (4.4.1) précédente, que le réseau (Figure 4-22) existe déjà, c'est-à-dire que les investissements pour l'installation des 574 kW en P1k1 et des canalisations de ce réseau (P1C6, C6C5, C6C4, C4C2, C2C1 et C2C3) ne sont plus à réaliser.

La configuration optimale est identique à celle du cas 7 (Figure 4-29). Mais comme une partie des canalisations est déjà existante, le coût des canalisations est diminué de 0,46 M€ (-19%). De plus, comme 574 kW étaient déjà installés, l'investissement restant pour la puissance à installer est diminué de 2,51 M€ (-38%). Au total, le coût global à 15 ans est réduit de 30,8 M€ à 27,8 M€, soit une différence de 2,97 € (- 9,6%). A l'horizon de 30 ans, le coût global diminue de 108,4 à 103,0 M€, soit 5,34 € de différence (-4,9%). Nous avons choisi de ne pas étudier la différence d'investissement sur les sous-stations. En effet, notre formulation ne permet pas d'étudier la rénovation des sous-stations fonctionnant avec des bouteilles casse-pression, car les consommateurs sont modélisés avec des échangeurs de chaleur.

Dès lors qu'une forte valorisation d'EnR&R est disponible (cas 8), celle-ci est choisie de façon préférentielle. Et même si 574 kW de chaudière gaz était déjà installée, celle-ci n'est plus utilisée. Par contre, la configuration du réseau est légèrement différente, afin de valoriser les canalisations déjà existantes (Figure 4-32). Le coût global du réseau, entre une création et une extension, admet une très petite diminution du coût de 17,83 M€ à 17,57 €, soit 0,26 M€ (-1,4%) à l'horizon 15 ans.



[Figure 4-32 Configuration optimale du cas 8 \(P2k2k3C19_L2470\) lors de l'extension du réseau P1k1C7](#)

Que l'on soit en création ou en extension, le coût global diminue drastiquement (environ de moitié) dès que l'on peut récupérer de la chaleur fatale pour l'approvisionnement de RCU, comparé à un RCU 100% fossile. Plus précisément, dans le Tableau 4-14, dans le cadre de création de RCU le coût global à l'horizon 15 ans diminue de 30,81 à 17,83 M€ (-42,1%) et dans le cas d'une extension de RCU de 27,84 à 17,58 M€ (-36,9%). Les réductions sont plus importantes à l'horizon 30 ans. La sécurisation de l'approvisionnement par l'introduction d'EnR&R dans le mix énergétique en est d'autant plus rentable à long terme, par exemple à 30 ans, les réductions sont plutôt de l'ordre de 60% du coût global.

[Tableau 4-14 Comparaison de réduction du coût global entre le cas 7 et 8, suivant l'horizon temporel et si une création ou extension est considérée](#)

	Création		Extension	
	15 ans	30 ans	15 ans	30 ans
Ctot (M€)				
cas 7 fossile	30,81	108,38	27,84	103,04
cas 8 EnR&R	17,83	39,45	17,58	38,99
réduction	-42,1%	-63,6%	-36,9%	-62,2%

4.5 CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce dernier chapitre a permis de démontrer la pertinence de la méthode d'optimisation développée, d'abord sur un cas d'étude avec la comparaison des modèles puis sur des cas de tailles plus conséquentes.

La section (4.1) a mis en valeur, sur le cas 1 P1k1C3, l'importance de prendre en compte les régimes de températures différents des consommateurs, la précision des modèles dont les caractéristiques dépendent de la température pour les RCU très haute température, l'avantage de la connexion en cascade de consommateurs et les conditions de rentabilité des réseaux bouclés.

- Rappelons que par définition le premier modèle MILP ne permet pas de prendre en compte différents régimes de température et il n'est d'aucune aide pour l'aide au dimensionnement. Par contre, étant donné ses **simplifications (température et diamètre fixé, pas de prise en compte physique ni des pertes thermiques ni des pertes de charge)**, la résolution d'un tel modèle MILP est très rapide (**0,10 s**) sur P1k1C3. Rappelons que dans la méthode générale de résolution, ce modèle MILP permet d'initialiser la structure pour les modèles plus complexes (NLP et MINLP).
- Le modèle NLP est également très rapide à résoudre (0,39 s) sur le cas d'étude P1k1C3. Le temps de calcul est néanmoins 4 fois plus long, malgré le fait que la structure soit fixée, mais l'intérêt d'un tel modèle est de pouvoir aider au dimensionnement, par exemple, de la température d'approvisionnement ou du diamètre des canalisations. La **prise en compte des pertes de manière physique permet de prendre en compte le bon compromis entre les pertes thermiques et les pertes de charge**. Ainsi, lorsque le consommateur C1 nécessite un régime de température très haute température (THT 120/110°C) au lieu d'un régime HT (90/70°C), le dimensionnement optimal est modifié : augmentation des pertes thermiques (de 16,4 à 29,8 W/m) tout en conservant un ratio de perte thermique sur l'énergie totale livrée très performant (inférieur à 3,2%) et au contraire, une diminution des pertes de charge spécifique. La description physique précise du dimensionnement, pertes incluses, permet de diminuer le coût total du réseau (-5,60%) à l'horizon de 5 ans, alors qu'à l'horizon de 30 ans le coût total est corrigé à la hausse (+2,23%) par rapport au modèle MILP ne prenant pas en compte ces aspects de dimensionnement.
- Enfin les modèles MINLP permettent d'optimiser aussi bien la configuration et le dimensionnement, mais au prix d'un temps de calcul plus important (environ 15 fois plus de temps, soit entre 6,53 et 8,58s selon les options du modèle - canalisation aller-retour forcée ou non et caractéristiques de l'eau constantes ou non). L'avantage du modèle le plus complexe (MINLP_aller_Cp(T)) est de montrer que la configuration et le dimensionnement sont intimement liés : suivant que C1 soit HT ou THT, 2 configurations optimales différentes sont trouvées.
- **L'approvisionnement en cascade est toujours optimal comparé à l'approvisionnement en parallèle**, pour nos cas d'étude, avec une différence de température requise de l'ordre de 10°C. Les pertes thermiques sont réduites d'un palier supplémentaire (de 29,2 à 26,2 W/m lorsque C1 THT et de 16,4 à 14,1 W/m lorsque C1 HT) par rapport à l'optimisation NLP avec une configuration classique d'approvisionnement en parallèle des consommateurs. La réduction du coût global est de l'ordre de 0,2% par rapport à la solution déjà optimisée du problème NLP, aussi bien à l'horizon 5 ans que 30 ans.
- Les gains d'un réseau bouclé, avec des canalisations uniquement aller (et non aller-retour), sont minimes. Un réseau bouclé (avec approvisionnement en cascade) permet de diminuer encore les pertes thermiques. Mais, dans nos cas d'étude, un tel réseau bouclé n'est jamais rentable si le coût de la tranchée est supérieur à 500€/m. Il est intéressant de constater qu'avec un coût de tranchée à 300€/m, le réseau bouclé est optimal suivant les conditions de température et aussi de niveau de performance de l'isolant.

La section (4.2) a permis d'illustrer l'avantage de diversifier le mix énergétique sur un exemple académique P2k3C4.

- Le cas 2 de référence P1k1C4 a étudié l'analyse en coût global selon les variations du Capex, de l'Opex et de l'inflation du cours de l'énergie fossile (technologie k1). L'intérêt est de montrer une forte variation du coût global (entre 22,2 M€ et 44,2 M€) selon les hypothèses de conjoncture économique prises. Au contraire, dans les cas où une énergie renouvelable est intégrée dans le mix, du fait de l'inflation contenue et de l'Opex bon marché, le risque financier à long terme est mieux maîtrisé.
- Le cas 3 permet d'affirmer que l'intégration d'EnR&R (technologie k2) pour subvenir à 90% du consommateur isolé C4 (tout en le reliant au réseau pour subvenir au reste des besoins d'appel de puissance) sera toujours rentable et permet de réduire le coût global de 11,8% à l'horizon de 30 ans.
- Le cas 4, qui autorise une technologie k3 pour l'appoint du consommateur isolé C4 (localisé trois fois plus loin), permet de conclure que l'intégration d'EnR&R en C4 sera toujours rentable tant que l'investissement de celle-ci est inférieur ou égal à 3 000€/kW (soit 3,75 fois plus que l'investissement de l'énergie fossile) pour un coût de tranchée moyen (800€/m) et un Opex de l'EnR&R de 2 ct€/kWh.
- Le cas 5 étudie la valorisation de la chaleur fatale sur un site de production éloigné. Celle-ci est rentable et permet de diminuer le coût global du RCU autour de 12 M€ à 30 ans, si le site P2 est localisé en C4 et autour de 14M€ à 30 ans si P2 est éloigné 3 fois plus loin. La valorisation est rentable malgré l'investissement pour les canalisations supplémentaires et les coûts de fonctionnement supplémentaires (pompage et surtout perte thermique). Nous constatons que le taux de perte thermique est élevé (5%), tout en restant meilleur que sur des réseaux non optimisés, ce taux est supérieur au taux de 2% constaté sur les autres solutions optimisées. Par contre, la valorisation de chaleur fatale n'est plus rentable si le potentiel de valorisation de chaleur fatale est localisé trop loin du quartier (5 fois plus loin) pour un coût de tranchée fixé à 800€/m.

La section (4.3) illustre la comparaison de notre dimensionnement optimal avec le dimensionnement effectivement réalisé sur un quartier existant. Les ordres de grandeur en puissance installée, en régime de température et diamètre de canalisation sont respectés. Ce retour d'expérience est à enrichir dans les futurs projets NOBATEK dans le domaine des RCU. Une analyse sur l'approvisionnement du consommateur isolé C7, similaire à la section (4.2), a été également menée. Dès lors qu'une valorisation d'EnR&R est possible, alors celle-ci est toujours optimale. Si le potentiel est limité à 90% des besoins de C7, la diminution du coût global est de l'ordre de 13% du coût global à 30 ans (par rapport à la solution optimisée d'approvisionnement centralisé 100% fossile). Et si un grand potentiel est disponible (pouvant approvisionner 90% des besoins de toutes les sous-stations C1 à C7), alors l'économie sur le coût total est de 55% sur 30 ans.

La section (4.4) est l'application de notre méthode sur des réseaux de tailles conséquentes, allant jusqu'à 19 sous-stations, pour une puissance installée de 1,5 MW et 3 km de réseau. Notre méthode est applicable à des tailles conséquentes grâce notamment, à la stratégie de résolution « en plusieurs étapes intermédiaires » développée section 3.3. Sur de telles tailles d'exemples, la méthode de résolution sur 200 résolutions différentes, afin d'assoir la confiance dans le résultat, ce qui a pris environ 40min de temps de calcul. Deux études sont réalisées (cas 7 et 8), l'une sur le maillage du réseau (mais qu'à partir une seule production centralisée 100% fossile) et l'autre sur le maillage et le choix d'une potentielle valorisation d'EnR&R. Comme précédemment, l'intégration d'EnR&R est optimale dès qu'elle est disponible et mène à une réduction du coût global jusqu'à 60% à l'horizon 30 ans. Ces deux cas étudient aussi si le RCU est créé entièrement ou s'il est étendu à partir d'un réseau existant. En extension de réseau, l'optimum trouvé dès lors qu'une valorisation de chaleur fatale est disponible reste la valorisation d'EnR&R, malgré le fait que l'investissement de la chaufferie basée sur une énergie fossile ait déjà été amorti (celle-ci est abandonnée).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSIONS DES TRAVAUX DE THESE

Originalités de la formulation pour l'aide à la conception des RCU

Les Réseaux de Chaleur Urbains (RCU) sont une solution fédératrice des scénarios de transition énergétique, en permettant de réduire l'impact sur l'environnement et de sécuriser l'approvisionnement énergétique, ceci notamment grâce à l'introduction facilitée d'énergie renouvelable et de récupération (EnR&R) et la cogénération.

Ces travaux de thèse ont porté sur le développement d'une méthode d'optimisation appliquée à la conception de RCU.

Les principales données d'entrée de notre outil sont pour :

- Les consommateurs : la localisation des nœuds consommateurs, leur régime de température et leur puissance nominale.
- Les producteurs : les sites « potentiels » ainsi que les technologies disponibles avec leurs coûts d'investissement et de fonctionnement respectifs.
- Les canalisations : le coût de la tranchée.

Concernant les variables d'optimisation, certaines sont binaires (existence ou non des canalisations entre 2 nœuds ou existence de telle technologie sur tel site de production) et d'autres continues (diamètre, vitesse, température, pression, aire d'échangeur de chaleur ou puissance à installer).

L'aide à la conception des RCU porte simultanément sur l'optimisation de leur configuration et de leur dimensionnement. Ainsi le problème d'optimisation sera de type MINLP (Mixed Integer Non Linear Programming).

- Les variables binaires sont nécessaires pour aider à la conception du maillage du réseau et au choix des technologies de production. En configurations innovantes, il est possible d'autoriser des connexions en cascade en température entre consommateurs. Il est également possible de ne pas forcer une canalisation à être aller-retour dans une même tranchée. Ainsi, un réseau bouclé en cascade peut être envisagé.
- La présence d'équations non-linéaires est dictée par le niveau de détail souhaité (des contraintes et de la fonction objectif). En principales équations non-linéaires, nous avons les équations de conservation d'énergie, où les températures, les vitesses et les diamètres sont des variables à optimiser. De plus, comme nous souhaitons travailler à la valorisation de chaleur fatale (large gamme de température de 30 à 150°C), mais aussi sur des réseaux basse-température, la prise en compte physique des pertes thermiques et des pertes de charge est nécessaire. Au final, l'aide au dimensionnement porte sur les régimes de distribution en température ou vitesse d'écoulement du fluide caloporteur (eau) et diamètre des canalisations dans le réseau primaire, puissance à installer en chaufferie(s) et aire des échangeurs de chaleur en sous-stations.

