

RESEAUX DE CHALEUR ET DE FROID



VERS LE RESEAU DE CHALEUR 2.0 : OPTIMISER LA REALISATION ET LA CONDUITE DE SON RESEAU

Donner à tous les moyens de développer son Smart Grid thermique !

Version septembre 2019

Avec le soutien de





RESEAUX DE CHALEUR ET DE FROID

Pourquoi ce guide ?

SmartGrid thermique, optimisation, modélisation...concrètement, on procède comment ?

Dans la logique d'un large partage des connaissances de manière à accompagner un développement de l'ensemble des acteurs du monde des réseaux de chaleur, nous avons travaillé avec Itherm Conseil avec le soutien de l'ADEME sur la réalisation de fiches pratiques qui ont pour objectif de donner les éléments essentiels de sujets techniques pointus sur le fonctionnement ou les choix techniques des réseaux de chaleur, notamment sur les dernières évolutions technologiques, en utilisant des outils de modélisation et de simulation. **Ce guide s'adresse ainsi aux maîtres d'ouvrage, pour les accompagner dans leurs réflexions et les inviter à reprendre certaines recommandations dans les marchés et concessions qu'ils passent avec leurs partenaires privés.** Les conclusions des fiches de cet ouvrage peuvent bien entendu être librement utilisées par les AMO, bureaux d'étude et exploitants dans leur travaux et exploitation quotidienne.

L'objectif de ces fiches est la vulgarisation de sujets techniques pointus sur le fonctionnement ou les choix techniques des réseaux de chaleur, notamment sur les dernières évolutions technologiques. La prise de décision sur ces sujets peut parfois aboutir sur des décisions non optimisées sur le long terme car visant à l'optimisation directe des investissements. **C'est pourquoi il est important que les maîtres d'ouvrage aient des connaissances et des attentes sur le sujet et mobilisent les bons outils pour choisir les moyens en adéquation avec les objectifs fixés.**

Ces fiches balayeront l'ensemble du panorama des choix techniques sur les réseaux de chaleur, de la production aux émetteurs finaux en passant par la distribution ; en étudiant quelles sont les méthodes d'optimisation de chacune des facettes.



Ces fiches ont été réalisées sur 2018-2019 et ont fait l'objet d'une large diffusion pour qu'elles soient enrichies des commentaires et avis de l'ensemble des acteurs de la filière. Mais loin d'être un rendu statique, elles ont vocation à être mises à jour et enrichies, aussi n'hésitez pas pour à nous faire part de vos commentaires (via g.perrin@fnccr.asso.fr) !

Nous avons par ailleurs fait le choix d'un rendu de ces fiches sous forme d'un webinaire, en plus du rendu papier que vous tenez entre les mains ; les enregistrements de ces webinaires sont librement consultables, avec les présentations associées, via les hyperliens suivants :

- Canalisation, dimensionnement et pertes thermiques : <http://www.fnccr.asso.fr/agenda/webinaire-smart-grids-thermique-15-avril-2019/>
- Régulation : <http://www.fnccr.asso.fr/agenda/webinaire-thematique-regulation-15-mai2019/>
- Primaire et secondaire des sous-stations : <http://www.fnccr.asso.fr/agenda/webinaire-optimisation-11-juillet-2019/>
- Gestion des cascades, tritubes et police d'abonnement : <http://www.fnccr.asso.fr/agenda/webinaire-optimisation-des-reseaux-de-chaaleur-02-12-2019/>



Sommaire

00- **Introduction à l'optimisation**

01 Productions ENR&R

02- Canalisations et pertes thermiques

03- Canalisations et dimensionnement

04- Régulation

05- Primaire des sous-stations

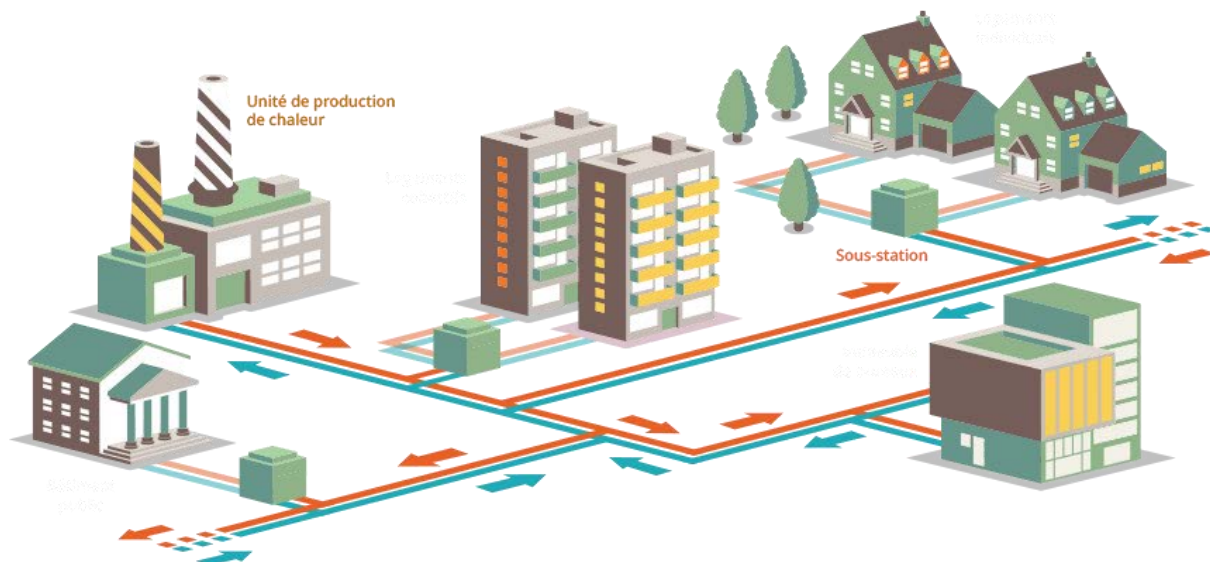
06- Secondaire des sous-stations

07- Gestion des cascades et tritubes

08- Police **d'abonnement**

09- Glossaire

Introduction : qu'est-ce qu'optimiser le fonctionnement d'un réseau de chaleur ?



Source schéma : EnR'Choix, ADEME

Il peut s'agir de plusieurs objectifs :

- Diminuer le coût de l'énergie
- Maximiser l'utilisation des ENR&R
- Diminuer les pertes thermiques
- Optimiser les rendements de production

Au niveau de l'optimisation des réseaux de chaleur, une des composantes essentielles est la baisse des températures de fonctionnement.

En effet, la puissance transmise est proportionnelle :

- Au débit
- A la différence entre température départ et la température retour

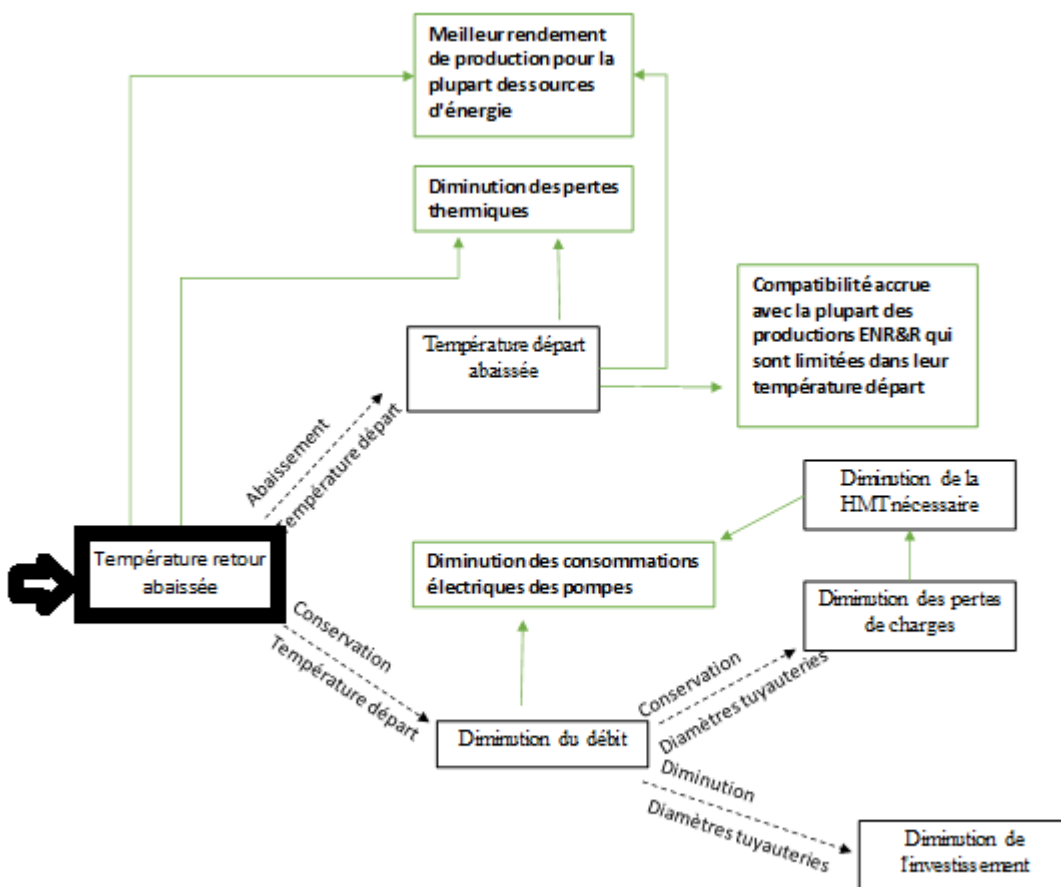
$$\text{Puissance} \propto \text{Débit} \times (\text{Température départ} - \text{Température retour})$$



Une température retour faible permet, pour une même puissance transmise, :

- soit de diminuer d'autant la température départ, entraînant gains sur les pertes thermiques, mais aussi de meilleurs rendements de productions et l'augmentation de possibilités de fonctionnement seuls de certaines ENR (exemple : Optimisation du taux de couverture de la géothermie, qui est limitée en température départ)
- soit, avec conservation de cette température départ, la diminution du débit, permettant des économies sur les investissements et/ou des réductions de consommation électrique lié au pompage.

Le schéma suivant résume les conséquences d'un abaissement de température retour sur le fonctionnement d'un réseau de chaleur.