La fonction objectif à minimiser est le coût global du RCU sur le long terme (à l'horizon maximal de 30 ans). Celui-ci inclut d'une part, les investissements à réaliser l'année initiale : le coût de la puissance à installer, le coût des canalisations et le coût des échangeurs de chaleur en sous-station. Et d'autre part, les coûts opérationnels qui interviennent chaque année et qui peuvent prendre de l'importance avec les scénarios d'inflation des cours de l'énergie : le coût de la chaleur (perte thermique incluse) et le coût de pompage (perte de charge incluse). L'analyse en coût global permettant de prendre en compte de nombreux aspects attendus (réflexion à long terme, intégration d'EnR&R et une pollution maîtrisée), cette seule fonction objectif a été considérée. D'autres indicateurs de performances sont proposés en sortie de l'outil, par exemple sur les émissions de GES.

Il est nécessaire de développer une **stratégie de résolution robuste « en plusieurs étapes intermédiaires »**, afin d'aider à la convergence du problème MINLP (notamment sur les cas de grande taille) et aussi d'assurer une confiance dans la solution optimale obtenue. L'ordinogramme général est présenté Figure 3-9. Dans la méthodologie générique que nous proposons :

- 1) Une première étape d'initialisation permettant de lier 3 modèles. Avant de résoudre le problème MINLP, il faut résoudre deux problèmes simplifiés : MILP et NLP. Le premier problème (MILP) ne prend pas en compte de manière physique les pertes thermiques (le ratio de perte thermique sur l'énergie totale livrée est estimé à 5%) et les pertes de charge (les coûts de pompage sont estimés à 1% du coût total). Ce premier modèle est utile pour l'exportation d'une configuration de réseau (maillage et technologie de production). Cette structure de réseau est utilisée pour l'initialisation du second problème (NLP) incluant le calcul de manière physique, aussi bien des pertes thermiques que des pertes de charge. Toutes les valeurs optimales des variables continues (température, vitesse, diamètre...) sont exportées de ce problème NLP. Ces deux exports de résultats (variables binaires du modèle MILP et variables continues du modèle NLP) permettent d'initialiser le problème MINLP complet.
- 2) Ensuite une deuxième étape de génération de résultats est conseillée, avec des données d'entrée proposées par un expert et ensuite par tirage aléatoire. Ces résultats serviront d'initialisation ensuite pour le test des minima locaux. Différentes stratégies « expertes » peuvent être ajoutées, telles que la résolution à la suite de différentes fonctions objectif ou l'initialisation de problème de grande taille.
- 3) Enfin, une troisième étape permet de détecter d'éventuels minima locaux, en testant à la fois l'influence des bornes et de différentes initialisations (les résultats précédemment générés) pour ne proposer que l'unique meilleure solution pour un jeu de données d'entrée. Le choix des bornes est décisif. Car premièrement, sans bornes ou avec des bornes autorisant un trop grand domaine de recherche, la résolution ne converge plus forcément, d'autant plus dans le cadre de problème MINLP non-convexe. Et deuxièmement, les bornes sont parfois saturées (c'est-à-dire qu'à la convergence, la variable prend la valeur de la borne).

Démonstration de l'intérêt d'une telle formulation MINLP

Le dernier chapitre propose de démontrer l'intérêt de nos travaux pour l'optimisation de RCU, aussi bien sur des cas d'étude (pour faciliter la représentation des résultats), que sur un réseau existant (pour comparer avec le dimensionnement réalisé) et aussi sur des cas d'étude à l'échelle quartier (pour illustrer que la méthode est aussi applicable à des tailles de problèmes conséquentes).

Résultats cas 1 : Comparaison de 5 modèles, intérêt de la cascade et des réseaux bouclés

La comparaison des 5 modèles a été réalisée sur un cas d'étude simple P1k1C3, soit 1 lieu de production P1, avec 1 technologie disponible k1, pour approvisionner 3 consommateurs, C1 étant le

Conclusion et perspectives

consommateur haute température (90/70) ou très haute température (120/100°C), les autres consommateurs étant considérés basse température (50/30°C).

- **Le modèle combinatoire linéarisé (MILP) converge très rapidement (0,1 s), mais il n'est d'aucune utilité pour le dimensionnement** (aucune perte modélisée physiquement, avec les variables de température et de diamètres fixées en données d'entrée). Rappelons que ce modèle sert pour l'initialisation de la configuration des modèles plus complexes. De tels modèles MILP sont courants dans les travaux traitant de l'optimisation de la configuration des RCU.
- Le modèle non linéaire à configuration fixée (NLP) converge également rapidement (0,4 s) et il permet **d'aider au dimensionnement, en respectant l'équilibre perte thermique - perte de charge**. Rappelons que le résultat des modèles NLP sert également pour l'initialisation des variables continues des modèles MINLP.
- Les modèles combinatoires non-linéaires (MINLP) sont les plus complexes. A notre connaissance, très peu d'autres travaux d'optimisation simultanée de la configuration et de dimensionnement des RCU sont traités avec un modèle MINLP. **Une telle formulation MINLP permet d'optimiser simultanément la configuration et le dimensionnement de RCU**, ceci au prix d'un temps de calcul plus long (entre 6 et 8 s, suivant le niveau de détail du modèle) :
 - Le modèle MINLP_AR_Cp est un modèle avec les caractéristiques de l'eau prises constantes par hypothèse sur la gamme 60-100°C et avec une contrainte pour forcer les canalisations à être aller et retour dans une même tranchée.
 - Le modèle MINLP_AR_Cp(T) permet de tenir compte des variations des caractéristiques de l'eau en fonction de la température sur une gamme 0-150°C, ce qui introduit de nouvelles non-linéarités. **Un tel modèle avec les caractéristiques de l'eau fonction de la température est justifié dès lors que les régimes de températures des consommateurs sont différents, que l'on cherche à approvisionner les consommateurs en cascade ou que la valorisation de chaleur fatale est souhaitée sur une large gamme de température (30-150°C)**.
 - Le modèle MINLP_aller_Cp(T) possède une formulation différente, ne forçant pas les canalisations à être aller et retour dans une même tranchée. Un tel modèle permet d'étudier le potentiel des réseaux bouclés en cascade. Les résultats permettent d'affirmer qu'un **réseau bouclé est rentable que dans les zones urbaines peu denses (coût de la tranchée inférieure ou égale à 300€/m)**. Une analyse de sensibilité a également été menée avec le niveau de performance de l'isolant et du niveau de température.

L'approvisionnement en cascade de température est toujours optimal, dès lors qu'une différence de régime de température entre consommateurs est présente. La cascade de température permet de diminuer d'un palier supplémentaire les pertes thermiques par rapport à une solution optimisée (approvisionnement classique en parallèle), l'économie en coût global est minime (-0,2%), mais c'est une comparaison par rapport à une solution dont l'équilibre perte thermique - perte de charge a déjà été optimisé.

Résultats cas 2 à 5 : intégration d'EnR&R sur le consommateur éloigné

Quatre cas d'étude ont permis d'étudier l'intégration d'EnR&R localisée sur le lieu du consommateur éloigné (3 fois plus loin des autres consommateurs).

- Le cas 2 s'intéresse aux variations du coût global d'un RCU entièrement basé sur l'énergie fossile. **Suivant un scénario optimiste, classique ou pessimiste** (de l'investissement, du coût de fonctionnement ou de l'inflation du cours de l'énergie fossile p. ex. du gaz), **le coût global du RCU peut doubler à l'horizon de 30 ans (entre 22 et 44 M€)**. Nous prendrons un cas de référence 100% fossile plutôt optimiste qui chiffre le RCU à 26 M€. (solution optimisée)

- Au contraire, l'intégration d'une EnR&R est très souvent optimale, car elle permet de mieux maîtriser les factures énergétiques.
 - Dans le cas 3, le potentiel de valorisation d'EnR&R est limité à 90% du consommateur éloigné C4 et l'appoint fossile n'est pas autorisé. Dans cet exemple, une production décentralisée basée sur l'introduction d'EnR&R est optimale et ceci dès 10 ans. A l'horizon de 30ans, le coût global de la référence EnR&R est de 23 M€ (réduction de - 12%) par rapport à la référence 100% fossile.
 - Dans le cas 4, dès qu'un appoint fossile est disponible, la réduction du coût global est d'autant plus importante, car C4 est approvisionné de manière isolée du réseau principal. Cette solution est rentable tant que l'investissement de l'EnR&R n'est pas prohibitif (environ 4 fois plus cher que l'investissement de l'énergie fossile). A la référence EnR&R, le coût global est de 22 M€, soit une réduction 14%.
 - Dans le cas 5, avec un grand potentiel de valorisation de chaleur fatale, celle-ci est toujours valorisée (jusqu'à 55% de réduction du coût global à la référence EnR&R) si elle n'est pas trop éloignée (inférieur à 5x plus loin).

Résultats cas 6 : Comparaison avec un réseau existant

Le cas 6 est une étude comparative entre les résultats de l'optimisation avec la conception effective d'un RCU existant P1k1C7. Par exemple de comparaison, le dimensionnement optimal de la puissance fossile à installer est conforme à l'ordre de grandeur de puissance réellement installée (600 kW). Des analyses similaires d'intégration d'EnR&R permettent d'envisager la sécurisation de l'approvisionnement énergétique sur ce réseau. Pour le consommateur éloigné, l'approvisionnement isolé avec l'introduction de 90% d'EnR&R dans son mix permettrait d'économiser 13% du coût global. Si un potentiel de chaleur fatale est disponible au consommateur isolé, sa valorisation conduit à une solution optimale réduisant le coût global de 55%.

Résultats cas 7 et 8 : Optimisation de RCU de tailles conséquentes

Pour confirmer l'application de notre méthode sur des quartiers de tailles conséquentes, 2 cas supplémentaires sont étudiés, sur un quartier jusqu'à 19 consommateurs. Le passage d'une taille de problème académique à une taille conséquente (longueur de réseau supérieur à 2 km et puissance totale installée d'environ 1,5 kW) est facilité grâce à la méthode de résolution mise en place section 3.3. La méthode de résolution en plusieurs étapes a nécessité plus de 200 résolutions différentes, ce qui a nécessité environ 40 min de temps de calcul sur le cas 8 (processeur Intel i5 2,60 GHz et 4 Go de RAM), un cas admettant plus de 20 000 variables et 30 000 contraintes (égalités ou inégalités).

- L'intérêt du cas 7 est d'étudier l'optimisation du maillage de réseau, mais ne s'intéresse pas à l'aide aux choix des technologies de production (une seule renseignée en données d'entrée). Le dimensionnement est optimisé, mais il est très peu commenté.
- Le cas 8 est une étude similaire d'intégration d'EnR&R sur une échelle de réseau conséquente. Des réductions significatives (plus de 60% à l'horizon 30 ans) sont atteignables.

Ces 2 derniers cas sont étudiés aussi bien en création ex-nihilo (tout le réseau est créé en même temps ou par phasage) ou alors en extension du réseau existant sur le sous-quartier (C1C7) sur tout le quartier (C1C19). En extension de réseau, les réductions sont très légèrement moindres (de quelques %) par rapport à la création, mais la valorisation de chaleur fatale est toujours optimale et permet de réduire le coût global d'environ 60%. La technologie fossile est abandonnée, malgré le fait que son investissement soit déjà amorti.

PERSPECTIVES

Ces travaux sont amenés à être complétés, notamment selon 5 axes : des évolutions de la formulation (court et long terme), un souhait d'interaction avec une interface graphique, le transfert sur le marché des RCU, des études sur les synergies et l'aide à la gestion.

1 - Évolution de la formulation

Nous avons identifié à court terme des évolutions souhaitables pour notre formulation du problème :

- Proposer de gérer les nœuds bifurcation avec indice, pour ne pas les contraindre à exister.
- Proposer une potentielle technologie de production en cascade :
 - en appont (p. ex. basée sur du gaz) disposée dans chaque nœud producteur entre l'intersection H et I de la superstructure (Figure 2-11)
 - ou en rehausse (p. ex. basée sur la technologie d'une pompe à chaleur) disponible dans chaque nœud consommateur entre l'intersection A et B de la superstructure (Figure 2-9).
- Compléter le calcul sur les pertes de charge, notamment les pertes spécifiques calculées dans les échangeurs de chaleur (au lieu de fixer à 20 kPa de manière unitaire, sans tenir compte du dimensionnement de l'échangeur), ainsi que d'ajouter à la prise en compte des pertes de charge linéaires, considérées uniquement en régime turbulent lisse, un terme pour le régime turbulent rugueux. Proposer un coût d'investissement sur le choix des pompes de circulation.
- Calculer le coefficient de transfert thermique convectif à l'intérieur d'une canalisation et de vérifier la pertinence de ne pas le prendre en compte finement dans la formulation
- Ajouter des contraintes (p. ex. >50% EnR&R pour satisfaire le prérequis pour être éligible au fonds de chaleur ou une limite en émission < 50 gCO₂/kWh)
- Introduire des variables liées et discrètes pour le diamètre intérieur, l'épaisseur de la canalisation et l'épaisseur d'isolant, car actuellement la conception optimale ne tombe pas sur des canalisations disponibles sur le marché.

À moyen terme, il pourrait être envisagé d'avoir :

- Différents trajets entre 2 nœuds et/ou l'obligation de suivre le tracé de la voirie (dès lors qu'une interface graphique est disponible).
- Le choix entre des échangeurs à plaques (opérationnel dans cette formulation), d'autres types d'échangeurs et surtout des bouteilles casse-pression (afin de pouvoir étudier l'extension de réseau existant plus précisément).
- Un modèle pour les réseaux fonctionnant à la vapeur, sur tout ou en partie du réseau.
- Une étape supplémentaire dans la stratégie de résolution globale, afin d'aider à la conception de la superstructure avec des heuristiques ou des méthodes thermodynamique (p. ex. la méthode du pincement).

A plus long terme, il serait intéressant de proposer des **axes de réflexions pour la prise en compte de potentiels lieux de stockage et leurs dimensionnements**. Mais avant de pouvoir intégrer le stockage dans ces travaux, il faudrait réussir à résoudre un problème **MINLP multipériode** appliquée au RCU.