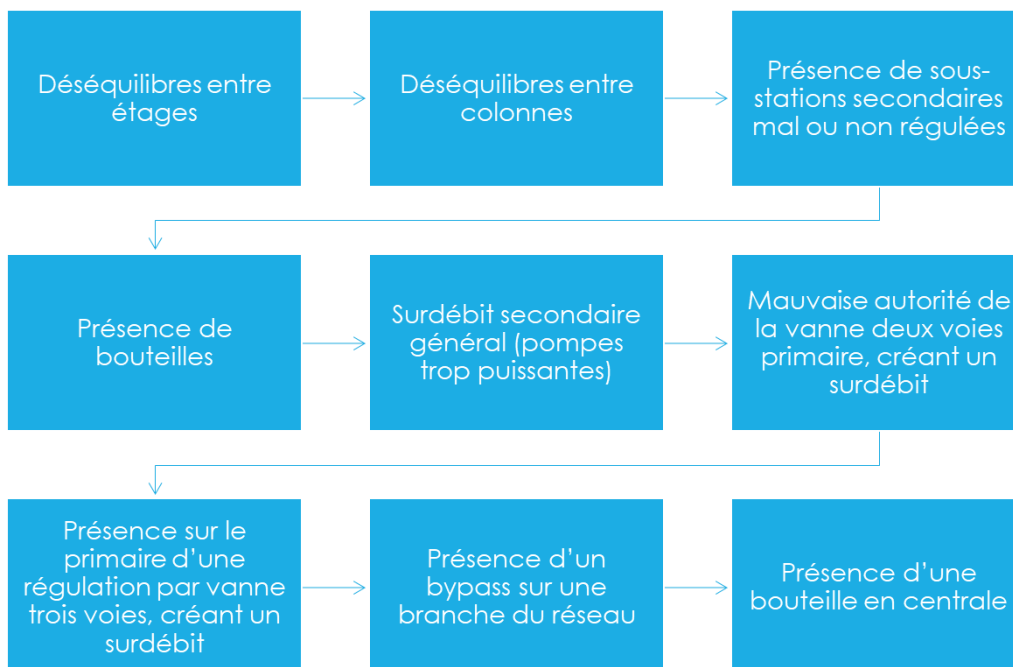
La diminution des températures retour est un problème dit de chaîne ; le concept est qu'une chaîne n'est jamais plus solide que son maillon le plus faible.

Dans le domaine du réseau de chaleur, cela signifie qu'il suffit d'un maillon de la chaîne entre les émetteurs terminaux des échangeurs et la production rehausse la température pour que la température retour globale soit rehaussée.



Entre le retour des **émetteurs** et la ou les centrales, les sources de surdébits et donc d'augmentation de la température retour sont nombreuses ; **il suffit d'un seul de ces problèmes sur l'ensemble de la chaîne** pour que la température retour globale soit rehaussée :

- Déséquilibres entre étages
- Déséquilibres entre colonnes
- Présence de sous-stations secondaires mal ou non régulées
- Présence de bouteilles
- Surdébit secondaire général (pompes trop puissantes)
- Mauvaise autorité de la vanne deux voies primaire, créant un surdébit
- **Présence sur le primaire d'une régulation par vanne trois voies, créant un surdébit**
- **Présence d'un bypass sur une branche du réseau**
- **Présence d'une bouteille en centrale**
- ...



L'optimisation : un problème de chaîne

Au final, en ce qui concerne l'optimisation de température retour, tous ces points doivent faire l'objet d'une surveillance particulière dès le stade de conception.

Fédération Nationale des Collectivités Concédantes et Régies

Optimisation et modélisation des réseaux de chaleur

FICHE N°1 – PRODUCTIONS
ENR&R

Rédigé par : J.ETCHEBARNE – V.BIZOUARD
Relecture : V.BIZOUARD – B.LACHENAÏT – P. RAINE
G.PERRIN
Date : 19/03/2019



1. RESUME DE LA FICHE

L'objectif de ces fiches est la vulgarisation de sujets techniques pointus sur le fonctionnement ou les choix techniques des réseaux de chaleur, notamment sur les dernières évolutions technologiques. La prise de décision sur ces sujets peut parfois aboutir sur des décisions non optimisées sur le long terme car visant à l'optimisation directe des investissements. C'est pourquoi il est important que les maîtres d'ouvrage aient des connaissances et des attentes sur le sujet et mobilisent les bons outils pour choisir les moyens en adéquation avec les objectifs fixés.

Ces fiches balayeront l'ensemble du panorama des choix techniques sur les réseaux de chaleur, de la production aux émetteurs finaux en passant par la distribution ; en étudiant quelles sont les méthodes d'optimisation de chacune des facettes.

La présente fiche éclaire les différentes énergies renouvelables et de récupération utilisables sur un réseau de chaleur.

Elle commence par un tableau récapitulatif des ENR&R disponibles et de leurs forces et points particuliers, notamment du point de vue de leur optimisation.

Certaines précisions sont apportées ensuite.

L'optimisation la plus courante est de diminuer les températures départ et retour des différentes productions.

TABLE DES MATIERES

1. RESUME DE LA FICHE	2
2. TABLEAU RECAPITULATIF	3
3. PRECISIONS COMPLEMENTAIRES	7
3.1. Récupération de chaleur fatale	7
3.1.1. Usine d'incinération	7
3.1.2. Data Center	7
3.1.3. Récupération de chaleur sur les réseaux d'assainissement	8
3.1.4. Récupération de chaleur sur des process industriels	9
3.2. Géothermie	10
3.3. Solaire thermique	11
3.4. Biomasse	13

2. TABLEAU RECAPITULATIF

Le tableau récapitulatif suivant fait le bilan des **avantages**, **inconvénients**, et **points de vigilance** de 8 énergies renouvelables et de récupération :

- La récupération de chaleur fatale
 - Incinérateur
 - Data center
 - Industries
 - La récupération sur eau usée
- La géothermie
 - Profonde
 - De surface
- Le solaire thermique
- La Biomasse

Pour chaque énergie, nous abordons les critères suivants :

- Les niveaux de température : ils spécifient la capacité d'utilisation directe de la source énergétique. En effet, si le niveau de température est trop faible par rapport à celui du réseau de chaleur, l'utilisation d'une Pompe à Chaleur sera nécessaire.
- La proximité du consommateur : caractérise si les sources sont en général proches des sous-stations (zone urbaine), ou si un long tronçon de transport est à prévoir.
- Intermittence : la production est-elle stable ?
- Le niveau de puissance utilisable
- Le coût de l'énergie utilisable sortie production
- L'adaptabilité pour production de froid
- Les investissements nécessaires
- Des exemples de réseaux existants utilisant cette énergie
- Une note sur l'adaptabilité à un réseau de chaleur en cas d'existence de la source de chaleur
- Les principales modalités administratives associées
- Les principales voies d'optimisations.

Objet	Niveau de température	Proximité du consommateur	Maîtrise des régimes de températures	Intermittence	Niveau de puissance utilisable	Coût de l'énergie utilisable sortie production (à une température utilisable sur le réseau de chaleur), hors investissement	Adaptabilité pour produire du froid	Investissements	Réseaux existants	Adaptabilité si le producteur est existant	Modalités administratives	Que faire pour optimiser
Incinérateur	Suffisant pour tous les process	En dehors des zones urbaines en général donc nécessite un tronçon de transport	Peu nécessaire	Chaque four nécessite en général deux arrêts de maintenance programmés d'une semaine (Avril et Octobre)	Adaptable à tout projet (peu intéressant pour les petits réseaux en raison du réseau de transport) - Arrêts programmés et fortuits au cours d'une année	Entre 15 et 30 € HT/MWh	Via une PAC à absorption (niveau de température élevée et des pertes thermiques)	Peu pour la production mais coût de liaison en général élevé	Grand Lyon (Gerland - 69) Métropole Rouen Normandie (Vésuve - 76) Toulouse Métropole (Mirail - 31)	Nécessite des modifications sur la tuyauterie de vapeur vive mais généralement réalisable	Conventions de vente de chaleur avec des engagements de fourniture et d'enlèvements contraignants	
Data Center	40 °C - Nécessite d'être relevé avec une PAC	En général en milieu urbain	Impératif	Continuité de fourniture	A étudier au cas par cas (autour de 1 - 2 MW en général)	Autour de 25 € HT/MWh (achat d'électricité)	Via une boucle tempérée	Elevé en raison de la mise en place de PAC	Marne La Vallée (Zac du Prieuré - 77)	Très compliqué si la récupération sur la production de froid n'a pas été conçue pour récupérer la chaleur. Sinon un simple piquage suffit	Conventions de vente de chaleur pour les limites de prestation et en cas d'impact sur le process de l'autre	Diminuer les niveaux de température aller et retour du réseau de chaleur. Limiter la température de sortie de la PAC en utilisant les autres productions en relève de température pour gagner en rendement.
Industrie	Dépend du process : - Haute température - Moyenne / basse température : nécessite la mise en place d'une PAC	En dehors des zones urbaines en général donc nécessite un tronçon de transport	Peut s'avérer nécessaire selon le type de récupération (cas de mise en place d'une PAC pour garantir un coefficient de performance acceptable)	Dépend du process de l'industriel : - Fonctionnement en continu - Fonctionnement par intermittence (le week-end)	A étudier au cas par cas	< 10 € HT/MWh	A étudier au cas par cas	A étudier au cas par cas	CUD (Dunkerque 59) Gatz, Autriche; Charleville Mézières (08)	A étudier au cas par cas mais en général assez compliqué car les retours sur investissements visés par les industriels sont courts. Difficulté pour les industriels à s'engager sur de la durée	Conventions de vente de chaleur avec des engagements de fourniture et d'enlèvements contraignants. Difficulté à mettre en œuvre des mécanismes de pénalités / take or pay	

Objet	Niveau de température	Proximité du consommateur	Maîtrise des régimes de températures	Intermittence	Niveau de puissance utilisable	Coût de l'énergie utilisable sortie production (à une température utilisable sur le réseau de chaleur), hors investissement	Adaptabilité pour produire du froid	Investissements	Réseaux existants	Adaptabilité si le producteur est existant	Modalités administratives	Que faire pour optimiser
Eaux Usées	10-15 °C Nécessite d'être relevé avec une PAC	En milieu urbain mais la récupération se fait sur les collecteurs principaux	Impératif pour garantir un Coefficient de performance de la PAC acceptable	Continuité de fourniture mais maintenance importante sur le process déviant le flux	Peu de puissance récupérable (à l'échelle du bâtiment ou d'un écoquartier)	Autour de 30 € HT/MWh	Via une boucle tempérée	Elevé en raison de la mise en place de PAC et d'équipements de filtration (échangeurs spécifiques et dégrilleurs)	Ville de Nanterre (Sainte Geneviève - 92)	Récupération avec un échangeur dans la canalisation (petite puissance) : difficile; Nombreux équipements à implanter en cas de déviation du flux	Conventions de vente de chaleur ou de mise à disposition pour les limites de prestation et en cas d'impact sur le process de l'autre	Diminuer les niveaux de température aller et retour du réseau de chaleur. Limiter la température de sortie de la PAC en utilisant les autres productions en relèvent de température pour gagner en rendement.
Géothermie Dogger	Dogger : 55-78 °C Albien : env 40°C Nécessité de mise en oeuvre d'une PAC si les températures exhaures sont faibles	Nécessite un terrain de 5000 m ²	Impératif pour optimiser la ressource (couple débit et température de la géothermie fixe) et le cas échéant le coefficient de performance de la PAC	Continuité de fourniture	Nécessite un réseau de 5000 équivalents logements a minima	Entre 5 et 10 € HT/MWh (achat d'électricité)	Pas directement	Elevé (10 M€HT le forage seul et 15 M€ HT avec la centrale géothermique)	Dogger : Ville de Melun (77) SMIREC Ville de Créteil (94) Albien : ZAC Batignolles - Issy (92)	Analyse de la proximité avec un autre puit de géothermie	Arrêté préfectoral pour permis d'exploitation de la nappe	Diminuer les niveaux de température aller et retour du réseau de chaleur. En cas d'utilisation d'une PAC, limiter sa température de sortie afin de gagner en rendement.
Géothermie de surface	12-20 °C Nécessite d'être relevé avec une PAC	Implantable facilement (sonde ou nappe de surface)	Impératif pour garantir un coefficient de performance de la PAC acceptable	Continuité de fourniture	Echelle de quelques bâtiments	Autour de 30 € HT/MWh (achat d'électricité)	Via une boucle tempérée	Elevé en raison de la mise en place de PAC	Nanterre Cœur Université (92) ZAC Créative des rives de l'Escaut - Valenciennes (59)	Analyse de la proximité avec un autre puit de géothermie	Permis minier uniquement si pompage sur nappe. Zones vertes avec autorisations administratives	Diminuer les niveaux de température aller et retour du réseau de chaleur. Limiter la température de sortie de la PAC en utilisant les autres productions en relèvent de température pour gagner en rendement.