2 - Interface graphique

Afin de faciliter l'analyse de l'expert, il serait souhaitable d'avoir une interface graphique pour renseigner les données d'entrée et surtout pour analyser plus facilement les configurations optimales de RCU. En interface d'entrée, il serait possible de récupérer à partir d'un curseur les localisations spatiales des nœuds (consommateurs, producteurs potentiels et bifurcations éventuelles). Le coût des tranchées pourraient être paramétré (p. ex. selon le passage en vide sanitaire, en voirie, sous un pont ou encore impossible). En données de sortie, l'analyse pourrait représenter la configuration optimale. Les alternatives structurelles seraient ainsi beaucoup plus facilement exploitables pour les analyses par l'expert. De plus, celui-ci pourrait choisir de visualiser sur le tracé du réseau des caractéristiques de dimensionnement (vitesse, diamètre ou température).

3 - Confrontation et transfert sur le marché

Dans le cadre du projet THERMENERGY, des partenariats avec d'autres acteurs de RCU sont envisagés. Ceci notamment pour consolider les bases de données économiques (investissement, facture énergétique, inflation, etc.) et introduire des coûts de maintenance et de gros renouvellement (afin de prendre en compte une durée d'amortissement différente suivant les équipements). Cette base de données économiques est à mettre en relation avec des considérations techniques (p. ex. Capex, Opex, maintenance d'une chaudière en fonction du type d'énergie, du rendement ainsi que de la gamme de température et de puissance) et des considérations environnementales (émission de gaz à effet de serre). L'exemple de la chaudière a été pris, mais il est à compléter avec l'échangeur de chaleur (Capex_hx_unit relié à K_hx et DP_hx) ou encore le prix des tranchées (suivant le type de terrain, la mutualisation possible des travaux, le type de canalisation et leur pose).

L'application de cette méthode d'aide à la conception optimale de RCU va être développée dans une offre de prestation d'assistance à maîtrise d'ouvrage. La méthodologie globale du projet THERMENERGY, dans lequel sont intégrés les travaux de thèse à NOBATEK, peut être illustrée par 3 briques (Figure 4-33). Les résultats de structure et de dimensionnement optimaux sont obtenus avec l'outil développé dans ces travaux de thèse (nommé ODHeaN) qui s'inscrit dans une démarche globale. Ainsi le problème d'optimisation est complémentaire aux deux autres briques développées dans le cadre du projet Thermenergy :

- En amont de l'optimisation, un travail de prétraitement des appels de puissance, déterminés avec CHAMAN, permet d'évaluer un besoin nominal par sous-station avec un coefficient de capacité (pour le relier à la puissance à saisir par l'échangeur en sous-station) et un facteur de simultanéité (pour tenir compte de l'effet de foisonnement à l'échelle du réseau).
- En aval, une modélisation dynamique du réseau, avec MoDH, permet de valider les choix, notamment en fin de réseau pour saisir les derniers consommateurs et dans les périodes de pics d'appels de puissance. Un tel outil peut également évoluer pour l'aider à leur gestion.

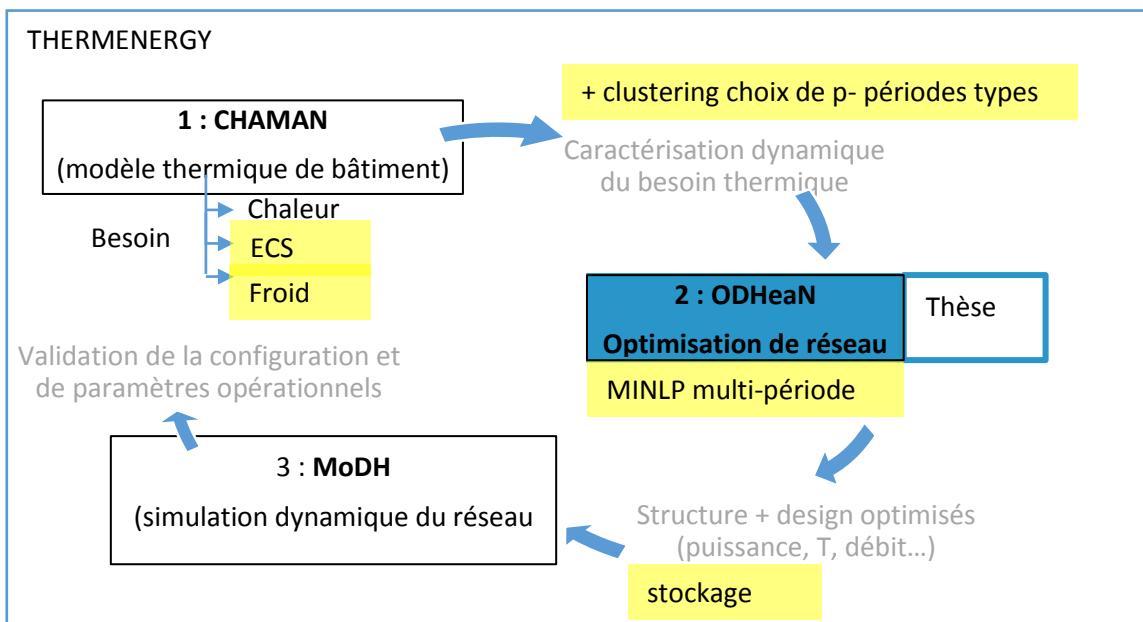


Figure 4-33 Intégration des travaux de thèse dans les diverses briques de développement du projet THERMENERGY, fonction principale, possible association méthodologique et perspectives envisagées (en jaune)

De plus, il faudra prévoir une comparaison entre l'approvisionnement de chaleur individuel, par exemple une chaudière gaz avec éventuellement une EnR&R en complément, mais dont le financement est assuré par le particulier, ce qui peut lui poser une difficulté, et aussi dont le dimensionnement doit être prévu inférieure à celui de l'intégration dans le réseau (du fait qu'aucun facteur de simultanéité ne peut être pris en compte). Afin de pouvoir comparer au marché, il faudra utiliser une nomenclature de type dépense de fonctionnement (l'énergie consommée P1, l'entretien P2 et la maintenance P3) ainsi que l'amortissement des installations P4.

4- Diversifier la mixité d'usage

Les études d'aménagement de quartier gagneraient à être réfléchies de manière à renforcer la mixité d'usage. En effet, il est avantageux de diversifier les usages (résidentiel, tertiaire et industriel) pour répondre à des services sur un quartier (en limitant les transports, les congestions et la pollution), mais également pour réduire les pics d'appel de puissance.

De plus, les besoins (chaleur, mobilité, électricité spécifique) pourraient être réfléchis en synergie, dès la conception du quartier, ceci d'autant plus dans le cadre de quartier à énergie positive. Ou encore de proposer des axes de réflexions pour l'intégration énergétique des transports (collectif ou individuel), jouant le rôle de stockage, avec des transports fonctionnant à l'électricité ou au gaz.

5 - Optimisation de la gestion des RCU

Concernant les perspectives du projet THERMENERGY, il serait pertinent de développer la 3^{ème} brique (Figure 4-33) de simulation dynamique de RCU pour aider à leur gestion. Une perspective à long terme serait de compléter cette méthodologie globale par une 4^{ème} brique d'optimisation dynamique. Ainsi, à configuration et dimensionnement fixés, il serait possible d'aider à leur gestion en fonction des fluctuations de la demande énergétique (dépendance au climat et à l'occupation des usagers), mais aussi pourquoi pas de la tarification de l'énergie sur le marché. Des axes de réflexions pourraient être ajoutés également sur l'effacement (volontaire ou incité) des consommateurs. Ceci pourrait être réalisé en maximisant l'intégration d'EnR&R ou minimisant le prix de l'énergie, tout en garantissant le confort des usagers.

Chapitre 5. ANNEXES

Annexe A	Liste des valeurs des données d'entrées.....	ii
A.1	Général	ii
A.2	Producteur	ii
A.3	Consommateur.....	ii
A.4	Canalisation	iii
Annexe B	Propriétés physique de l'eau.....	iv
B.1	Modèle aux caractéristiques de l'eau constantes sur la plage 60-100°C.....	iv
B.2	Modèle aux caractéristiques de l'eau dépendantes de la température sur la plage 30-150°C.....	v
Annexe C	Pertes thermiques	vii
Annexe D	Pertes de charge.....	ix
Annexe E	Comparaison en coût global CCG	x
Annexe F	Les options utilisées	xii

ANNEXE A LISTE DES VALEURS DES DONNEES D'ENTREES

A.1 GENERAL

period	8760 h (soit une année)	heure
annee	30 ans au maximum pour l'amortissement, souvent 15 ans	an
Text	15 °C	°C
rate_a	4 %	-
rate_i(k)	4 % gaz, 0 % solaire	-
rate_i_pump	4 %	
Cp	4,196 (à 80 °C)	kJ/(kg.K)
Cp _{prod(T)}	paramètre interpolation Cp ₀ = 4,1865, Cp ₁ =-0,0002 ; Cp ₂ =0,000001 et Cp ₃ =0,0000004	
μ	0,000354 (à 80 °C)	Pa.s
μ(T)	μ ₀ = 1 386,5 ; μ ₁ = -23,178 ; μ ₂ = 0,1548 et μ ₃ = -0,0004	
ρ	974 (à 80 °C)	kg/m ³
ρ(T)	ρ ₀ = 1 004,2 ; ρ ₁ = -0,2159 et ρ ₂ = -0,0024	
λ_insul	0,03	W/(m.K)
λ_soil	1,4	
Psat(T)	Psat ₀ = -68,085 ; Psat ₁ = 4,3368 ; Psat ₂ = -0,0731 ; Psat ₃ = 0,0005	

A.2 PRODUCTEUR

Opex _{heat_unit} (k)	entre 1-4 ct€/kWh pour les EnR&R et 4-8 ct€/kWh pour le gaz	€/kWh
Opex _{pump_unit} (k)	11 ct€/kWh pour l'électricité	
Capex _{Hprod_unit} (k)	entre 0 (si l'unité existe déjà, valorisation chaleur fatale) à 1 200, voir 2 000 €/kW	€/kW
T _{prod_out_max}	100	°C
T _{prod_in_min}	30	°C
Eff(k)	90	%
N_k_princ	1	-
N_P_princ	1	-
H_inst_RES_min	50	%

A.3 CONSOMMATEUR

H _{req_j}	80	kW
T _{req-in_j}	MT 50 (ou respectivement BT 30, HT 70 ou THT 90)	°C
T _{req-out_j}	MT 70 (ou respectivement BT 50, HT 90, THT 110)	
Capex _{hxunita}	5,3	€/kW
Capex _{hxunitb}	5 045	€
K _{hx}	2 000	kW/(m ² .K)
T _{hx_pinch}	10	°C
D _{P hxunit}	20	kPa

A.4 CANALISATION

$tk_{pipe_{i,j}}$	0,003	m
$tk_{insul_{i,j}}$	0,03	m
α	2,25	
β	-0,75	
$\text{Capex}_{\text{pipe_unit}} a$	0,3722	$\text{€}/\text{m}^2$
$\text{Capex}_{\text{pipe_unit}} b$	12,48	€
$\text{Capex}_{\text{tr_unit}}$	300 – 1300	$\text{€}/\text{m}$

ANNEXE B**PROPRIETES PHYSIQUE DE L'EAU*****B.1 MODELE AUX CARACTERISTIQUES DE L'EAU CONSTANTES SUR LA PLAGE 60-100°C***

Par faciliter la formulation du problème d'optimisation dans certains modèles « simplifiés » d'optimisation (sous-section 3.4.1), les propriétés physiques de l'eau sont prises constantes (Hypothèse# 2) sur une gamme de température classique pour les RCU (60-100 °C). Les propriétés estimées constante sont prises à la valeur moyenne de 80°C. Les écarts des propriétés de l'eau par rapport à valeurs prises à 80°C sont reportés dans le Tableau 5-1.

Cette hypothèse est valable pour la capacité thermique massique, les valeurs varient de 4 178 à 4 216 (J/kg.K) entre 30 et 100 °C, l'écart relatif est faible (0,4 %). Cet écart se reporte sur le bilan des puissances échangées et le calcul des pertes thermiques. Cette hypothèse est également valable pour la masse volumique.

Cette hypothèse est d'autant plus grande (écart relatif jusqu'à 31% à +/- 20°C autour de 80°C) pour la viscosité dynamique de l'eau (Figure 5-4). Cette hypothèse est réalisée dans tous les travaux, sauf par (RAMOS BERMUDEZ 2007) qui prend une fonction linéaire pour la viscosité dynamique de l'eau.

L'écart à la pression de vapeur saturante est certes du simple au double, mais étant donné que la température reste sous 100°C sur cette plage considérée (60-100°C), étant supérieure à la pression atmosphérique, il n'y a pas de risque de cavitation (pas de passage de l'état liquide à l'état gazeux). Ce qui n'est plus justifié au-delà de 100°C, comme constatée Figure 5-1.

Tableau 5-1 Propriété de l'eau à saturation (LEMMON et al.) et vérification de l'Hypothèse# 2 en calculant l'écart aux propriétés de l'eau prises à la température 80°C

T (°C)	P _{sat}		ρ		Cp		μ		Re	
	(kPa)	écart	(kg/m ³)	écart	(J/kg.K)	écart	(10 ⁻⁶ .Pa.s)	écart	min	max
30	4,2	-91%	995	2%	4180	-0,4%	797	125%	2341	799
60	19	-58%	983	1%	4185	-0,3%	466	32%	3953	1349
80	47	-	971	-	4197	-	354	-	5142	1755
100	101	114%	958	-1%	4216	0,4%	281	-20%	6378	2177
130	270	470%	934	-4%	4262	1,5%	212	-40%	8233	2810
150	476	904%	917	-6%	4307	2,6%	182	-49%	9423	3217

Dans le Tableau 5-1, il a également été vérifié que le nombre de Reynolds trouvé permet de se placer toujours en régime turbulent. Et ceci quelles que soient les propriétés physiques de l'eau dépendant de la température et pour les conditions les plus défavorables à l'établissement d'un régime turbulent (vitesse minimale à 0,1 m/s et diamètre maximal à 160 mm). Pour le calcul du nombre de Reynolds minimum, la vitesse maximale a été prise à 3 m/s et le diamètre minimal à 50mm.