Objet	Niveau de température	Proximité du consommateur	Maîtrise des régimes de températures	Intermittence	Niveau de puissance utilisable	Coût de l'énergie utilisable sortie production (à une température utilisable sur le réseau de chaleur), hors investissement	Adaptabilité pour produire du froid	Investissements	Réseaux existants	Adaptabilité si le producteur est existant	Modalités administratives	Que faire pour optimiser
Solaire thermique grandes surfaces avec réseau de chaleur	Variable au cours de l'année (dépend de la technologie des capteurs)	Nécessite une emprise foncière très importante qui peut être contraignante	Impératif	Variation importante en fonction de la saison et de l'heure. Nécessité de coupler la production avec un stockage	Puissance dépendante de la saisonnalité et de la région (en général en complément d'une autre EnR&R) - fournit entre 300 et 3000 MWh/an	Coût d'exploitation / maintenance uniquement	Via une boucle tempérée ou un groupe à absorption solaire	Important, dépend du nombre de panneaux nécessaires et du système de stockage potentiel	Torning, Dannemark; Chateaubriand (44) Chambéry (73) Voreppe	S.O	Pas de contrainte	Diminuer les niveaux de température aller et retour du réseau de chaleur. Installer des dispositifs de tracking Gérer intelligemment le stockage pour maximisation de l'utilisation de l'énergie
Biomasse	Suffisant pour tous les process	Nécessite simplement un accès camion	Peu nécessaire sauf utilisation de condensation	Continuité de fourniture mais maintenance importante sur le process bois entraînant des arrêts fréquents. Minimum technique de 30% pouvant poser problème en été sauf mise en place de plusieurs chaudières en cascade (dont des plus petites)	Adaptable à tous projets	Autour de 30 € HT/MWh pour grosses puissances (combustible plaquettes)	Via une PAC à absorption (niveau de température élevée et des pertes thermiques)	Elevé en raison des équipements spécifiques (silo, filtration...)	Réseau de Nantes (Bellevue - 44) Réseau du Havre (Mont Gaillard - 76) Réseau de Strasbourg (Wacken - 69)	S.O	Respects des normes d'émission	En cas de condensation, diminuer les niveaux de température retour du réseau de chaleur. Adapter le minimum technique de la production au minimum d'appel du réseau.

3. PRECISIONS COMPLEMENTAIRES

3.1. Récupération de chaleur fatale

La chaleur fatale est la chaleur qui est produite par un processus dont l'objet n'est pas la production de cette chaleur. C'est par exemple la chaleur rejetée lors de l'incinération des déchets, processus dont l'objet principal est la destruction des déchets et non la production d'énergie.

L'ensemble des ressources présentées ci-dessous nécessitent la contractualisations d'une convention de vente de chaleur avec le Maître d'Ouvrage de l'usine d'incinération, du Data Center, du réseau d'assainissement...

Sur ce sujet, voir également le guide opérationnel pour le territoire sur la chaleur fatale, disponible au lien suivant : <http://www.fnccr.asso.fr/article/la-fnccr-edite-un-guide-operationnel-pour-les-territoires/>

3.1.1. Usine d'incinération

Environ 28% de la chaleur actuelle produite sur les réseaux de chaleur est issue de l'incinération des déchets.

La combustion des déchets permet la production de vapeur d'eau (autour de 400 °C et 40 bars).

Cette vapeur d'eau à forte enthalpie peut être valorisée sous forme électrique via une turbine avec un rendement d'environ 25%. Jusqu'en 2015, les Usines d'incinération pouvaient contractualiser la revente d'électricité à un tarif avantageux garanti pendant 15 ans.

La fiscalité sur les activités polluantes actuelles favorise la valorisation de cette chaleur avec un critère de Performance énergétique permettant une exonération partielle de la TGAP (taxe générale sur les Activités Polluantes). Ce critère apporte ainsi une préférence à la vente de chaleur à la vente d'électricité.

Plusieurs critères à prendre en compte pour le Maître d'Ouvrage :

- Quelle est la pérennité du volume de déchets actuellement traiter dans un contexte de diminution ?
- L'incinérateur a-t-il déjà un statut d'Usine de Valorisation Energétique (UVE) qui lui permet de bénéficier d'une TGAP réduite ? Si, non, fort intérêt à alimenter un réseau de chaleur
- L'incinérateur bénéficie-t-il d'un tarif de rachat de son électricité et jusqu'à quand (contrats de 15 ans non renouvelables depuis 2015) ? Une fois ce contrat terminé, fort intérêt à se raccorder à un réseau de chaleur.

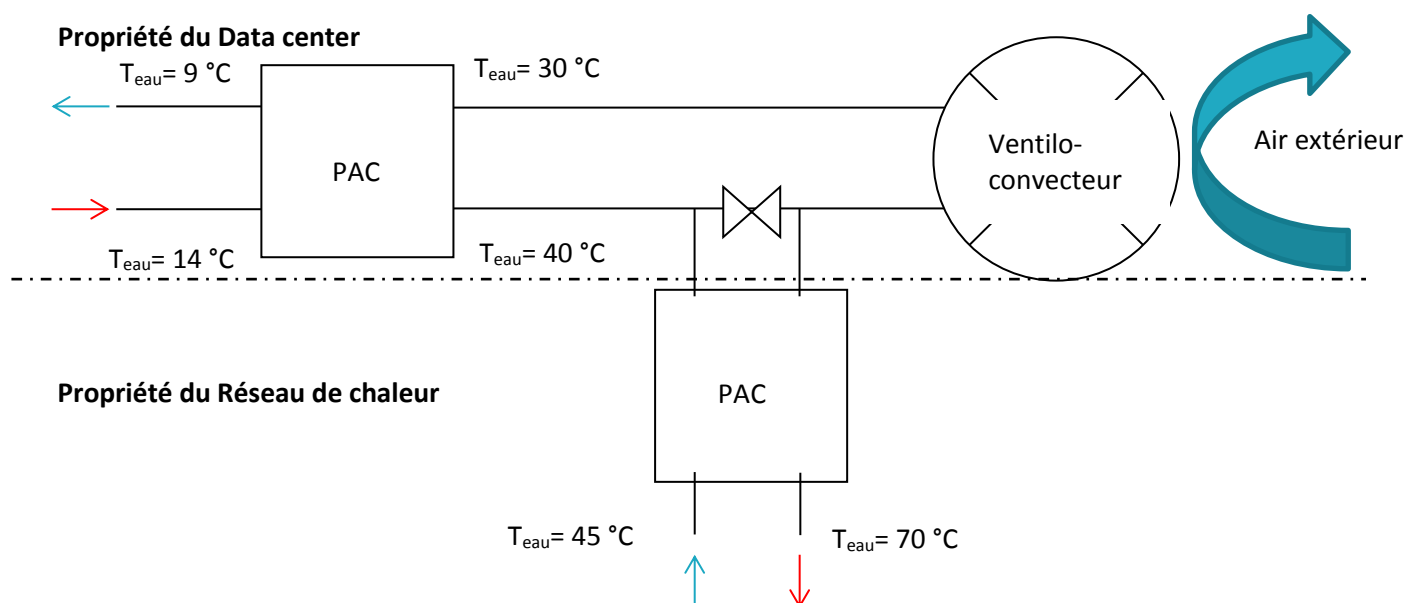
3.1.2. Data Center

La fonction première d'un data Center est d'héberger des serveurs informatiques. Ce process qui nécessite une production de froid **en continu** est le parfait candidat pour la récupération d'énergie de récupération

La continuité de service d'un data center est par contre une priorité absolue. Par conséquent, modifier une installation existante pour récupérer de la chaleur et quelques recettes supplémentaires relativement faibles par rapport aux pénalités liées à l'arrêt de production est généralement peu accepté aujourd'hui.

Il faut donc **dès la conception de ces équipements anticiper la récupération de chaleur** pour faciliter la sortie du projet comme celui de la ZAC du Prieuré Marne La Vallée.

Le schéma ci-dessous permet de visualiser le mécanisme de récupération de la chaleur éventuel en by passant les ventilo-convecteurs.



La maîtrise des températures départs et retours est un élément important puisqu'une rehausse des températures via des pompes à chaleur est nécessaire.

3.1.3. Récupération de chaleur sur les réseaux d'assainissement

La récupération de chaleur sur les eaux usées est très favorable pour l'alimentation de centre nautique avec des besoins de température faibles pour réchauffer les bassins et un renouvellement d'eau important.

Cette solution peut néanmoins être utilisée pour alimenter des réseaux de chaleur avec des régimes de température peu élevés ($70\text{ °C}/35\text{ °C}$).

Il existe deux moyens de récupération de chaleur sur les réseaux d'assainissement :

- Solution 1 : Mise en place d'un échangeur plat directement dans le réseau d'assainissement ;
- Solution 2 : Mise en place d'une dérivation du flux avec équipements de filtration et échangeurs déportés.

La solution 1 est notamment adaptée lors de la construction de nouveaux quartiers ou de ZAC quand le réseau d'assainissement n'est pas encore en place et que l'ajout d'un échangeur peut être directement intégré dans les buses bétons.



Buses bétons avec échangeur intégré (exemple système Dégrés Bleus) - crédit : [Saunier associes](#)

Cette solution limite en revanche la puissance récupérable (projets existants autour de 300-500 kW) et complique les interventions sur les échangeurs intégrés.

La solution 2 est adaptable sur des canalisations existantes mais nécessitent plus d'équipements :

- Pompe broyeuse et/ou Dégrilleur ;
- Echangeur de récupération spécifique

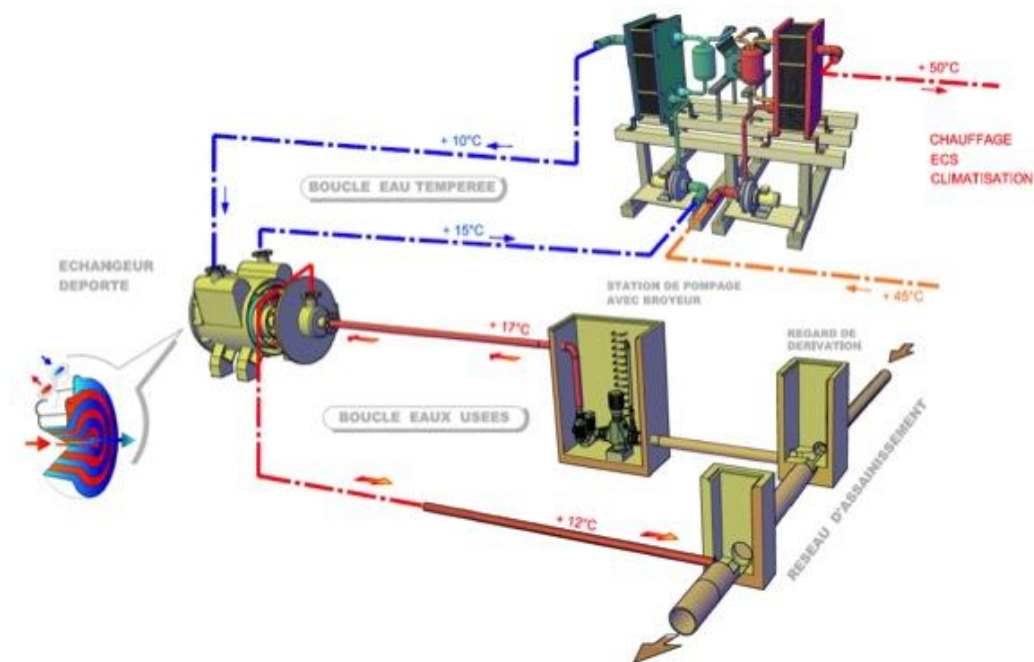


Schéma de principe (exemple système Energido)

Cette solution permet une récupération de chaleur plus importante en déviant le flux et en limitant la surface occupée par les échangeurs.

3.1.4. Récupération de chaleur sur des process industriels

Les process industriels utilisent fréquemment des régimes de températures importants. Les températures retour des différents process sont la plupart du temps jugés inutilisables par les

industriels, alors qu'ils sont compatibles avec des fonctionnements de réseau de chaleur. Parfois, les niveaux de température sont insuffisants mais une pompe à chaleur permet de garantir des bons régimes.

La principale difficulté est l'adaptation des process existant pour permettre la récupération d'énergie.

Une des principales difficultés pour ces mises en place est le manque d'engagement de la part des industriels, qui n'acceptent en général pas la mise en place d'un engagement de fourniture minimum ni de pénalités associées. De même, ils ne permettent pas d'engagement sur la durée. Ces incertitudes sont compensées par des prix de l'énergie très bas.

3.2. Géothermie

Si l'objectif ici n'est pas de proposer une vision exhaustive des différentes géothermies pour l'usage chaleur, il est à noter qu'usuellement, la température exploitable sur une géothermie dépend de la profondeur ; par ailleurs, certaines discontinuités du gradient moyen de température (exemple en Ile de France) peuvent permettre de plus hautes températures.

- Entre 50 et 200 m, la température est de 15-20°C, et nécessite une pompe à chaleur. Relativement peu exploitable sur un réseau de chaleur urbain car pas assez puissant.
- Vers 400-600 m, la température exploitable est de 40°C, ce qui nécessite des pompes à chaleur pour l'exploitation mais est utilisable sur un réseau de chaleur.
- Vers 2000 m, le niveau de température est entre 60 et 80°C. Peut être exploitable sans réhausse si le réseau est adapté, à associer avec une PAC sinon.
- Vers 5000 m de profondeur, la température est de 150-200°C, ce qui permet d'effectuer une cogénération électricité et chaleur depuis la vapeur extraite. En France, ce fonctionnement est récent, des projets pilotes sont en cours par l'entreprise Fonroche géothermie qui a 8 permis d'exploration. La En 2019, elle inaugurera la première centrale de co-génération électricité-vapeur de la filière en France, à l'Ecoparc de Vendenheim, près de Strasbourg.

La présence et la profondeur des différentes nappes exploitables est variable et répartie sur le territoire, comme le montre cette carte créée par le BRGM :



La température retour du réseau est essentiel au bon fonctionnement, car l'énergie valorisable (avec ou sans PAC) dépend directement de celle-ci.

Avec géothermie, du fait des investissements particulièrement important, la part fixe de la vente de chaleur est plus importante, apportant l'avantage d'une bonne stabilité du prix. En revanche, la part variable comptant pour peu, les abonnés ne ressentent pas sur leur facture l'effet d'une isolation de leurs bâtiments.

Pour plus de précisions, lire la publication FNCCR / BRGM suivante :

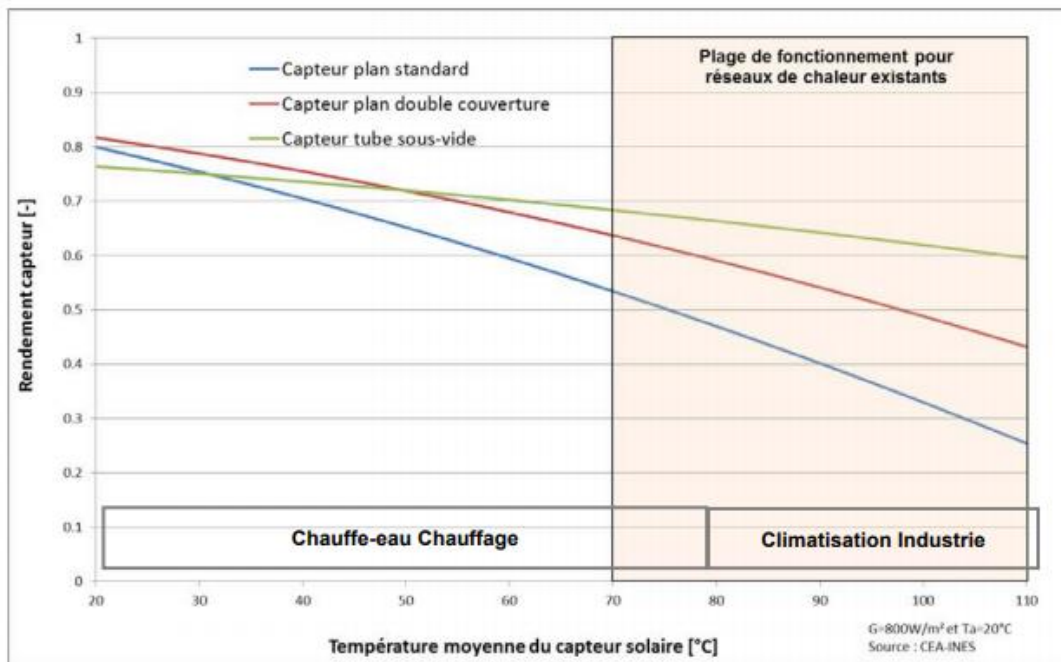
<http://www.fnccr.asso.fr/article/geothermie-2/>

3.3. Solaire thermique

L'énergie solaire consiste à récupérer une infime partie de l'énorme quantité d'énergie que fournit le rayonnement solaire à la terre quotidiennement pour la transformer en chaleur grâce aux panneaux solaires thermiques (plan ou sous vide) pouvant ensuite servir pour l'alimentation d'un réseau de chaleur ou la production directe d'Eau Chaude sanitaire d'un bâtiment ;

L'ADEME a publié une fiche en 2011 sur le solaire thermique intégrable aux réseaux chaleur dont sont issues les informations suivantes :

- Capteur plan – Installation standard en Europe ;
- Capteur tube sous vide – efficace dans les régions froides ;
- Capteur à concentration (ne récupère que les radiations et permet d'atteindre des températures jusqu'à 400 °C) – efficace avec un ensoleillement direct mais à coût encore élevé



	Capteurs plans	Capteurs tubulaires
Température de chauffe	50 à 80°C, voire 110°C pour certains modèles récents	50 à 110° C
Déperditions thermiques	Importantes	Moindres ⁶
Rendement	Moindre Meilleur l'été (bonne efficacité dans les zones très ensoleillées et chaudes)	Meilleur Meilleur l'hiver : les panneaux réagissent mieux à un ensoleillement diffus
Coût	Technologie financièrement plus accessible	Plus cher à l'achat que les capteurs plans

Il existe deux possibilités pour l'implantation sur un réseau de chaleur :

- Décentralisé avec l'utilisation des toitures des bâtiments pour l'implantation comme à Limeil Brevannes (91), solution possible uniquement sur un quartier en construction en imposant aux promoteurs la solution énergétique et l'utilisation de la toiture ;
- Centralisé avec un stockage important en tête de réseau comme à Chateaubriand (44).

Le couplage du solaire avec le réseau de chaleur doit se faire via un stockage.

La principale difficulté d'utilisation est le caractère intermittent de la source, ainsi que la décorrélation entre le pic de production (l'été) et le pic de consommation du réseau de chaleur (l'hiver). Aussi des techniques de stockage et de régulation avancées doivent être mises en œuvre afin de maximiser l'utilisation de la source.

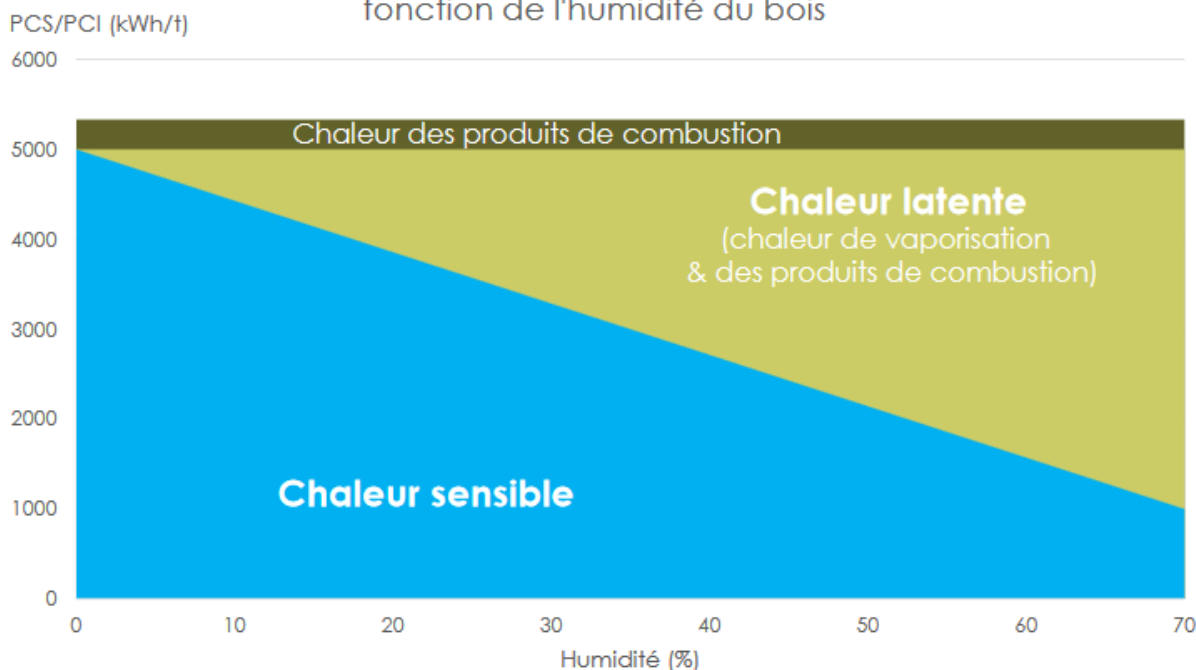
Les températures retour réseau doivent être suffisamment froides pour permettre une bonne récupération de chaleur.