B.2 MODELE AUX CARACTERISTIQUES DE L'EAU DEPENDANTES DE LA TEMPERATURE SUR LA PLAGE 30-150°C

Ainsi, dès que l'on s'éloigne de la plage (60-100°C), ces approximations ne sont plus valables pour une plage de variation étendue jusqu'à 150 °C pour le calcul de la pression de vapeur saturante (Figure 5-1), les interpolations polynomiales ont été réalisées à partir de la base de données (LEMMON *et al.*)

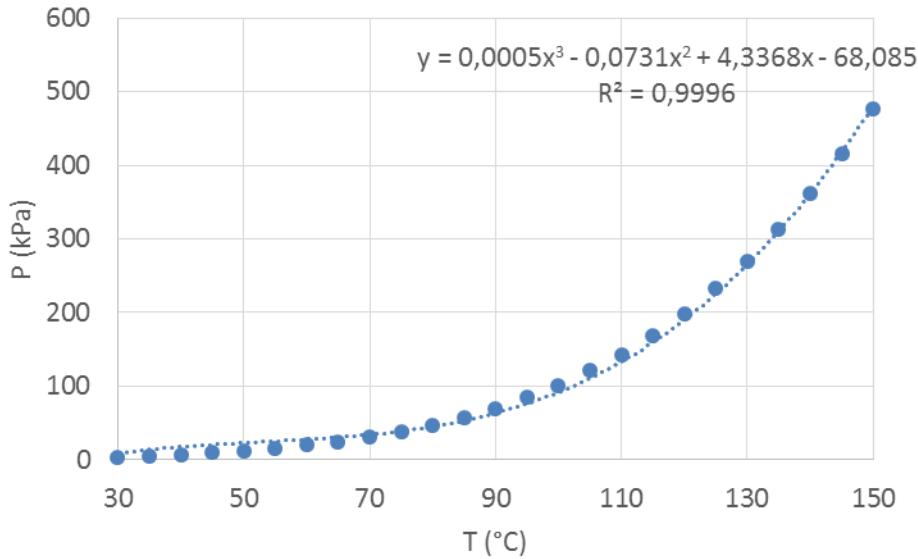


Figure 5-1 Dépendance à la température de la pression de vapeur saturante

La gamme a également été étendu jusqu'à 30°C, afin de pouvoir travailler sur des réseaux basse température. Ainsi, la dépendance à la température de la viscosité (Figure 5-2) a également été prise en compte dans ce modèle plus détaillé, même si au-delà de 80°C elle aurait pu être approximée constante.

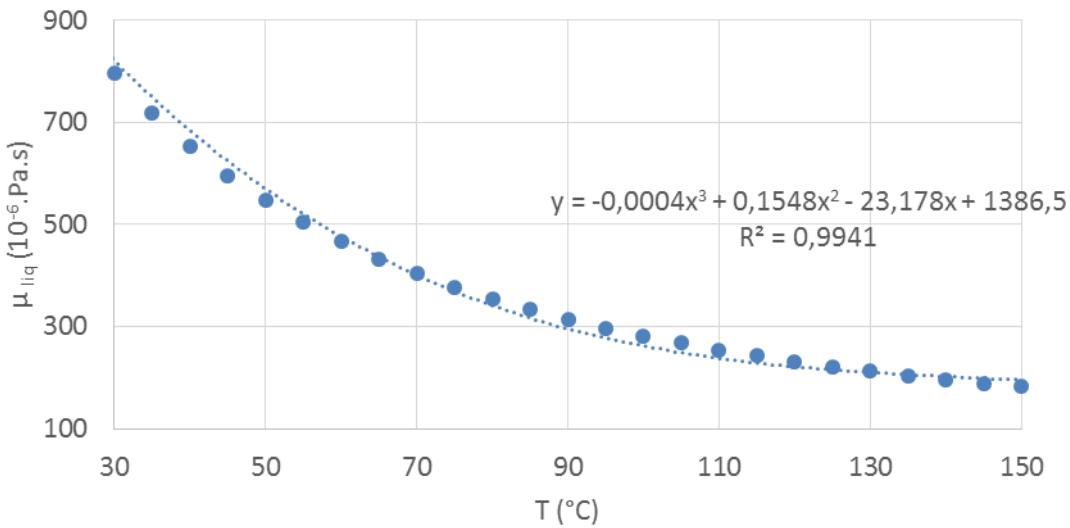


Figure 5-2 Dépendance à la température de la masse volumique (μ) de l'eau liquide

La dépendance à la température pour la capacité thermique massique (Figure 5-3) a été prise en compte dans le calcul de la puissance à installer [Eq 2-33].

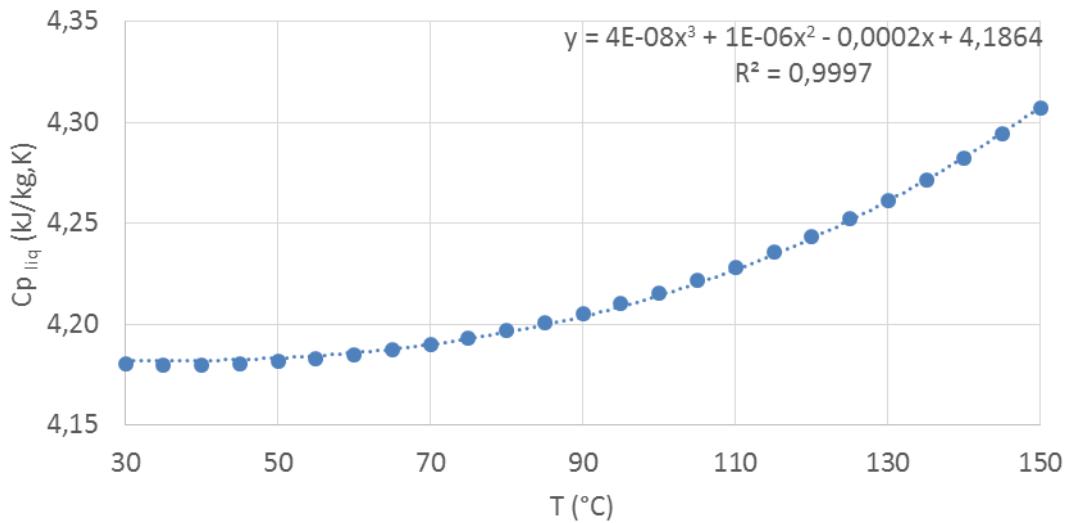


Figure 5-3 Dépendance à la température de la capacité thermique massique de l'eau liquide

La dépendance à la température a été prise ne compte dans l'expression de gamma pour le calcul des pertes de charge [Eq 2-51]. Cela ne complexifie pas outre mesure la formulation, étant donné que gamma dépend déjà de la température avec la viscosité dynamique. Par contre, nous avons toujours considéré une masse volumique constante dans le calcul des coûts de pompage [Eq 2-62], car il n'est pas nécessaire d'apporter plus de précision à un coût qui représente moins de 1% du coût total du réseau.

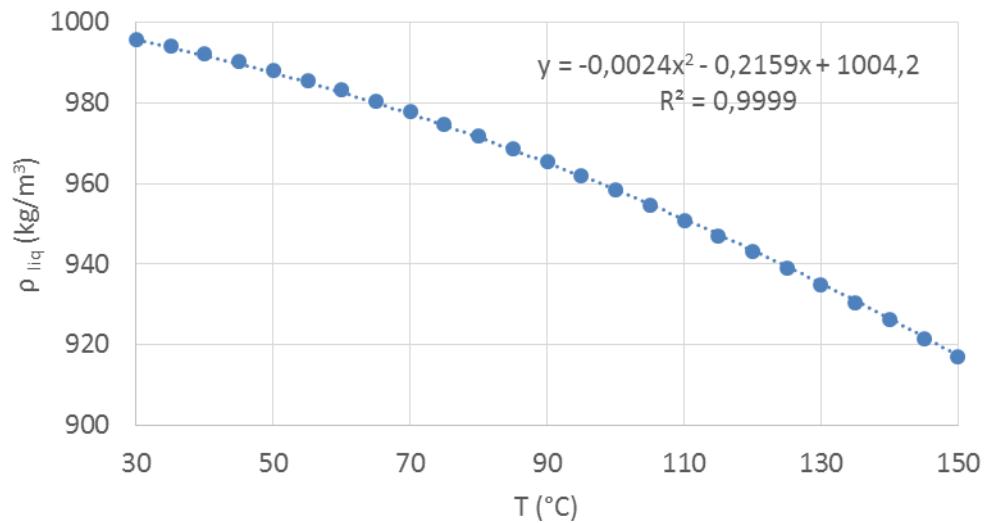
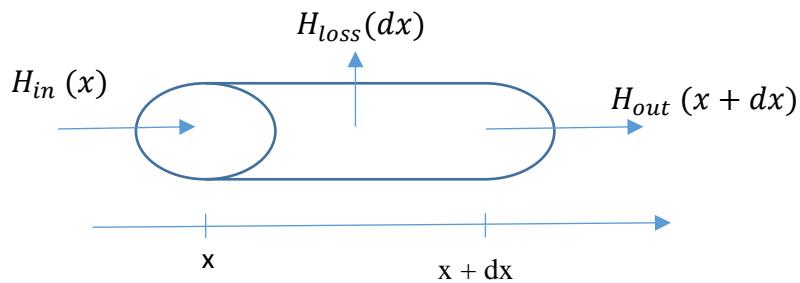


Figure 5-4 Dépendance à la température de la masse volumique de l'eau liquide

ANNEXE C PERTES THERMIQUES



[Figure 5-5 Schéma d'une tranche élémentaire de canalisation pour l'écriture de bilan](#)

La loi de conservation de l'énergie pour un système ouvert sur une tranche de canalisation (Figure 5-5) peut s'écrire [Eq 5-1].

$\forall x \in [0; L]$	$\frac{\partial E}{\partial t} = H_{in}(x) - H_{loss}(dx) - H_{out}(x+dx)$	Eq 5-1
------------------------	--	------------------------

En régime permanent, on obtient la conservation des flux : les flux entrants sont égaux aux flux sortants, l'équation [Eq 5-1] se simplifie pour donner l'équation [Eq 5-2] :

$\forall x \in [0; L]$	$H_{in}(x) = H_{loss}(dx) + H_{out}(x+dx)$	Eq 5-2
------------------------	--	------------------------

Les flux entrant et sortant peuvent s'écrire de manière suivante [Eq 5-3], lorsque l'on prend comme hypothèse que la capacité thermique massique de l'eau est considérée comme constante et avec des enthalpies de référence nulle à l'état de référence (liquide à 0°C).

$\forall x \in [0; L]$	$H_{in}(x) = \dot{m} \cdot c_p \cdot T(x)$ $H_{out}(x+dx) = \dot{m} \cdot c_p \cdot T(x+dx)$	Eq 5-3
------------------------	---	------------------------

Hypothèse :

- écoulement piston : la température ne dépend pas du rayon de la canalisation. L'hypothèse d'une température moyenne $T_M(x)$ sur la section est vérifiée, car le nombre de Reynolds est nettement supérieur à 2 000, ce qui correspond bien à un régime d'écoulement turbulent.
- Les phases transitoires sont négligées. En effet, on obtient une longueur d'établissement thermique avec l'équation [Eq 5-4] de l'ordre d'un mètre. Ce qui est bien négligeable devant les kilomètres de canalisation.

$\forall x \in [0; L]$	$L_{th} = 0,05 \cdot Re \cdot D \cdot Pr$	Eq 5-4
------------------------	---	------------------------

- la capacité thermique massique ne dépend pas de la température sur une tranche élémentaire. De même les variations entre l'entrée chaude et la sortie ne sont pas significatives. L'Annexe B vérifie cette hypothèse sur une plage de 40°C (entre 60 et 100°C), donc cette hypothèse est aussi valable entre la température à l'entrée d'une canalisation et celle diminuée (à cause des pertes) en sortie.

Les pertes thermiques d'une canalisation peuvent être calculées par l'équation suivante [Eq 5-5]. En effet, en régime permanent il y a égalité des flux : le flux transmis du fluide à l'acier, de l'acier à l'isolant, de l'isolant à la terre et de la terre à l'air ambiant sont égaux.

$\forall x \in [0; L]$	$H_{loss}(dx) = \pi D_{out} \cdot \frac{(T(x) - T_{ext})}{R_{tot}} \cdot dx$	Eq 5-5
------------------------	--	------------------------

Hypothèse :

- la résistance thermique globale R_{tot} ($m^2.K/W$) est calculée en régime permanent par analogie avec les résistances électriques.
- On s'appuie sur les travaux (COMAKLI et al. 2004) pour justifier le fait qu'on néglige la résistance thermique de l'acier. Cette hypothèse est confirmée par (FREDERIKSEN et WERNER 2013). Ces derniers ajoutent également que la résistance due aux échanges convectifs entre l'eau à l'intérieur de la canalisation et l'acier, ainsi que la résistance de convection entre la terre et l'air extérieur, sont négligeables.
- Il a été vérifié que la résistance convective interne est bien négligeable en calculant le nombre de Nusselt avec la corrélation de Dittus-Boelter. Cette corrélation est valide en régime d'écoulement turbulent, ce qui peut discutable sur certains tronçons du réseau, d'où les travaux en perspective. L'intérêt d'une telle corrélation est de prendre en compte que c'est un refroidissement ($N=0,0265$ et $n=0,8$).

$\forall Re \in [2\ 000; 100\ 000]$ $\forall Pr \in [0,7; 160]$ $L/d >> 10$	$Nu = N \cdot Re^n \cdot Pr^n$	Eq 5-6
---	--------------------------------	------------------------

Le calcul des résistances thermiques est détaillé dans (FREDERIKSEN et WERNER 2013) page 79. Deux principaux termes interviennent dans la résistance thermique globale [Eq 2-47] lors du calcul des pertes thermiques sur une canalisation : la résistance thermique de l'isolant $R_{insulat}$ calculé d'après [Eq 2-45] et celle de l'isolation du sol R_{soil} [Eq 2-46]. Les résistances thermiques sont représentées sur le schéma d'une canalisation (Figure 2-13).