3.4. Biomasse

Les particularités de la production par biomasse, du point de vue de l'optimisation de fonctionnement, est le suivant :

- L'énergie valorisable de la combustion de la biomasse dépend de la qualité du combustible et notamment de son taux d'humidité. Plus la biomasse est humide, plus l'énergie de la combustion sera d'abord utilisée pour évaporer l'eau, ce qui diminue celle qui est valorisable directement. Plus généralement, la maîtrise des conditions de combustion (stœchiométrie / taux d'oxygène, humidité,...) permet d'optimiser le fonctionnement.
- Les chaudières biomasse ont un meilleur rendement à pleine charge, et le minimum technique est important (autour de 30% de charge). Aussi, le dimensionnement en puissance est important afin de faire en sorte que le minimum technique soit compatible avec les besoins du réseau et ainsi limiter les cycles de marche-arrêt. L'utilisation d'un stockage est essentiel afin de lisser la charge, et de maximiser le temps de production à pleine puissance.
- Le rendement moyen annuel d'une production biomasse se situe aux alentours de 80-85%. En récupérant de la chaleur sur les fumées, ce rendement peut être augmenté à
 - 85-90% par l'utilisation d'un économiseur (récupération de la chaleur sensible des fumées, c'est-à-dire sans changement de phase : les fumées restent à l'état gazeux).
 - 90% et plus par l'utilisation d'un condenseur qui permet la récupération de la chaleur latente en faisant condenser les fumées sous forme liquide. C'est un moyen de compenser une humidité de bois élevée, car une partie de l'énergie perdue à faire évaporer l'eau du combustible peut être récupérée. Plus l'humidité du bois est importante, plus le point de rosée est élevé, rendant plus facile la condensation.Le graphe ci-dessous (source : CIBE-CEDEN : « Chaufferie biomasse et écart de température d'eau : les solutions de la performance ») montre la distribution entre chaleur sensible et latente en fonction de l'humidité du combustible.

Chaleur sensible/chaleur latente du combustible bois en fonction de l'humidité du bois



Dans les deux cas, disposer d'une température de retour basse permet d'améliorer l'efficacité de ces deux techniques et d'améliorer les rendements au maximum.

Selon la même présentation CIBE-CEDEN, avec un condenseur, des retours à 35°C plutôt que 55°C permettent de multiplier par deux l'énergie issue de la condensation.

Fédération Nationale des Collectivités Concédantes et Régies

Optimisation et modélisation des réseaux de chaleur

FICHE N°2 – CANALISATIONS
ET PERTES THERMIQUES



Rédigé par : V.BIZOUARD
Relecture : C.CHRISTIAENS – G. PERRIN
Date : 19/03/2019

1. RESUME DE LA FICHE

L'objectif de ces fiches est la vulgarisation de sujets techniques pointus sur le fonctionnement ou les choix techniques des réseaux de chaleur, notamment sur les dernières évolutions technologiques. La prise de décision sur ces sujets peut parfois aboutir sur des décisions non optimisées sur le long terme car visant à l'optimisation directe des investissements. C'est pourquoi il est important que les maîtres d'ouvrage aient des connaissances et des attentes sur le sujet et mobilisent les bons outils pour choisir les moyens en adéquation avec les objectifs fixés.

Ces fiches balaieront l'ensemble du panorama des choix techniques sur les réseaux de chaleur, de la production aux émetteurs finaux en passant par la distribution ; en étudiant quelles sont les méthodes d'optimisation de chacune des facettes.

La présente fiche traite du sujet des canalisations et des pertes thermiques associées.

L'erreur fréquemment faite dans l'estimation des pertes thermiques est de considérer un pourcentage arbitraire des ventes totales ; alors que les pertes dépendent de la longueur du réseau, du coefficient d'échange (et donc des choix techniques effectués, varie du simple au double à même diamètre), des régimes de température.

Les choix techniques à effectuer sur les tuyauteries (épaisseur d'isolation, barrière anti-diffusion, tubes simples ou jumeaux, type de manchons) influent sur le coût du tube et de l'installation, mais diminuent les pertes thermiques, le maintien dans le temps des tuyauteries et le coût à long terme. Ces considérations ne sont que très rarement prises en compte par les différents acteurs. La stratégie long-terme concernant la réduction des pertes thermiques et l'allongement de la durée de vie des tuyauteries doit être fixée par le Maître d'Ouvrage à la conception.

TABLE DES MATIERES

1. RESUME DE LA FICHE	2
2. ENJEUX	3
3. FONCTIONNEMENT USUEL	5
4. POSSIBILITES D'OPTIMISATION	6
4.1. L'épaisseur de l'isolation	6
4.2. Tubes jumeaux	6
4.3. Présence ou non de barrière anti-diffusion	7
4.4. Type de joints utilisés	7
5. COUTS ET GAINS	8

2. ENJEUX

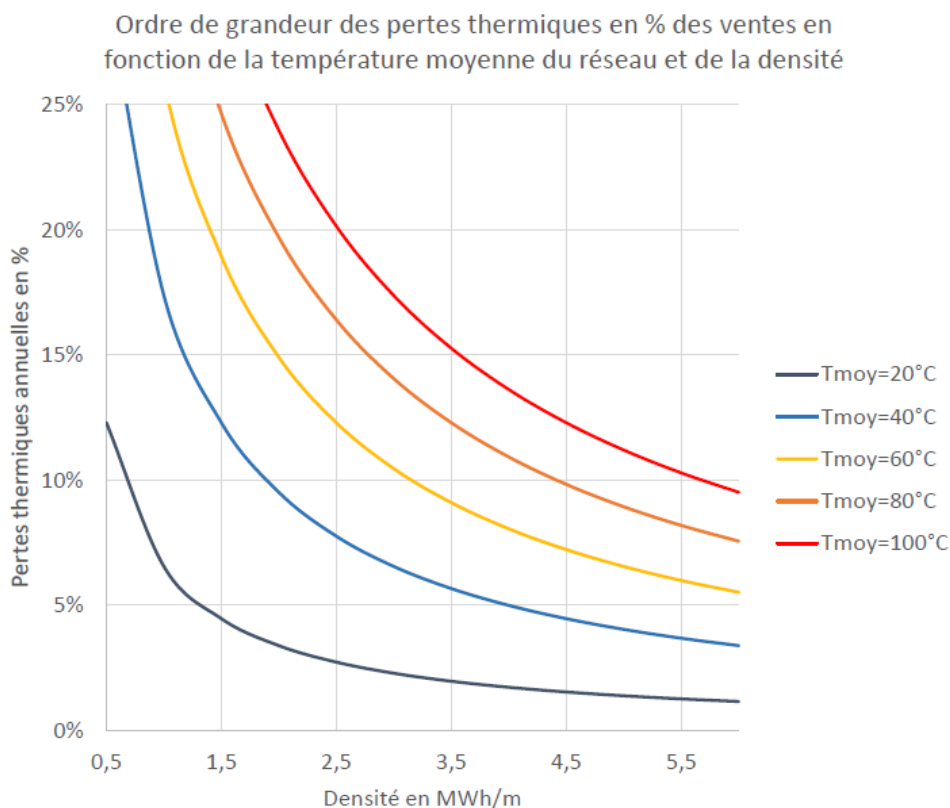
Ce sont par les canalisations ou tuyauteries qu'est transporté le fluide calorifique alimentant les sous-stations. C'est par ce biais que la majorité des pertes thermiques surviennent sur un réseau de chaleur. Si, en ordre de grandeur pour un réseau classique basse température, les pertes thermiques sont de l'ordre de 10% de la production totale annuelle, ce taux dépend en fait de :

- De la densité du réseau. Les pertes thermiques dépendent linéairement de la longueur du réseau. Aussi, un réseau dense aura une perte en pourcentage moins importante qu'un réseau moins dense.
- De l'épaisseur, de la qualité et de l'âge et de l'état de l'isolant
- Des températures du fluide à l'intérieur des canalisations
- De la température de sol avec lequel le tube échange, qui varie en moyenne entre 10 et 20 °C suivant les saisons.
- Dans le cas de tuyauteries en caniveau, les supportages ajoutent une source importante des pertes thermiques (ponts thermiques).

En bref, les pertes thermiques sont proportionnelles à :

$$\text{Longueur réseau} * (\text{Température intérieur moyenne} - \text{Température sol}) \\ * \text{Coefficient d'échange}$$

Le graphe ci-dessous est une estimation des pertes thermiques annuelles en pourcentage des ventes totales, en fonction des densités et des températures moyennes de fonctionnement, toutes choses égales par ailleurs. Ce graphe est une estimation théorique et ne doit pas être utilisé tel quel.