Une troisième résistance thermique $R_{influence}$ est nécessaire pour tenir compte de l'influence entre deux canalisations enterrées côté à côté [Eq 5-7]. Cette dernière traduit le fait qu'il y a moins de perte thermique à la canalisation retour du fait que la canalisation aller a déjà réchauffé le sol et vice versa. C'est une relation approximative, sinon dans le détail d'une simulation 2D, se référer à (DALLA ROSA et al. 2010). Mais elle ne sera pas prise en compte dans le problème d'optimisation. En effet d'après des calculs réalisés, cette résistance est de 3^{ème} importance, après la résistance thermique de l'isolant et celle du sol. Ceci représente, pour une bonne isolation (entre 35 et 45 mm pour des diamètres intérieurs de 25 à 160 mm, exemple canalisation RAUTHERMEX UNO SDR 11) seulement 5 % de la résistance totale, mais pour des canalisations de même diamètre moins bien isolé (« seulement » 10 mm) elle peut augmenter jusqu'à 15 %. Si, comme dans notre cas, la canalisation peut parfois n'être que aller, cette résistance n'a pas lieu d'être. Par souci de simplification numérique et puisque désormais en conception de réseau une épaisseur d'isolant conséquente est la règle, **cette résistance d'influence entre canalisations est négligé dans notre problème d'optimisation**.

Les résistances thermiques de convection interne ou externe ainsi que la résistance thermique de l'acier sont négligeables. Elles ne représentent moins de 1 % de la résistance thermique totale. Pour information, la résistance thermique de l'isolant est la plus importante (environ 85-90 %).

	$R_{influencePC(i,j)} = \frac{D_{intPC(i,j)}}{2 \lambda_{insul}} \cdot \ln \left(\left(\left(\frac{2 \cdot z_{pipe}}{\Delta x_{pipe}} \right)^2 + 1 \right)^{0,5} \right)$	Eq 5-7
--	---	------------------------

En combinant [Eq 5-2 ; Eq 5-3 et Eq 5-5], une équation différentielle du 1^{er} ordre est obtenue [Eq 5-8].

$\forall x \in [0; L]$	$\frac{dT}{dx} + \frac{\pi D_{out}}{R_{tot} \dot{m} c_p} T(x) = - \frac{\pi D_{out}}{R_{tot} \dot{m} c_p} T_{ext}$	Eq 5-8
------------------------	--	------------------------

La résolution de cette équation différentielle permet d'obtenir la température de sortie ($x=L$) en fonction de la température en entrée [Eq 5-9].

	$\frac{T_{out} - T_{ext}}{T_{in} - T_{ext}} = \exp^{-\frac{\pi D_{out} L}{R_{tot} \dot{m} c_p}}$	Eq 5-9
--	--	------------------------

ANNEXE D PERTES DE CHARGE

Le calcul des pertes de charge est nécessaire afin de pouvoir calculer le coût de pompage. La puissance de pompage (en W) est proportionnelle à la perte de charge (en Pa) et au débit massique (en kg/s) et inversement proportionnel à la masse volumique (en kg/m³) comme décrit par l'équation [Eq 5-10]. La puissance est bien exprimée en W, soit en unité SI en kg.m².s⁻³. De telles équations doivent être écrites pour les canalisations PC, CP, CC_{parallel}, CC_{series} et CC_{return}.

$\forall j \in \{1, n_C\}$ $\forall i \in \{1, n_P\}$	$H_{pump_{ij}} = DP_{ij} \cdot \frac{1}{\rho} M_{ij}$	Eq 5-10
--	---	-------------------------

Les pertes de charge correspondent à la fois aux pertes de charge linéaires, mais aussi à celles singulières, comme proposées dans l'étude dynamique d'un réseau de chaleur (KUOSA *et al.* 2014). Les pertes de charge singulières, correspondant aux pertes de charge dans des organes tels que des coudes, des vannes ou des élargissements de conduites dans le réseau primaire, ne sont pas calculées en détail. Un calcul détaillé serait trop long et ne permettrait pas d'obtenir des résultats plus pertinent car de tels organes ne sont pas précisément dimensionnés dans ce travail. Nous choisissons de les estimer comme représentant que 30 % des pertes de charge totale dans un réseau de distribution primaire. Ainsi l'équation [Eq 5-11] permet d'exprimer les pertes de charge globale sur une canalisation en fonction des pertes de charge linéaires sur celle-ci.

$\forall j \in \{1, n_C\}$ $\forall i \in \{1, n_P\}$	$DP_{ij} = DP_{lin_{ij}} + DP_{sing_{ij}} = \left(1 + \frac{30}{70}\right) \cdot DP_{lin_{ij}}$	Eq 5-11
--	---	-------------------------

Les pertes de charge linéaires [Eq 5-12] sont d'autant plus importantes que le coefficient de frottement, la longueur de la canalisation et la vitesse du fluide sont grands et inversement proportionnels au diamètre hydraulique.

$\forall j \in \{1, n_C\}$ $\forall i \in \{1, n_P\}$	$DP_{lin_{ij}} = f_{ij} \cdot \frac{L_{ij}}{D_{ij}} \cdot \rho \cdot \frac{\bar{v}_{ij}^2}{2}$	Eq 5-12
--	--	-------------------------

Le coefficient de frottement peut être trouvé à partir de la formule de Blasius [Eq 5-13], qui est valable pour des nombres de Reynolds compris entre 2 000 et 100 000. Ceci est vérifié la plupart du temps le cas dans un réseau de chaleur (Annexe B).

$\forall j \in \{1, n_C\}$ $\forall i \in \{1, n_P\}$	$f_{ij} = (100 \cdot Re_{ij})^{-1/4} = \left(100 \cdot \frac{\mu}{\rho \cdot v_{ij} \cdot D_{ij}}\right)^{-1/4}$	Eq 5-13
--	--	-------------------------

Ainsi en combinant ces quatre dernières équations, l'expression de la puissance de pompage s'exprime [Eq 5-14], comme dans le travail (RAMOS BERMUDEZ 2007), en fonction principalement de la longueur de la canalisation, du débit et du diamètre :

$\forall j \in \{1, n_C\}$ $\forall i \in \{1, n_P\}$	$DP_{ij} = \gamma \cdot \frac{L_{ij} \cdot V_{ij}^\alpha}{D_{ij}^\beta}$	Eq 5-14
--	--	-------------------------

Avec des paramètres calculés dans ce travail, l'identification permet d'obtenir les paramètres suivants, γ constant ou fonction de la température suivant la plage de température considérée :

$$\begin{aligned} \alpha &= 2,25 \\ \beta &= 0,75 \\ \gamma &= \frac{100}{70} \cdot \frac{(100\mu)^{-0,25}}{2 \cdot \rho^{-1,25}} \end{aligned}$$

ANNEXE E COMPARAISON EN COUT GLOBAL CCG

La fonction objectif considérée correspond au coût global du réseau de chaleur. Ce qui inclut à la fois l'investissement initial (capex) ainsi que les dépenses annuelles (opex) pour du combustible et de l'électricité de pompage. Les dépenses annuelles tendent à augmenter avec l'inflation du cours de l'énergie.

La fonction objectif est une considération économique mais elle tient bien compte de la physique, car dans notre modèle les pertes thermiques et les pertes de charge sont modélisées physiquement. Des indicateurs de performance relatifs à des aspects physiques (p. ex. ratio de perte thermique) sont des données de sortie de l'outil. Le coût global reste une préoccupation majeure d'un investisseur, comme le souligne (CEREMA 2014) dans leur ouvrage au titre évocateur : « Economie et finance des réseaux de chaleur : le nerf de la guerre ». Cette importance de l'aspect financier est confirmée dans la publication (GABILLET 2014) qui analyse les tensions existantes en France autour des réseaux de chaleur.

Afin de tenir compte de l'importance du temps dans les dépenses, il ne suffit pas de diviser l'investissement par la durée d'amortissement pour obtenir une annuité. En effet, 100 € aujourd'hui n'ont pas la même valeur que 100 € dans 30 ans. Lorsque l'on se place à N années, 30 ans par exemple, une somme V_N de 100 € à l'année 30 correspondent à une somme V_0 de 31 € d'aujourd'hui, d'après l'équation [Eq 5-15] avec un taux d'actualisation r_a de 0,04.

	$V_0 = V_N \cdot (1 + r_a)^{-N}$	Eq 5-15
--	----------------------------------	-------------------------

À l'inverse, si on compare une somme V_0 de 100€ à l'année de référence, dans 30 ans cette somme V_N représentera 324 €, d'après l'Eq 5-16 avec un taux d'actualisation r_a de 0,04. C'est avec cette équation [Eq 5-16] que l'investissement initial du réseau de chaleur peut être comparé avec la somme des dépenses opérationnelles à l'année N.

	$V_N = V_0 \cdot (1 + r_a)^N$	Eq 5-16
--	-------------------------------	-------------------------

Concernant les dépenses opérationnelles, le coût de la chaleur et de l'électricité de pompage, elles interviennent chaque année. De plus chaque année elles augmentent du fait de l'inflation du cours de l'énergie. C'est une hypothèse forte de l'analyse en coût global, mais c'est basé sur des prospectives issues de réflexion, d'opinions personnelles et de veilles concernant les coûts de l'approvisionnement. Notamment en France, le suivi annuel du prix de l'énergie du service de l'observation et des statistiques (SoeS 2014) peut être consulté.

Tout ceci peut se résumer au Tableau 5-2 qui sépare année par année les coûts opérationnels des coûts d'investissement. La somme des dépenses considérées à l'année N provient de la somme d'une série géométrique [Eq 5-18], avec [Eq 5-17] le format type d'une série géométrique.

	$S_N = S_o \cdot q^N$	Eq 5-17
	$\sum_0^N S_n = S_o \cdot \frac{1 - q^N}{1 - q}$	Eq 5-18

Chapitre 5 : ANNEXES

Tableau 5-2 Synthèse année par année des coûts et somme à l'année N

an	OPEX	CAPEX
0	$C_0 = B_{ch} \times C_{heat_unit}$	I_0
1	$C_1 = C_0(1+r_i)(1+r_a)$	-
2	$C_2 = C_1(1+r_i)(1+r_a) = C_0(1+r_i)^2(1+r_a)^2$	-
...		-
N	$C_N = C_0(1+r_i)^N(1+r_a)^N$	-
	$\sum C_p = C_0 \cdot \frac{1 - (1 + r_i)^N(1 + r_a)^N}{1 - (1 + r_i)(1 + r_a)}$	$\sum I_p = I_0(1 + r_a)^N$

Pour plus d'explication, il est possible de se reporter à de la norme ISO/DIS 15686-5 (MEDDE 2009), dont une synthèse illustrative est tirée (Figure 5-6). Celle-ci illustre le raisonnement de comparaison en coût global depuis les coûts d'investissement jusqu'aux coûts de déconstruction, en passant par les coûts d'exploitation, de maintenance et de remplacement. La différence avec les travaux de thèse est que la comparaison se fait en ramenant le coût global à l'année 0, or nous avons choisi d'analyse la somme des coûts à l'année N. De ce fait, il est possible de constater année après année, la part grandissante des coûts d'exploitation.

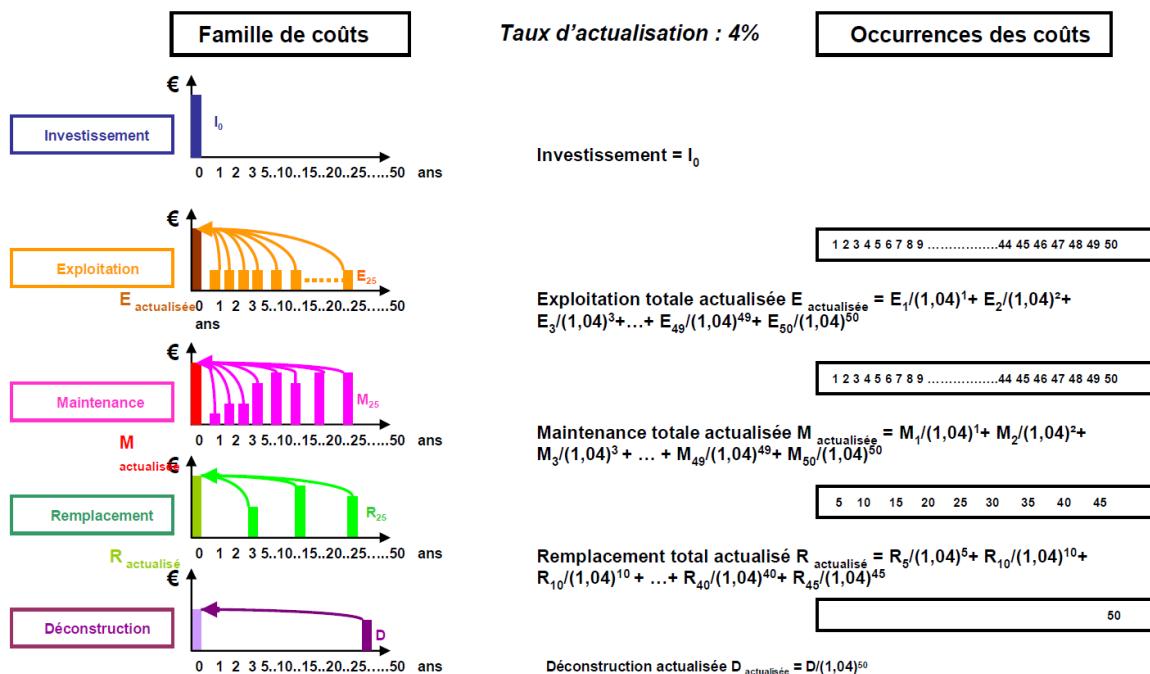


Figure 5-6 Illustration de la méthodologique de comparaison en coût global et principe d'actualisation Source : figure 11 (MEDDE 2009)

En perspective à ces travaux de thèse, il est envisagé à NOBATEK de compléter la fonction objectif actuelle avec les coûts de maintenance et de remplacement.