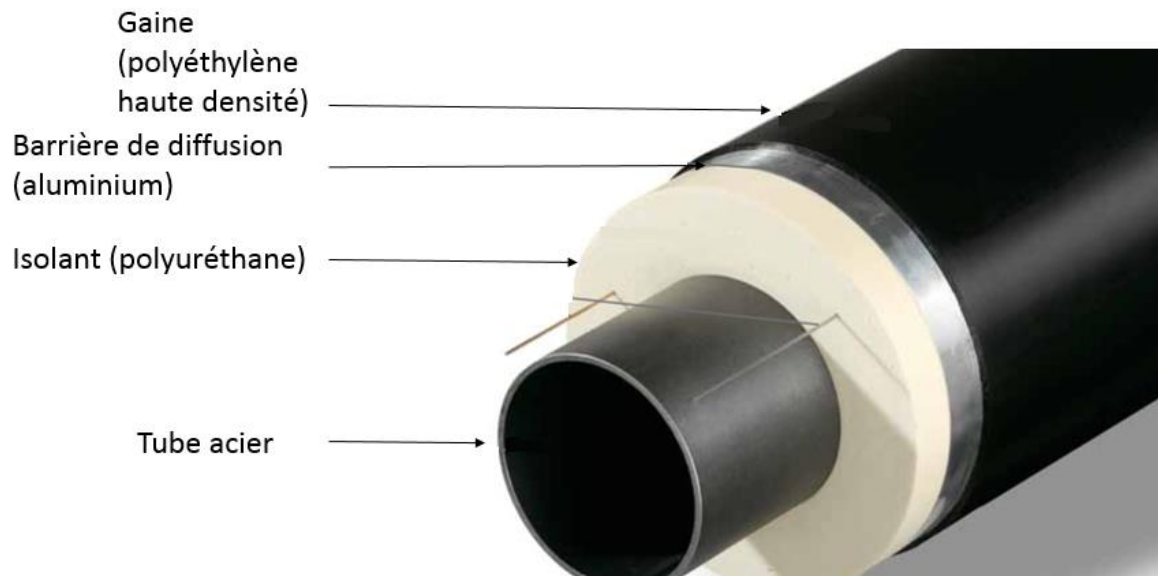


Donc, diminuer les pertes thermiques, c'est :

- Obtenir une densité importante (diminuer la longueur de réseau par MWh vendu).
- Avoir une température départ la plus basse possible et une température retour optimisée. C'est, à l'extrême, l'objet des réseaux de 4^{ème} génération à boucle tempérée qui vise à utiliser dans les canalisations un fluide ayant peu d'écart de température avec la terre pour n'avoir quasiment aucune pertes thermiques ; les calories étant alors valorisées via l'utilisation de pompes à chaleur en bâtiment. (Exemple de réseaux de Saclay, Valenciennes, Mijwater Heerlen (Pays-bas)). Sur les réseaux plus classiques de 3^{ème} génération, l'abaissement de température départ dépend :
 - o Du plus haut besoin en température secondaire (chauffage et ECS) de l'ensemble des abonnés qui fixe la température pour l'ensemble du réseau.
 - o Du dimensionnement des échangeurs de chaleur et de leur capacité à avoir peu de différence entre les températures départs primaire et secondaire (pincement départ) et entre les températures retour primaire et secondaire (pincement retour).
 - o De la capacité des abonnés à maîtriser leur température retour (voir fiche : Secondaire des sous-stations)
- Diminuer le coefficient d'échange thermique entre le fluide caloporteur à l'intérieur du tube et le sol à l'extérieur du tube.

3. FONCTIONNEMENT USUEL

Actuellement, le cas le plus fréquent rencontré lors de la pose de réseaux de chaleur repose sur l'utilisation de réseau en acier préisolé. Les tubes en acier sont vendus par barres de 6 à 12 mètres, munis d'une isolation en mousse polyuréthane, et posé en pleine terre. Les tubes sont assemblés entre eux par soudure, la continuité d'isolation s'effectuant ensuite via l'utilisation de manchon et d'une mousse injectée. La qualité de cette continuité dépend grandement de sa mise en œuvre.



Source : LOGSTOR

4. POSSIBILITES D'OPTIMISATION

Plusieurs options existent mais ne sont que très rarement imposées par les Maîtres d'Ouvrage ou les Maîtres d'Œuvres. De fait, il est fréquent que faute d'indication, la solution retenue soit la plus optimisée en terme de budget d'investissement, mais pas en terme global. Ces options ont pour but la diminution des pertes thermiques et la tenue dans le temps des tuyauteries : seule une vision long terme peut donc obliger ces choix techniques.

Les choix techniques modifiant le coefficient d'échange sont les suivants :

4.1. L'épaisseur de l'isolation

Plusieurs épaisseurs sont disponibles pour chaque tube (trois en général), représentant une augmentation de diamètre total de la gaine de 15% ou de 25%.

Une épaisseur plus importante implique une baisse des pertes thermiques (voir plus loin), mais un surcoût à l'achat du tube et sur les coûts de génie civil, la tranchée étant plus large (+10% à +20%).

4.2. Tubes jumeaux

Si les tubes aller et retour sont séparés (cas le plus répandu) ou dans la même isolation (appelés tubes jumeaux ou twin pipe).

Des solutions existent jusqu'au diamètre DN250 afin de mettre les tubes dans la même gaine isolante, ce qui diminue les pertes thermiques ; mais ce procédé n'est pas à recommander sur les réseaux où la minimisation de la température retour est primordiale (exemple : géothermie), car il y a un léger échange thermique entre les tubes aller et retour.

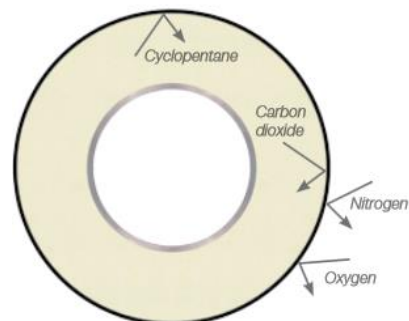


Source : LOGSTOR

Les coûts de génie civil sont légèrement diminués (tranchée moins large mais plus profonde), les coûts d'achat et de pose sont en augmentation (+25%).

4.3. Présence ou non de barrière anti-diffusion

La présence d'une barrière anti-diffusion en aluminium autour de l'isolant permet d'empêcher le passage de l'air à l'intérieur de la mousse isolante. Les capacités isolantes sont alors préservées sur le long terme. Sans cette barrière anti-diffusion, le coefficient de perte thermique augmente d'environ 40% en 30 ans.



Source : LOGSTOR

4.4. Type de joints utilisés

L'association des réseaux de chaleur suédois a estimé que plus de 80% des fuites sont dues en fait à des intrusions d'eau qui viennent attaquer le tube par l'extérieur. Les jonctions entre barres de tube constituent un point faible dans l'imperméabilité de la coque externe. Des manchons sont utilisés pour les jonctions afin de les étanchéifier. Il existe plusieurs catégories de manchons :

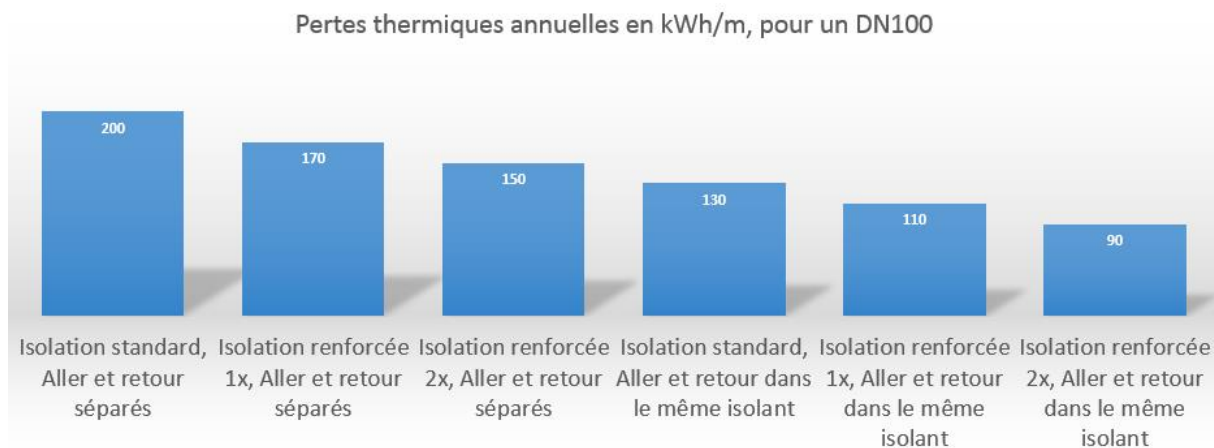
Technologie de manchons	Facilité de pose et coût	Résistance à l'humidité extérieure	Commentaire
Manchon standard	+	-	Utilisation standard – Peu utilisés
Manchon thermorétractable	-	+	Permet de résister à une nappe aquifère située au-dessus du tube – utilisés usuellement
Manchon électrosoudés	--	++	Permet de traverser des cours d'eau

Le choix d'utilisation de manchons électro soudés permet l'allongement de la durée de vie des tuyauteries à des durées bien supérieures à 30 ans.

En revanche, la qualité de mise en œuvre compte pour beaucoup dans l'efficacité du manchon. La mise en œuvre doit donc être effectuée par le fournisseur de tube ou par une entreprise agréée.

5. COUTS ET GAINS

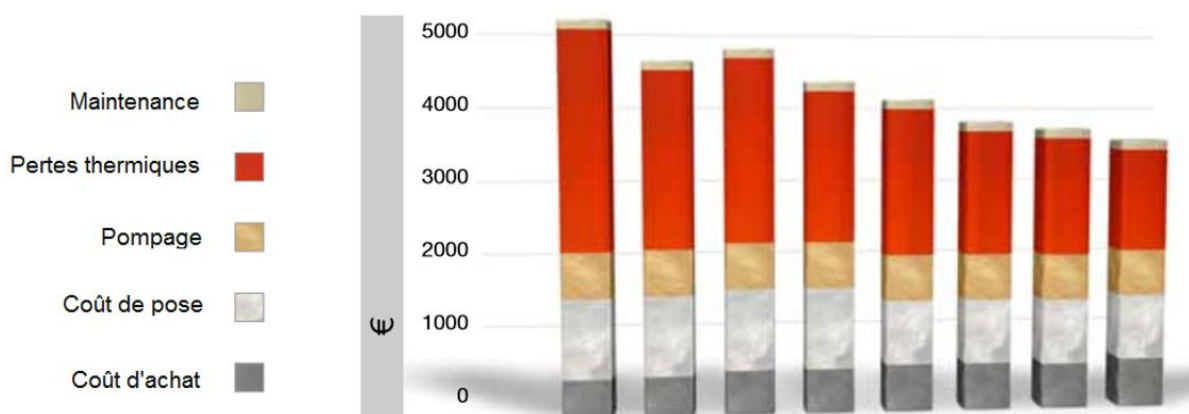
Le graphe ci-dessous présente l'estimation des pertes thermiques annuelles pour un tube en DN100 avec température intérieure de 60°C :



Source : LOGSTOR

Les pertes thermiques peuvent être divisées par deux en fonction des choix techniques.

Ci-dessous, une estimation des coûts totaux (achat, installation, exploitation) sur 30 ans en fonction du choix de ces différentes technologies (tuyaux simples/doubles, présence de barrière antidiffusion, épaisseur d'isolation).



Tuyaux	Simple	Simple	Simple	Simple	Jumeaux	Jumeaux	Jumeaux	Jumeaux
Barrière antidiffusion	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec
Isolation	Standard	Standard	Renforcée	Renforcée	Standard	Standard	Renforcée	Renforcée

Source : LOGSTOR

Ces calculsⁱ, effectués par le fournisseur de tube Logstor, montre que sur 30 ans, le coût total d'un mètre de tube peut être diminué de 30%, pour un coût d'investissement légèrement supérieur.

D'après une étude de 2011 (« Solutions techniques pour optimiser les réseaux de chaleur dans un contexte de développement de bâtiments basse consommation, Série technique RCT 34 »), le temps de retour d'une surisolation sur un réseau de chaleur ayant un régime de

température de 75-33°C est de 12,6 ans sans subvention. Pour un réseau avec régime 90-70°C, il est de 5 ans sans subventions.

L'utilisation d'un logiciel de simulation thermohydraulique permet un meilleur calcul des pertes thermiques par la connaissance et le calcul des températures à l'intérieur des tuyauteries, ainsi que la prise en compte des coefficients de pertes thermiques unitaires par diamètres.

ⁱ Détails du calcul : Panachage de tuyaux DN150/100/80/40/20 – Régime 120/70°C – Source Gaz naturel uniquement

Fédération Nationale des Collectivités Concédantes et Régies

Optimisation et modélisation des réseaux de chaleur

FICHE N°3 – CANALISATIONS
ET DIMENSIONNEMENT



Rédigé par : V.BIZOUARD
Relecture : C.CHRISTIAENS – G.PERRIN
Date : 19/03/2019

1. RESUME DE LA FICHE

L'objectif de ces fiches est la vulgarisation de sujets techniques pointus sur le fonctionnement ou les choix techniques des réseaux de chaleur, notamment sur les dernières évolutions technologiques. La prise de décision sur ces sujets peut parfois aboutir sur des décisions non optimisées sur le long terme car visant à l'optimisation directe des investissements. C'est pourquoi il est important que les maîtres d'ouvrage aient des connaissances et des attentes sur le sujet et mobilisent les bons outils pour choisir les moyens en adéquation avec les objectifs fixés.

Ces fiches balaieront l'ensemble du panorama des choix techniques sur les réseaux de chaleur, de la production aux émetteurs finaux en passant par la distribution ; en étudiant quelles sont les méthodes d'optimisation de chacune des facettes.

La présente fiche traite du sujet des canalisations et de leur dimensionnement sur un réseau de chaleur.

Les règles traditionnelles de dimensionnement sont simples mais peuvent aboutir à des surcoûts et des remplacements inappropriés.

Seule la connaissance des pressions différentielles en tout point permet de jauger de l'importance des pertes de charges unitaires à l'échelle du réseau et leur impact sur le fonctionnement des pompes et des coûts électriques.

Cette connaissance permet d'effectuer des plans de remplacement optimisés pour les passages basse pression par exemple, ou la diminution des investissements sur les réseaux neufs.

La visualisation et la réflexion sur ce type de procédé nécessite des logiciels de simulation thermohydraulique.

TABLE DES MATIERES

1.	RESUME DE LA FICHE	2
2.	ENJEUX	3
3.	METHODES DE DIMENSIONNEMENT REPANDUES	4
4.	POSSIBILITES D'OPTIMISATIONS	4
5.	ETUDE DE CAS ET INTERET DE LOGICIELS DE MODELISATION	6

2. ENJEUX

L'objectif du dimensionnement est d'estimer les débits dans chaque branche du réseau de chaleur, et de sélectionner les diamètres des tuyauteries afin de répondre à tous les critères ci-dessous :

Pérenniser les installations sur la durée

Des tuyauteries trop petites peuvent créer des vitesses importantes. Les particules (boues) contenues dans l'eau sont alors projetées sur les parois des canalisations et érodent celles-ci, particulièrement lors de changement de direction. Une solution est un traitement efficace de la qualité d'eau du réseau, l'autre est de limiter les survitesses.

Il n'existe pas de consensus sur l'érosion par survitesses.

Minimiser les consommations électriques des pompes

Des choix des diamètres découlent les pertes de charges ou pertes de pression dans les tuyauteries. Plus les canalisations sont étroites, plus les pertes de charges sont importantes. La pression différentielle ou HMT que devront créer les pompes en centrale vont dépendre de la somme des pertes de charges le long du chemin critique. Le chemin critique est l'ensemble des canalisations menant du refoulement de la pompe, à la sous-station la plus défavorisée (c'est-à-dire celle bénéficiant d'une pression différentielle faible), à l'aspiration de la pompe. En d'autres termes, c'est le maximum sur tous les chemins possibles entre chaufferie et sous-stations du cumul des pertes de charges aller et retour sur ce chemin.

La puissance électrique de la pompe est alors le produit du débit, de la pression différentielle, et d'un coefficient représentant le rendement électrique.

Optimiser les investissements

Minimiser les investissements, c'est-à-dire diminuer les diamètres le plus possible.

3. METHODES DE DIMENSIONNEMENT REPANDUES

La méthode de dimensionnement la plus répandue est de dimensionner chaque tuyauterie sur une limite fixe de pertes de charges linéaires (souvent entre 15 et 20mmCE/m). Cette technique est également utilisée dans le cadre de passage basse pression de réseaux existants.

Cette technique permet un dimensionnement facile à l'aide d'abaques. Egalement, les vitesses induites par ce dimensionnement fait que l'écoulement en canalisation n'est pas générateur de bruit.

4. POSSIBILITES D'OPTIMISATIONS

Le problème du raisonnement traditionnel est qu'il pousse à considérer comme sous-dimensionnés certains tronçons, par exemple dans le cas d'un passage BP.

En effet, les tronçons doivent être divisés en deux catégories :

- Les tronçons qui mènent aux sous-stations critiques, c'est-à-dire aux sous-stations pour lesquelles la pression différentielle est faible. Pour ceux-ci, les règles de dimensionnement standard s'appliquent. Les canalisations peuvent même être plus largement dimensionnées pour répondre à d'autres critères tels que la pression maximale atteinte dans le réseau qui est à limiter. En effet, toute baisse des pertes de charges sur ces tronçons se répercute sur la HMT des pompes en centrale, économisant ainsi de l'électricité.
- Les tronçons qui ne mènent pas aux sous-stations critiques, mais à des sous-stations où la pression différentielle est importante. Cette pression devra alors être diminuée artificiellement en sous-station par l'utilisation de vannes d'équilibrages et/ou de vannes de régulation. Avoir des pertes de charges faibles sur ces tronçons n'a aucune influence sur la HMT des pompes en centrale. Aussi est-il possible, dans une certaine mesure, de sous-dimensionner les tronçons menant à des sous-stations non critiques afin de diminuer le coût d'installation. Les précautions à prendre sont les suivantes :
 - o Une prise en compte précise des besoins en sous-stations (puissance appelée, régimes de température)
 - o Les sous-stations non critiques ne sont pas transformées en sous-stations critiques par ces transformations.
 - o Une fois arrivé en bâtiment, il est possible que certains diamètres doivent être installés en diamètres usuels, afin de ne pas créer de bruit à l'intérieur des bâtiments.
 - o Les survitesses excessives doivent être empêchées afin de palier à des problèmes d'érosion de canalisation, bien qu'il n'existe pas de consensus sur le sujet. L'érosion est causée par les particules présentes dans le fluide et non par le fluide lui-même ; aussi dans un réseau avec une filtration parfaite, les survitesses n'engendrent théoriquement pas d'érosion des canalisations.

Cette méthode est particulièrement utile dans le cadre

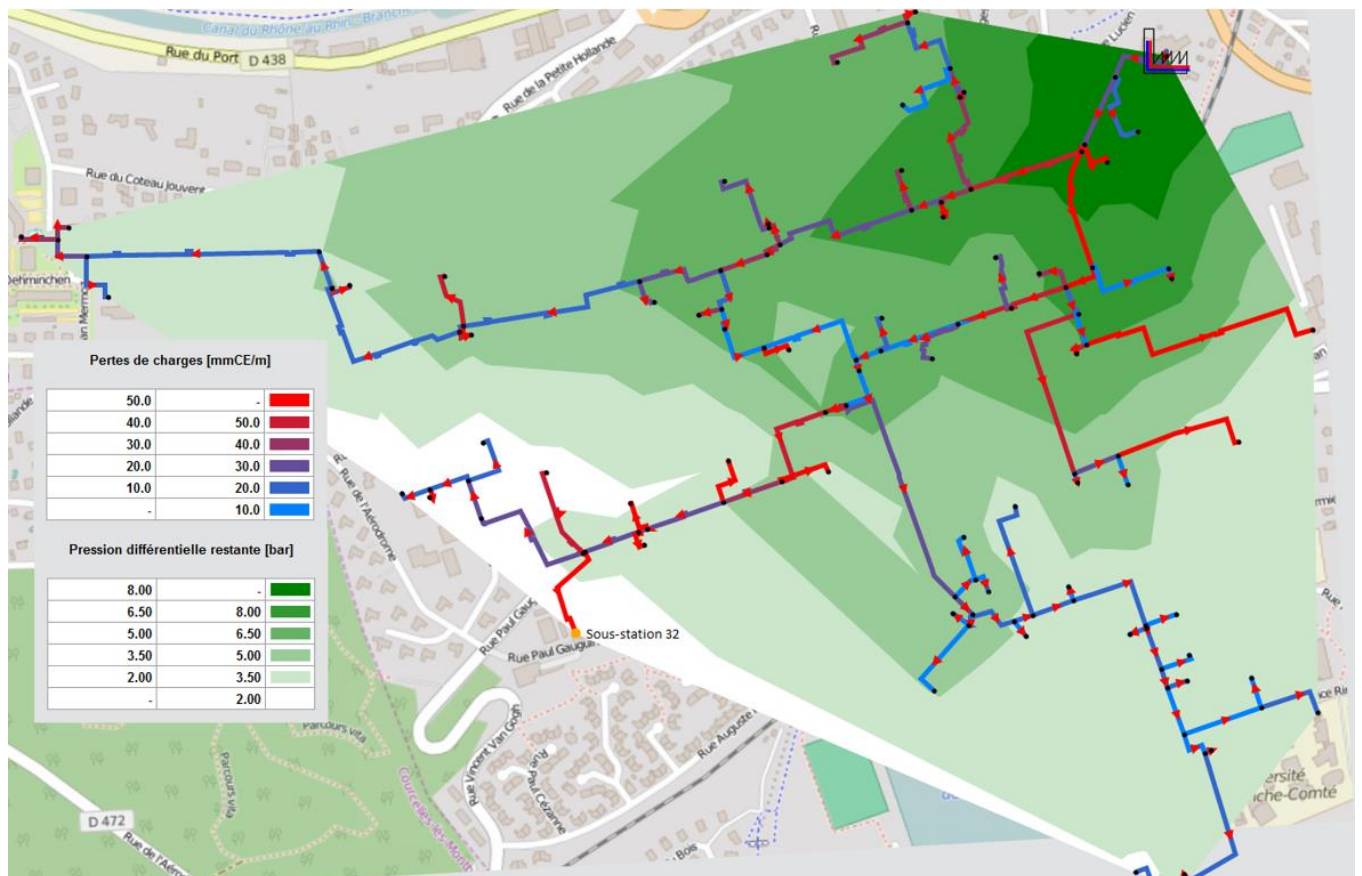
- de passage basse pression : en général, la méthode traditionnelle pousse à remplacer une grande partie des tronçons. La méthode proposée ici permet de ne remplacer que les tronçons participant à la HMT globale. Chaque tronçon est vu non plus au regard de sa perte de charge

locale, mais par sa participation à la HMT globale et de l'impact sur cette dernière en cas de remplacement.