ANNEXE F LES OPTIONS UTILISEES

Par souci de transparence et pour pouvoir comparer le temps de calcul et de précision du résultat, les options utilisées sont détaillées dans le Tableau 5-3 pour les options génériques dans GAMS et dans le Tableau 5-4 pour les options spécifiques au solveur DICOPT.

Tableau 5-3 Liste des options générées utilisées

Option	Valeur	Description	Intérêt
<u>Option# 1 reslim</u>	100 000	Limite du temps global de résolution (en seconde, soit 7h45)	Nécessaire sur des problèmes de grandes tailles P2k3C19 (section 4.4) dans le cadre de test de minima locaux ou d'analyse de sensibilité sur de nombreux tests.
<u>Option# 2 iterlim</u>	10 000	Le nombre d'itérations cumulé du problème NLP, par défaut 2 billions	Utilisé dans le test de minima locaux ou analyse de sensibilité. Car autrement, si le problème est mal initialisé (ce qui arrive vu le nombre d'initialisations différentes), beaucoup d'itérations ont lieu, mais elles ne conduisent pas à une solution entière ou pas à de meilleures solutions (que sans cette option).
<u>Option# 3 savepoint</u>	1	Exportation des valeurs à la convergence	Possibilité d'importer les précédents résultats pour initialiser d'autres résolutions, avec la commande : execute_loadpoint 'mon_modele_p.gdx';

Tableau 5-4 Liste des options utilisées dans le solveur DICOPT

Nom option	Valeur	Description	Utilisation
<u>Option# 4 maxcycles</u>	5	nombre itération maximal du problème maître, par défaut 20	Test de minima locaux et analyse de sensibilité, si le problème est bien initialisé, classiquement moins de 5 itérations du problème maître sont suffisantes.
<u>Option# 5 infeasder</u>	1	Des linéarisations du sous-problème NLP infaisable sont ajoutées au problème maître (sinon uniquement des problèmes NLP ayant convergé pour l'option par défaut).	Analyse de sensibilité, cette option accélère la convergence, mais risque d'éliminer dans les problèmes non convexes des solutions de l'espace de recherche.
<u>Option# 6 nlp solver</u>	conopt minos conopt	Indication pour DICOPT du solveur à utiliser pour la résolution du problème primal	Il est conseillé d'alterner les solveurs lorsque le sous-problème NLP est difficile à résoudre. Le dernier solveur est utilisé pour les suivantes résolutions.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME (2013) Chiffres clés bâtiment 2012. En ligne : <http://www.ademe.fr/expertises/batiment/chiffres-cles-observations>, consulté le 9 janvier 2014.
- ADEME (2014) Alléger l'empreinte environnementale de la consommation des français en 2030. Vers une évolution profonde des modes de production et de consommation. En ligne : <http://www.ademe.fr/alleger-lempreinte-environnementale-consommation-francais-2030>, consulté le 8 mars 2016.
- ADEME (2015a) La chaleur fatale industrielle. En ligne : <http://www.ademe.fr/chaleur-fatale-industrielle>, consulté le 6 mai 2015.
- ADEME (2015b) Chiffres-clés climat, air et énergie - édition 2014. En ligne : <http://www.ademe.fr/chiffres-cles-climat-air-energie-2014>, consulté le 9 mars 2016.
- ADEME; CETE Ouest (2012) Méthode calcul Fonds Chaleur.
- ADEME; MES COURSES POUR LA PLANETE; IKEA; ILEC-PRODIMARQUES (2016) La vie Happy. Changer les comportements pour changer le monde. En ligne : <http://www.ademe.fr/vie-happy>, consulté le 15 février 2016.
- ADEME; PUCA; CSTB (2008) PREBAT - Comparaison internationale Bâtiment et Energie. C – Composants et équipements innovants, consulté le 20 avril 2012.
- AHMETOVIC, Elvis; IBRIC, Nidret; KRAVANJA, Zdravko; GROSSMANN, Ignacio (2015) Water and energy integration: A comprehensive literature review of non-isothermal water network synthesis. In : Computers & Chemical Engineering, vol. 82, p. 144–171. DOI: [10.1016/j.compchemeng.2015.06.011](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.06.011).
- AIE (2013) Diagramme de Sankey - par pays. En ligne : <http://www.iea.org/sankey/#?c=France&s=Balance>, consulté le 10 juin 2016.
- AIE (2014) Key World Energy Statistics 2014. International Energy Agency.
- AKESSON, J.; ARZEN, K.-E.; GAFVERT, M.; BERGDAHL, T.; TUMMERSCHEIT, H. (2010) Modeling and optimization with Optimica and JModelica.org—Languages and tools for solving large-scale dynamic optimization problems. In : Computers & Chemical Engineering, vol. 34, n° 11, p. 1737–1749. DOI: [10.1016/j.compchemeng.2009.11.011](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.11.011).
- ALLEN, Benoît (2010) Optimisation d'échangeurs de chaleur: Condenseur à calandre, réseau d'échangeurs de chaleur et production d'eau froide. Université de Laval, Québec.
- AMORCE (2010) Le prix de vente de la chaleur 2009. série économique RCE10. En ligne : <http://www.amorce.asso.fr/IMG/pdf/enquete-prix-chaleur2009-maj-dec2010.pdf>, consulté le 7 août 2013.
- AMORCE (2011) Réseaux de chaleur et bâtiments basse consommation : l'équation impossible ? En ligne : www.amorce.asso.fr/IMG/pdf/rce12_bbc-rc.pdf, consulté le 16 septembre 2014.
- ANCRE (2013) Scénario de l'ANCRE pour la transition énergétique. Rapport 2013. En ligne : <http://scenarios.allianceenergie.fr/res-ancre/files/Scenarios%20ANCRE%202015%20Janvier%202014.pdf>, consulté le 19 mai 2016.
- AUTIN, Batiste (2006) Les métahéuristiques en optimisation combinatoire. Mémoire examen probatoire en informatique - Arts et Métiers. Conservatoire Nationales des Arts et des Métiers Paris, consulté le 12 août 2013.

Conclusion et perspectives

- BARNETT, Jon; ADGER, W. (2007) Climate change, human security and violent conflict. In : Political Geography, vol. 26, n° 6, p. 639–655. DOI: 10.1016/j.polgeo.2007.03.003.
- BASCIOTTI, Daniele; JUDEX, Florian; POL, Olivier; SCHMIDT, Ralf-Roman (2011) Sensible Heat Storage in District Heating Networks: IRES International Renewable Energy Storage Conference. Berlin, Germany, 28 Novembre 2011.
- BASCIOTTI, Daniele; POL, Olivier (2013) A multi-energy modelling, simulation and optimization environment for urban energy infrastructure planning: IBPSA2013 International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France August 25-28. Chambéry, France, 25-28 August 2013.
- BECK, Ulrich (2014) How climate change might save the world: Metamorphosis. Wet Matter n°39, Harvard design magazine. En ligne : <http://www.harvarddesignmagazine.org/issues/39/how-climate-change-might-save-the-world-metamorphosis>, consulté le 10 avril 2016.
- BELOTTI, Pietro; Kirches, Christian; LEYFFER, Sven; Linderoth, Jeff; Luedtke, James; Mahajan, Ashutosh (2013) Mixed-integer nonlinear optimization. In : Acta Numerica, vol. 22, p. 1–131. DOI: 10.1017/S0962492913000032.
- BENONYSSON, Atli; BOHM, Benny; RAVN, Hans (1995) Operational optimization in a district heating system. In : Energy Conversion and Management, vol. 36, n° 5, p. 297–314. DOI: 10.1016/0196-8904(95)98895-T.
- BIEGLER, Lorenz; GROSSMANN, Ignacio (2004) Retrospective on optimization. In : Computers & Chemical Engineering, vol. 28, n° 8, p. 1169–1192. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2003.11.003.
- BIHOUIX, Philipe (2014) L'âge des low tech. Vers une civilisation techniquement soutenable. Edition du seuil, consulté le 8 juin 2015.
- BOHM, Benny; HA, Seung-Kyu; KIM, Won-tae; KIM, Bong-kyun; KOLJONEN, Tiina; LARSEN, Helge V.; LUCGT, Michael; PARK, Yong-soon; SIPILA, Kari; WIGBELS, Michael; WISTBACKA, Magnus (2002) Simple Models for Operational Optimisation. IEA Disctrict Heating and Cooling annexe XI, report S1. En ligne : <http://www.risoe.dk/rispubl/nei/nei-dk-4054.pdf>, consulté le 12 août 2013.
- BOIX, Marianne (2011) Optimisation multicritère de réseaux d'eau. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- BOIX, Marianne; PIBOULEAU, Luc; MONTASTRUC, Ludovic; AZZARO-PANTEL, Catherine; DOMENECH, Serge (2012) Minimizing water and energy consumptions in water and heat exchange networks. In : Applied Thermal Engineering, vol. 36, p. 442–455. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.10.062.
- BOJIC, M.; TRIFUNOVIC, N.; GUSTAFSSON, S.I (2000) Mixed 0–1 sequential linear programming optimization of heat distribution in a district-heating system. In : Energy and Buildings, vol. 32, n° 3, p. 309–317. DOI: 10.1016/S0378-7788(00)00058-X.
- BUESSLER, Sophie; WEBER, Céline (2014) Chapitre 9 : Potentiel de développement du réseau existant de chaleur urbain utilisant des énergies renouvelables et de récupération. In : G. CHRISTEN, P. HAMMAN, M. JEHLING et M. (dir.) WINTZ, coord.: Systèmes énergétiques renouvelables en France et en Allemagne. Synergies et divergences: Editions Orizons (série Des textes et des lieux).
- BUSSIECK, Michael; VIGERSKE, Stefan (2014) MINLP solver software. In : GAMS Development Corp., 1217 Potomac St, NW Washington, DC 20007, USA.
- Celsius smart city Project (2016) Celsius smart citites demonstrators : district heating to white goods. En ligne : <http://celsiuscity.eu/Demonstrator/district-heating-to-white-goods%E2%80%8B/>.
- CEREMA (2014) Economie et finance des réseaux de chaleur. Le nerf de la guerre. En ligne : <http://fr.slideshare.net/reseauxchaleur/140602-bases-economiquescerema>, consulté le 24 juin 2014.

CEREMA (2015) Carte nationale de chaleur - France. En ligne : http://reseaux-chaleur.cerema.fr/carte-nationale-de-chaleur-france?utm_content=bufferb4fb7&utm_medium=social&utm_source=linkedin.com&utm_campaign=buffer, consulté le 10 avril 2016.

CEREMA; BOURRAT, Muriel (2014) Réseaux de chaleur : bases techniques. En ligne : http://reseaux-chaleur.cerema.fr/wp-content/uploads/140513_bases-techniques-cerema.pdf, consulté le 24 juin 2014.

CESER (2012) Les filières productives liées à l'énergie en Aquitaine face à la transition énergétique. Conseil économique social et environnemental régional. En ligne : <http://www.ceser-aquitaine.fr/informations/avisrapports/rapports/2012/rapport-Energie/Rapport-energie.pdf>, consulté le 27 février 2013.

CETE (2012) réseaux de chaleur et nouveaux quartiers. En ligne : http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/120514_RAP_rdc-nouveaux-quartiers_v1-4.pdf.

CETE (2013) Guide pratique de la procédure de classement des réseaux de chaleur et de froid.

CETE Ouest (2012a) Effet de la densité et de la mixité sur la pertinence énergétique d'un réseau de chaleur. Place des réseaux de chaleur dans les nouveaux quartiers. En ligne : http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/120321_RAP_rapport_phase2.pdf, consulté le 7 août 2013.

CETE Ouest (2012b) Réseau de chaleur très basse température à sources multiples. En ligne : <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/reseau-de-chaleur-tres-basse-a874.html>, consulté le 30 août 2013.

CETE Ouest (2013) Coût d'investissement d'un réseau de chaleur : quelques repères. En ligne : <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/cout-d-investissement-d-un-reseau-a945.html>, consulté le 14 juin 2013.

CHEN, J.J.J. (1987) Comments on improvements on a replacement for the logarithmic mean. In : Chemical Engineering Science, vol. 42, n° 10, p. 2488–2489.

CHICCO, Gianfranco; MANCARELLA, Pierluigi (2009) Distributed multi-generation: A comprehensive view. In : Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, n° 3, p. 535–551. DOI: 10.1016/j.rser.2007.11.014.

CHINESE, Damiana; MENEGHETTI, Antonella (2004) Optimisation models for decision support in the development of biomass-based industrial district-heating networks in Italy. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261904001746>, consulté le 2 septembre 2013.

CNRS, Anne (2016) Les défis de la ville durable, 7 janvier 2016. En ligne : https://lejournal.cnrs.fr/articles/les-defis-de-la-ville-durable?utm_content=buffer42706&utm_medium=social&utm_source=linkedin.com&utm_campaign=buffer, consulté le 25 janvier 2016.

COMAKLI, Kemal; CAKIR, Uğur; KAYA, Mehmet; BAKIRCI, Kadir (2012) The relation of collector and storage tank size in solar heating systems. In : Energy Conversion and Management, vol. 63, p. 112–117. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.01.031.

COMAKLI, Kemal; Yüksel, Bedri; ÇOMAKLI, Ömer (2004) Evaluation of energy and exergy losses in district heating network. In : Applied Thermal Engineering, vol. 24, n° 7, p. 1009–1017. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2003.11.014.

CREM; DARMAYAN, L.; KUCHLER, F.; CUDILLEIRO, M. (2013) Identifier et planifier des réseaux thermiques à l'aide d'un SIG. In : Géomatique Expert, N°95, 2013, n° Novembre-décembre 2013.

Conclusion et perspectives

CURTI, Vinicio (1998) Modélisation et optimisation environnementales de systèmes de chauffage urbain alimentés par pompes à chaleur. Thèse EPFL, no 1776. Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne. Département de génie mécanique.

CURTI, Vinicio; FAVRAT, Daniel; Spakovský, Michael von (2000) An environmental approach for the modeling and optimization of a district heating network based on centralized and decentralized heat pumps, cogeneration and/or gas furnace. Part II: Application. In : International Journal of Thermal Sciences, vol. 39, n° 7, p. 731–741. DOI: 10.1016/S1290-0729(00)00225-8.

DALLA ROSA, A.; Li, H.; SVENDSEN, Svend (2010) Steady state heat losses in pre-insulated pipes for low-energy district heating: DHC12, The 12th International Symposium on District Heating and cooling, September 5th to September 7th, 2010, Tallinn, Estonia. Tallinn, Estonia, 5-7 September 2010.

DARNIL, Sylvain; LE ROUX, Mathieu (2005) 80 hommes pour changer le monde. Entreprendre pour la planète. JC Lattès.

DESPRES, Jacques; HADJSAID, Nouredine; CRIQUI, Patrick; NOIROT, Isabelle (2015) Modelling the impacts of variable renewable sources on the power sector: Reconsidering the typology of energy modelling tools. In : Energy, vol. 80, p. 486–495. DOI: 10.1016/j.energy.2014.12.005.

DESPRES, Jacques; MIMA, Silvana; KITOUS, Alban; CRIQUI, Patrick; HADJSAID, Nouredine; NOIROT, Isabelle (2016) Storage as a flexibility option in power systems with high shares of variable renewable energy sources: A POLES-based analysis. In : Energy Economics. DOI: 10.1016/j.eneco.2016.03.006.

DRIEA; DRIEE (2013) Note de Synthèse sur le chauffage urbain en Ile-de-France. Éléments pour la construction d'une vision partagée. En ligne : http://www.srcae-idf.fr/IMG/pdf/FICHE-COMITE-reseaux_de_chaleur_-DRIEE-DRIEA_cle8e33d1.pdf, consulté le 8 août 2013.

DRUD, Arne (2008) CONOPT solver manual. ARKI Consulting & Development, éd. Bagsvaerd, Denmark. En ligne : <https://www.gams.com/help/index.jsp?topic=%2Fgams.doc%2Fuserguides%2Fmccarl%2Fconopt.htm>.

EHP (2013) Statistic overview country by country 2013 survey. En ligne : <http://www.euroheat.org/DHC---Statistics-4.aspx>, consulté le 5 février 2014.

Enguerrand de Rochefort (2015) Xdat - A free parallel coordinates software. En ligne : <http://www.xdat.org>, consulté le 21 décembre 2015.

EYNARD, Julien (2010) Gestion optimale de l'énergie dans un procédé multi-source pour le chauffage de bâtiments. Spécialité Automatique, Traitement du Signal et Génie Informatique, Université de Perpignan Via Domitia. En ligne : http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/53/68/64/PDF/these_Julien_Eynard.pdf, consulté le 14 juin 2013.

FARHAT, Alaa; ZOUGHAIB, Assaad; EL KHOURY, Khalil (2015) A new methodology combining total site analysis with exergy analysis. In : Computers & Chemical Engineering, vol. 82, p. 216–227. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2015.07.010.

FAZLOLLAHI, Samira; BUNGENER, Stéphane; BECKER, Gwenaelle; MARECHAL, François (2014) Multi-Objectives, Multi-Period Optimization of district energy systems: I-Selection of typical operating periods. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2014.03.005.

FAZLOLLAHI, Samira; MANDEL, Pierre; BECKER, Gwenaelle; MARECHAL, Francois (2012) Methods for multi-objective investment and operating optimization of complex energy systems. In : Energy, vol. 45, n° 1, p. 12–22. DOI: 10.1016/j.energy.2012.02.046.

FREDERIKSEN, Svend; WERNER, Sven (2013) District heating & cooling. first edition. Lund : Studentlitteratur AB, Lund (Art. No 36005).

- GABILLET, Pauline (2014) Energy supply and urban planning projects: Analysing tensions around district heating provision in a French eco-district. In : Energy Policy. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.11.006.
- GNUCHTEL, Stefan; GROSS, Sebastian (2010) Free optimization tools for district heating systems: DHC12, The 12th International Symposium on District Heating and cooling, September 5th to September 7th, 2010, Tallinn, Estonia. Tallinn, Estonia, 5-7 September 2010.
- GOEBEL, Alexander; HOLLER, Stefan (2010) Cutting costs of district heating systems by using optimized laying techniques: DHC12, The 12th International Symposium on District Heating and cooling, September 5th to September 7th, 2010, Tallinn, Estonia. Tallinn, Estonia, 5-7 September 2010.
- GOMEZ, Jorge; RENEAUME, Jean-Michel; ROQUES, Michel; MEYER, Michel; MEYER, Xuan (2006) A Mixed Integer Nonlinear Programming Formulation for Optimal Design of a Catalytic Distillation Column Based on a Generic Nonequilibrium Model. In : Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 45, n° 4, p. 1373–1388. DOI: 10.1021/ie0504506.
- GROSSMANN, Ignacio (2007) Overview of mixed-integer nonlinear programming. Center for advanced process decision-making - Department of chemical engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213. En ligne : <http://egon.cheme.cmu.edu/ewo/docs/EWOMINLPGrossmann.pdf>, consulté le 28 avril 2014.
- GROSSMANN, Ignacio (2012) Advances in mathematical programming models for enterprise-wide optimization. In : Computers & Chemical Engineering, vol. 47, p. 2–18. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2012.06.038.
- GUELPA, Elisa; TORO, Claudia; SCIACOVELLI, Adriano; MELLI, Roberto; SCIUBBA, Enrico; VERDA, Vittorio (2016) Optimal operation of large district heating networks through fast fluid-dynamic simulation. In : Energy, vol. 102, p. 586–595. DOI: 10.1016/j.energy.2016.02.058.
- GUPTA, Vijay; GROSSMANN, Ignacio (2012) An Efficient Multiperiod MINLP Model for Optimal Planning of Offshore Oil and Gas Field Infrastructure. In : Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 51, n° 19, p. 6823–6840. DOI: 10.1021/ie202959w.
- HAIKARAINEN, Carl; PETTERSSON, Frank; Saxén, Henrik (2014) A model for structural and operational optimization of distributed energy systems. In : Applied Thermal Engineering, vol. 70, n° 1, p. 211–218. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.049.
- HENCHOUZ, Samuel; CHATELAN, Patrick; MARECHAL, Francois; FAVRAT, Daniel (2015) Key Energy and Technological Aspects of Three Innovative Concepts of District Energy Networks: ECOS2015 The 28th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems, june 30-july 3, 2015, Pau, France. Pau, France, june 30-july 3, 2015.
- HENON, Aurélien; DUGUE, Antoine; LAGIERE, Philippe; SEBASTIAN, Patrick (2012) Modélisation du comportement thermique dynamique des bâtiments. Un outil adapté à l'échelle patrimoniale et à la problématique de rénovation: Congrès Français de Thermique : Thermique en conditions extrêmes, 29 mai - 1er juin 2012, Bordeaux, France. En ligne : <http://hdl.handle.net/10985/6596>.
- HOHMANN, M.; WAIBEL, C.; EVINS, R.; CARMELIET, J. (2015) Multi-objective optimization of the design and operation of an energy hub for the EMPA campus: CISBAT 2015. Cleantech for smart cities & buildings from nona to urban scale. Lausanne - Switzerland, September 9-11. EPFL.
- HOLMGREN, Kristina; GEBREMEDHIN, Alemayehu (2004) Modelling a district heating system: Introduction of waste incineration, policy instruments and co-operation with an industry. In : Energy Policy, vol. 32, n° 16, p. 1807–1817. DOI: 10.1016/S0301-4215(03)00168-X.

Conclusion et perspectives

IAEA (2010) Nuclear power reactors in the world - 2010 edition. reference data series no.2. En ligne : http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/iaea-rds-2-30_web.pdf, consulté le 16 mars 2016.

IDD (2003) Modélisation et aide à la décision pour un développement durable : état de l'art perspectives. Rapport final au SPP Politique Scientifique (SPP-PS) Action de support AS/F5/01. Institut pour un Développement Durable. En ligne : http://www.belspo.be/belspo/organisation/publ/pub_ostc/AS/rAS16_fr.pdf, consulté le 27 février 2014.

IESF (2010) La cogénération : des technologies éprouvées et performantes au développement encore trop limité en France. Ingénieurs et scientifiques de France. En ligne : http://www.iesf.fr/upload/pdf/100620_cogeneration.pdf, consulté le 17 mars 2016.

IGD (2009) Charte des services publics locaux - Indicateur de performance des réseaux de chaleur et de froid. En ligne : <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/charte-des-services-publics-locaux-a509.html>, consulté le 16 septembre 2014.

INPAL ENERGY (2015) Gamme Polyuretub - acier noir. Différentes gammes isolations (standart, + ou ++). En ligne : <http://www.inpal.com/fr/Inpal-Energie-POLYURETUB-130-syst%C3%A8me-rigide-tube-acier-pr%C3%A9isol%C3%A9-gaine-PEHD-isolation-thermique-PUR.html>, consulté le 2 octobre 2015.

KALLRATH, Josef (2002) Planning and scheduling in the process industry. In : OR Spectrum, Volume 24, p. Pages 219-250.

KECEBAS, Ali; YABANOVA, İsmail (2012) Thermal monitoring and optimization of geothermal district heating systems using artificial neural network: A case study. In : Energy and Buildings, vol. 50, p. 339–346. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.04.002.

KOCIS, Gary; GROSSMANN, Ignacio (1989) A modelling and decomposition strategy for the MINLP optimization of process flowsheets. In : Computers & Chemical Engineering, Volume 13, issue 7, p. 797–819. DOI: 10.1016/0098-1354(89)85053-7.

KORAVIYOTIN, Supiluck; SIEMANOND, Kitipat (2015) Heat Exchanger Network Synthesis/Retrofit using MINLP Stage-wise Superstructure with Non-isothermal Mixing. In : Chemical engineering transactions, vol. 43.

KUOSA, Maunu; AALTO, Martin; EL HAJ ASSAD, M.; MAKIALA, Tapio; LAMPINEN, Markku; LAHDELMA, Risto (2014) Study of a district heating system with the ring network technology and plate heat exchangers in a consumer substation. In : Energy and Buildings, vol. 80, p. 276–289. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.05.016.

LE MONITEUR (2011) Batiprix 2011 - Volume 2 équipements techniques. 28e édition (volume 2).

LEMMON, E.; Mc LINDEN, M. O.; FRIEND, D. Thermophysical Properties of Fluid Systems: WebBook de Chimie NIST, Base de Données Standard de référence NIST numéro 69: P.J. Linstrom and W.G. Mallard, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD.

LEYLAND, G. (2002) Multi-objective optimisation applied to industrial energy problems. EPFL. LENI.

LI, Bao-Hong; CHANG, Chuei-Tin (2007) A Simple and Efficient Initialization Strategy for Optimizing Water-Using Network Designs. In : Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 46, n° 25, p. 8781–8786. DOI: 10.1021/ie070702y.

LIDIN, Renée (1986) Commande dynamique de réseaux de commande de chauffage urbain. Ecole des Mines de Paris.

LUND, Henrik; WERNER, Sven; WILTSHERE, Robin; SVENDSEN, Svend; THORSEN, Jan; HVELPLUND, Frede; MATHIESEN, Brian (2014) 4th Generation District Heating (4GDH). In : Energy, vol. 68, p. 1–11. DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.089.

MARGUERITE, Charlotte (2014) Modèles intégrés pour l'évaluation des actions territoriales de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Application aux réseaux de chaleur : Application aux réseaux de chaleur : HeatGrid, un modèle de simulation énergétique pour un management stratégique. Energetique, thermique, combustion, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nantes. En ligne : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01019088>.

MARGUERITE, Charlotte; BOURGES, Bernard; LACARRIERE, Bruno (2013) Application of a district heating network (DHN) model for an ex-ante evaluation to support a multi-source DH: IBPSA2013 International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France August 25-28. Chambéry, France, 25-28 August 2013.

MEDDE (2009) Calcul du Coût Global. Objectifs, méthodologie et principes d'application selon la Norme ISO/DIS 15686-5.

MENDEZ, Carlos; CERDA, Jaime; GROSSMANN, Ignacio; HARJUNKOSKI, Iiro; FAHL, Marco (2006) State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. In : Computers & Chemical Engineering, vol. 30, n° 6-7, p. 913–946. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2006.02.008.

MERTZ, Theophile; SERRA, Sylvain; HENON, Aurelien; RENEAUVE, Jean-Michel (2015) A MINLP optimization of the configuration and the design of a district heating network: academic study cases: The 28th international conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and environmental Impact of Energy Systems. ECOS. Pau - France, 29th june- 3 rd July. LaTEP.

MOLYNEAUX, A. (2002) A practical evolutionary method for the multi-objective optimisation of complex integrated energy systems including vehicle drivetrains. EPFL. LENI.

MOLYNEAUX, A.; LEYLAND, G.; FAVRAT, D. (2010) Environmental multi-objective optimisation of a district heating network considering centralized and decentralized heat pumps. In : Energy, vol. 35, n° 2, p. 751–758. DOI: 10.1016/j.energy.2009.09.028.

MONTEALEGRE, Moira (2005) Intégration du design et de la commande optimale: application à la distillation réactive. UPPA, Pau, FRANCE.

MOSSERI, Rémy; JEANDEL, Catherine (2013) L'énergie à Découvert : CNRS edition.

NARJOT, René (1985) Réseaux de chaleur - chauffage urbain. b2172. In : Techniques de l'ingénieur.

NEGAWATT (2003) Manifeste Négawatt 2003, pour un avenir énergétique sobre, efficace et renouvelable. En ligne : <http://www.negawatt.org/telechargement/Manifeste%20nW%20v2.pdf>.

NEGAWATT (2013a) Dossier de synthèse du scenario négaWatt 2011 (28 pages). En ligne : http://www.negawatt.org/telechargement/SnW11//Scenario_negaWatt_2011-Dossier_de_synthese-v2011017.pdf.

NEGAWATT (2013b) Présentation du scenario NégaWatt (4 pages). En ligne : http://www.negawatt.org/telechargement/SnW11/Presentation_Scenario_negaWatt.pdf.

NEMHAUSER, Georges; WOLSEY, L. A. (1988) Integer and combinatorial optimization. New York [etc.] : Wiley (Wiley - Interscience series in discrete mathematics and optimization).

NOU, Julien (2011) Gestion optimale de l'énergie thermique dans un procédé hybride : solaire/géothermie pour le chauffage de bâtiments. Université de Perpignan Via Domitia. Laboratoire PROMES - CNRS UPR 8521.

OMU, Akomeno; CHOUDHARY, Ruchi; BOIES, Adam (2013) Distributed energy resource system optimisation using mixed integer linear programming. In : Energy Policy, vol. 61, p. 249–266. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.05.009.

Conclusion et perspectives

- OMU, Akomeno; HSIEH, S.; OREHOUNIG, K.; CARMELIET, J. (2015) Energy Hub modeling for the design of solar thermal energy systems with short-term and long-term storage: CISBAT 2015. Cleantech for smart cities & buildings from nona to urban scale. Lausanne - Switzerland, September 9-11. EPFL.
- PALZER, Andreas; HENNING, Hans-Martin (2014) A Future German Energy System with a Dominating Contribution from Renewable Energies: A Holistic Model Based on Hourly Simulation. In : Energy Technology, vol. 2, n° 1, p. 13–28. DOI: 10.1002/ente.201300083.
- PETTERSSON, Frank; SODERMAN, Jarmo (2007) Design of robust heat recovery systems in paper machines. In : Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, vol. 46, n° 10, p. 910–917. DOI: 10.1016/j.cep.2007.05.018.
- PLAN BATIMENT DURABLE (2016) Des voies de progrès pour le développement des réseaux de chaleur et de froid. En ligne : http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/Des_voies_de_progres_pour_le Developpement_des_reseaux_de_chal---_version_finale.pdf, consulté le 9 avril 2016.
- RAMOS BERMUDEZ, Mario (2007) Optimisation des systèmes de distribution de fluides et des réseaux de chauffage urbains à l'aide d'un algorithme génétique. Doctoral dissertation, Université de Laval. En ligne : <http://www.theses.ulaval.ca/2007/24395/24395.pdf>, consulté le 18 février 2014.
- RAUTHERMEX (2012) Information_technique. En ligne : www.rehau.com/download/1070180/information-technique-rauthermex-fr.pdf, consulté le 22 mai 2013.
- REICH, Jean-Paul; GDF SUEZ DRI (2013) Power to Gas - and not back to power. In : ATEE et AFG Ouest, coord.: Power to gas. Nantes, 09/04/2013. Ecole des Mines de Nantes. En ligne : <http://atee.fr/sites/default/files/presentationateeouest9avril2013v0.pdf>, consulté le 7 octobre 2013.
- REN, Hongbo; ZHOU, Weisheng; NAKAGAMI, Ken'ichi; GAO, Weijun; WU, Qiong (2010) Multi-objective optimization for the operation of distributed energy systems considering economic and environmental aspects. In : Applied Energy, vol. 87, n° 12, p. 3642–3651. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.06.013.
- RENEAUME, Jean-Michel; NICLOUT, N. (2003) MINLP optimization of plate fin heat exchangers. In : Chemical and biochemical engineering quarterly, volume 17, n° 1, p. page 65-76.
- REZAIE, Behnaz; ROSEN, Marc (2012) District heating and cooling: Review of technology and potential enhancements, vol. 93, p. 2–10. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.04.020.
- Xavier ROBOAM, éd. (2012) Integrated Design by Optimization of Electrical Energy Systems. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc.
- ROSENER, Aude; HARROIS, Romain (2013) Les réseaux de chaleur : vecteurs incontournables de la transition énergétique en milieu urbain: Colloque ATEE les réseaux de chaleur : vecteurs incontournables de la transition énergétique en milieu urbain, 17 janvier 2013. ATEE; ALEC.
- SAHINIDIS, N.; GROSSMANN, Ignacio (1991) MINLP model for cyclic multiproduct scheduling on continuous parallel lines. In : Computers & Chemical Engineering, vol. 15, n° 2, p. 85–103. DOI: 10.1016/0098-1354(91)87008-W.
- SALAME, Sahar; ZOUGHAIB, Assaad (2014) Conception d'un réseau de chaleur avec stockage en fonctionnement multi-période: SFT 2014 Congrès français de la thermique. Approches multi-échelles pour la thermique, l'énergétique et le génie des procédés. Lyon, France, 3-6 juin 2014. Société française de Thermique.

SALOMON, Thierry (2013) Analyse comparative des émissions de GES entre scénarios. Contribution au Groupe Experts - Débat National sur le Transition Energétique. En ligne : <http://www.negawatt.org/telechargement/Docs/DNTE-Comparatif-scenarios-GES-Facteur4-2013.pdf>, consulté le 9 juin 2016.

SANDOU, Guillaume; DESSANTE, Philippe; PETIT, Marc; BORSENBERGER, Henti (2012) Technico-Economic Optimization of Energy Networks. In : Xavier ROBOAM, coord.: Integrated Design by Optimization of Electrical Energy Systems. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, p. 247–285.

SCHLUCK, T.; KRAUCHI, P.; SULZER, M. (2015) Non-linear thermal networks - how can a meshed network improve energy efficiency ?: CISBAT 2015. Cleantech for smart cities & buildings from nona to urban scale. Lausanne - Switzerland, September 9-11. EPFL.

SIA Partners (2012) Des réseaux de chaleur pour stimuler les politiques énergétiques. consultant compagny, 13 juin 2012. En ligne : <http://www.energie.sia-partners.com/20120613/des-reseaux-de-chaleur-pour-stimuler-les-politiques-energetiques>, consulté le 19 mars 2016.

SIEDLER, Olivier (2009) Note techniques : Energie primaire ou énergie finale ? ENERTECH. En ligne : <http://www.enertech.fr/pdf/39/energie%20primaire-energie%20finale.pdf>, consulté le 7 janvier 2016.

SIEDLER, Olivier; ENERTECH (2012) Enjeux de la rénovation thermique des bâtiments en France - Enjeux et stratégie. En ligne : http://www.enertech.fr/pdf/48/enjeux-de-la-renovation-thermique-des-batiments-en-france_v0.pdf, consulté le 6 décembre 2012.

SNOECK, C. W.; KLUITERS, S. C. (2010) Application of exergoeconomics to the optimization of building heating systems connected to district heating networks.

SODERMAN, Jarmo (2007) Structural and operational Optimisation - Applications in Energy Systems. Heat Engineering Laboratory, Abo Akademi University.

SODERMAN, Jarmo (2013) Structural and Operational Optimisation – Applications in Energy Systems. En ligne : http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/86756/soderman_jarmo.pdf?sequence=2, consulté le 22 octobre 2013.

SODERMAN, Jarmo; PETTERSSON, Frank (2006) Structural and operational optimisation of distributed energy systems. In : Applied Thermal Engineering, vol. 26, n° 13, p. 1400–1408. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.05.034.

SoeS (2014) Prix du gaz et de l'électricité en France et dans l'Union européenne en 2013. En ligne : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2099/1065/prix-gaz-lelectricite-france-lunion-europeenne-2013.html>.

SoeS (2015) Chiffres clés des énergies renouvelables. En ligne : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes-chiffres-cles-energie-renouv-2015.pdf, consulté le 7 janvier 2016.

THIBAULT, Fabien; ZOUGHAIB, Assaad; Pelloux-Prayer, Sandrine (2015) A MILP algorithm for utilities pre-design based on the Pinch Analysis and an exergy criterion. In : Computers & Chemical Engineering, vol. 75, p. 65–73. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2014.12.010.

TOL, Hakan; SVENDSEN, Svend (2012) A comparative study on substation types and network layouts in connection with low-energy district heating systems. In : Energy Conversion and Management, vol. 64, p. 551–561. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.04.022.

UE (2014) Communiqué de presse : Objectifs pour 2030 en matière de climat et d'énergie en faveur d'une économie de l'UE compétitive, sûre et à faibles émissions de carbone. En ligne : http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-54_fr.htm, consulté le 21 mars 2016.

Conclusion et perspectives

VIA SEVA; ADEME (2015) Réseaux de chaleur - Comment chauffer les villes sans réchauffer la planète ? In : Mon Quotidien, 2015, n° édition spéciale 2015- 2016. En ligne : http://eliseuse.playbac.fr/web/upload/magazine/magazine_132/pdf/viaseva_liseuse.pdf, consulté le 18 février 2016.

VISWANATHAN, Jagadisan; GROSSMANN, Ignacio (1990) A combined penalty function and outer-approximation method for MINLP optimization. In : Computers & Chemical Engineering, vol. 14, n° 7, p. 769–782. DOI: 10.1016/0098-1354(90)87085-4.

WEBER, Céline (2008) Multi-objective design and optimization of district energy systems including polygeneration energy conversion technologies. Thèse EPFL, n° 4018. EPFL. En ligne : http://infoscience.epfl.ch/record/114786/files/EPFL_TH4018.pdf?version=1, consulté le 12 février 2014.

WEF (2011) Global Risks 2011. Word Economic Forum. Geneva. Switzerland. En ligne : <http://reports.weforum.org/global-risks-2011/>, consulté le 6 janvier 2016.

WERNSTEDT, F.; DAVIDSSON, P. (2003) Simulation of district heating systems for evaluation of real time control strategies.: the First European Simulation and Modelling Conference online proceedings. Naples, Italy, Oct 27-29.

WIGBELS, Michael; BOHM, Benny; SIPILA, Kari (2005) Operational optimisation: Dynamic heat storage and demand side management strategies. In : Euroheat and Power (English Edition), n° 2, p. 58–61. En ligne : <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-20044381893&partnerID=40&md5=ec4aac6abf5e54247f6900a0a2cda735>.

YOU, Fengqi; PINTO, Jose M.; CAPON, Elisabet; GROSSMANN, Ignacio; ARORA, Nikhil; MEGAN, Larry (2011) Optimal Distribution-Inventory Planning of Industrial Gases. I. Fast Computational Strategies for Large-Scale Problems. In : Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 50, n° 5, p. 2910–2927. DOI: 10.1021/ie1017578.

Résumé : L'objectif de ces travaux est de développer une méthode d'aide à la conception des réseaux de chaleur urbains (RCU). Cette méthode utilise un modèle de type MINLP (Mixed Integer Non Linear Programming) pour l'optimisation simultanée de la configuration et du dimensionnement d'un RCU. Aux variables continues pour l'aide au dimensionnement (température, vitesse, diamètre, aire des échangeurs), s'ajoutent des variables binaires aidant à définir la configuration du réseau (maillage et choix des technologies). La fonction objectif à minimiser est le coût total (capex et opex), qui est soumise à un ensemble de contraintes non linéaires (p. ex. pertes thermiques et de charge, bilans).

La méthode développée dans ce manuscrit offre la possibilité de connecter en cascade des consommateurs n'ayant pas les mêmes besoins en température, et de réaliser des réseaux bouclés (une canalisation par tranchée). Elle permet aussi de choisir : les consommateurs à connecter au RCU, le ou les sites de production ainsi que le type de technologie utilisée. Enfin la bonne prise en compte de la physique permet de choisir le meilleur compromis entre pertes thermiques et pertes de charge, sur une large gamme de température. Cette formulation permet donc d'optimiser des réseaux de 4ème génération et de démontrer la rentabilité de l'intégration d'EnR&R sur le long terme (30 ans).

Un premier travail est réalisé afin de proposer une méthodologie de résolution en plusieurs étapes permettant l'obtention de l'optimum global. Différents cas d'études académiques sont utilisés pour présenter les intérêts multiples de cette formulation. Enfin la comparaison avec un réseau existant a permis de démontrer la cohérence des résultats du modèle et a servi de base pour l'optimisation d'un cas d'étude de grande dimension. Plusieurs études de sensibilité post-optimale sont réalisées afin de démontrer l'intérêt de cet outil pour l'aide à la conception initiale ou l'extension de RCU existants.

Mots-clés : Réseau de chaleur urbain (RCU), aide à la conception optimale, optimisation combinatoire non linéaire (MINLP), intégration d'EnR&R, analyse en coût global.

Abstract: The aim of this thesis is to develop a method that provides design assistance for District Heating Network (DHN). This tool allows simultaneously the optimization of the configuration and its sizing, thanks to an MINLP formulation (Mixed Integer Non-Linear Programming). Binary variables help to choose the optimal configuration (network layout and technologies of production), whereas continuous variables help DHN sizing (temperature, diameter, velocity, heat exchanger area, thermal generating capacity ...). The objective function to minimize is the total cost (capex and opex), subjected to numerous nonlinear constraints (e.g. thermal losses, pressure drop, energy balance).

This method enables to design temperature cascade between consumers, when consumer temperature requirements are different, and also looped network (only one pipe in one trench). It helps also the decision to connect (or not) consumers to the main network and also the location(s) and type(s) of the heating plant. Moreover, the arbitrage between heat losses and pressure drops is taken into account thanks to physical considerations (non-linear equations). Eventually, it is possible to design 4th generation DHN and prove their financial profitability over the long terms (30 years).

First a multi-step resolution strategy is proposed to ensure finding global optimum of the complex MINLP problem. Then academic study cases are analyzed to underline the numerous assets of the formulation. Finally, the optimal design compared to an existing DHN ensures the consistency of the method and allows to build a study case at a wider scale, which can be solved thanks to the comprehensive strategy developed. The design assistance method is available for initial design as well as for extension of existing DHN.

Keywords: District Heating Network (DHN), optimal design assistance, Mixed integer non-linear programming (MINLP), Renewable Energy Sources (RES), wasted heat, total cost analysis.