- d'extensions, afin de juger de l'importance des nouvelles pertes de charges induites sur des tronçons existants en amont des extensions.
- Quant à la création de réseaux neufs, cette méthode peut être utilisée et permettre une baisse importante des investissements (jusqu'à environ 5-10%). En revanche, une attention particulière doit être portée au fait que les tronçons ainsi sous-dimensionnés (selon les critères classiques) ne pourront pas supporter d'éventuelles extensions non prévues initialement. Egalement, dans le cas de réseau multi sources de production, cette méthode n'apporte pas toujours un plus, car les emplacements des sous-stations critiques varient en fonction de l'équilibre de production entre les centrales.

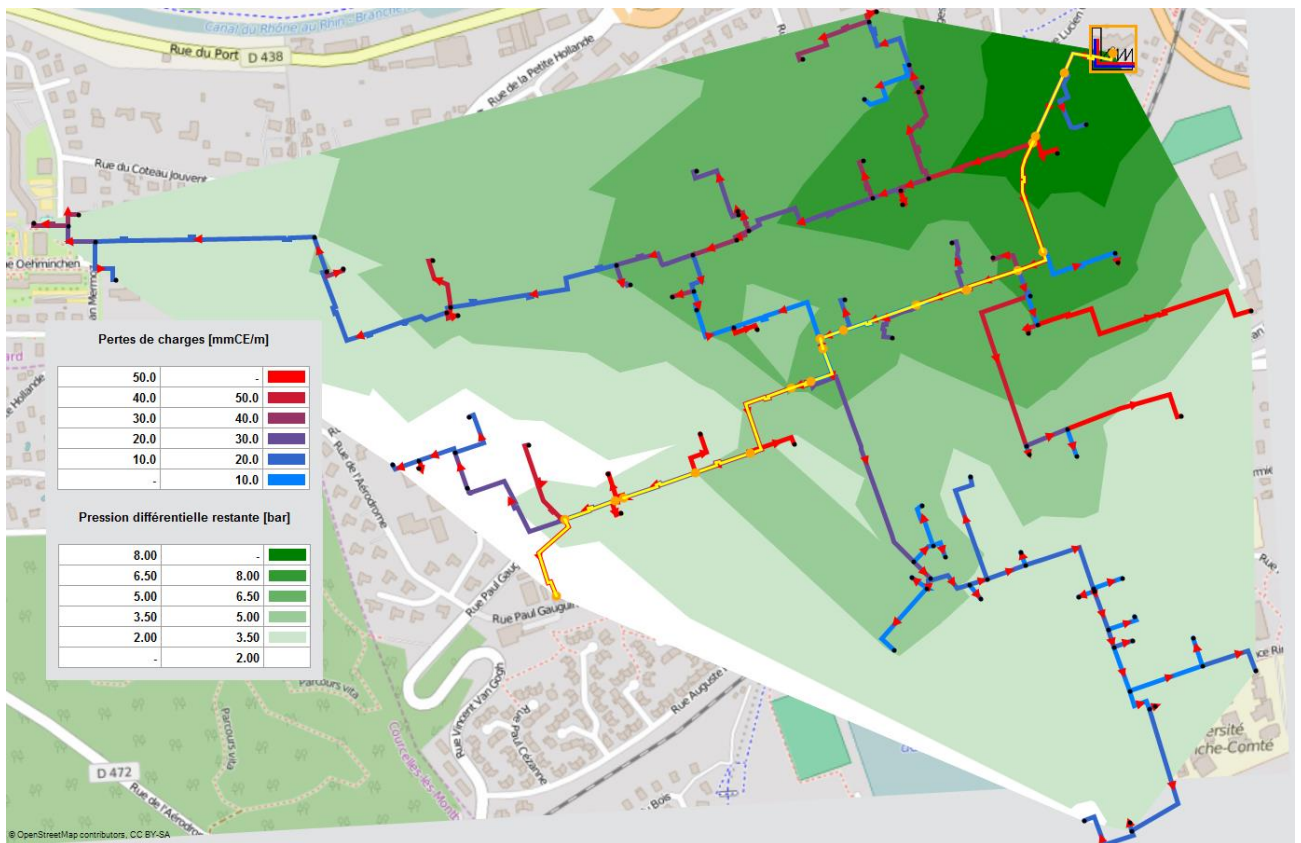
5. ETUDE DE CAS ET INTERET DE LOGICIELS DE MODELISATION

Voici, sur un réseau existant, la simulation d'un passage basse température effectué via le logiciel Termis. Le delta T de fonctionnement est réduit par rapport au fonctionnement haute température, augmentant ainsi les débits. La couleur des tuyaux représente les pertes de charges et le fond de plan vert les isocontours de pression différentielle restante en sous-station. Les zones blanches représentent les zones dans lesquelles les sous-stations sont défavorisées (pression différentielles proches de leur minimum nécessaire).



Suivant la méthode traditionnelle, dans ce cas plus de 2/3 du réseau devrait être remplacé (tronçons violet à rouge).

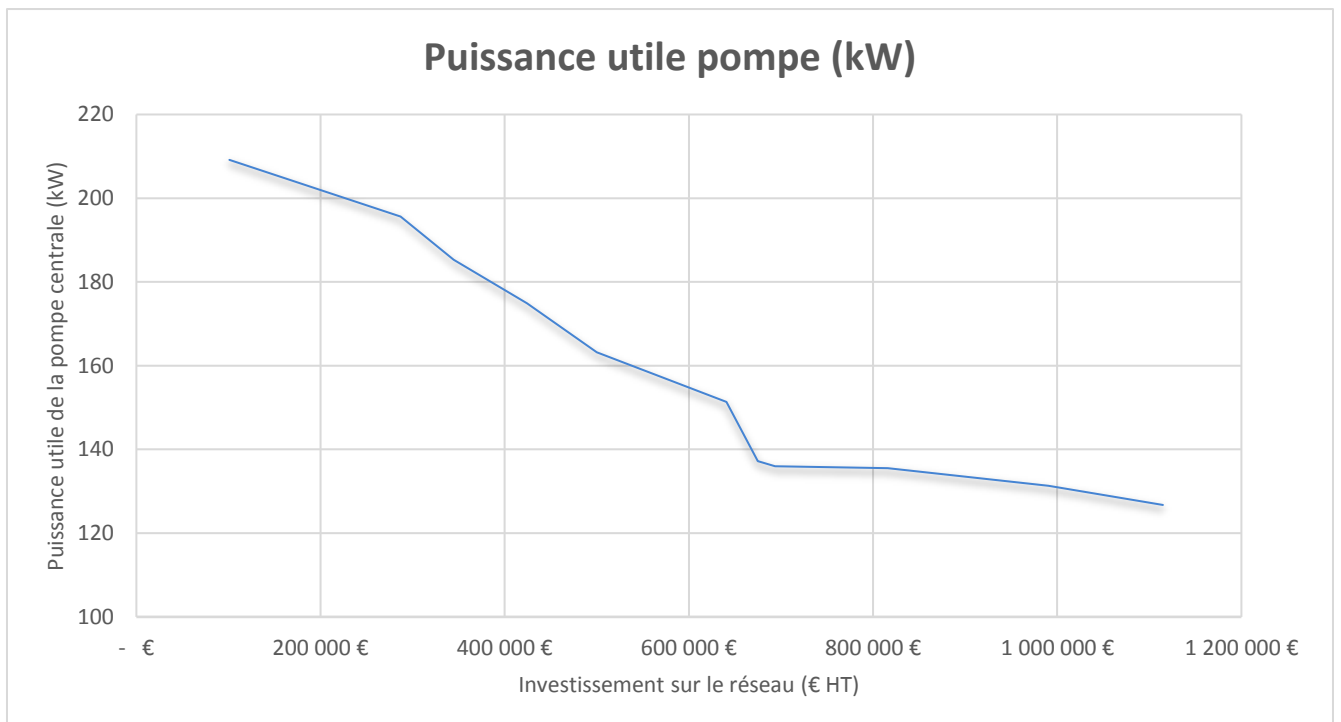
A contrario, la méthode ici présentée consiste à trouver le chemin critique en jaune :



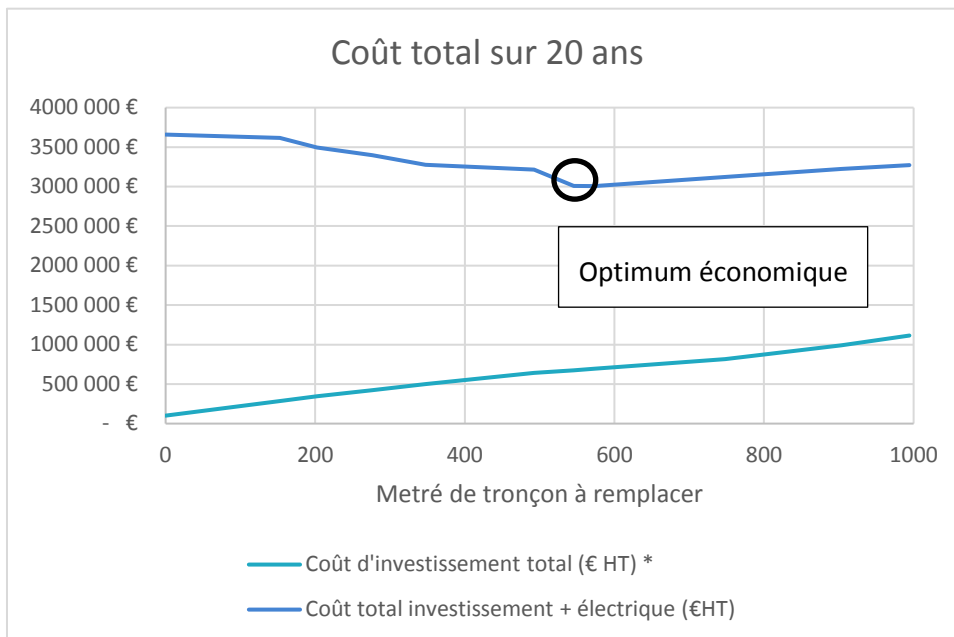
Sur ce chemin critique, le tronçon qui contribue le plus à la HMT globale est identifié.

Ce tronçon est considéré remplacé, puis, la carte est analysée de nouveau. Il est alors possible que le chemin critique ait changé.

Ce procédé est répété itérativement. Nous pouvons alors déduire, l'évolution de la puissance de pompe en tête en fonction de l'investissement consenti sur le remplacement des tronçons :



Le cumul de l'investissement avec les consommations électriques sur 20 ans permettent alors de déterminer le scénario de remplacement optimal :



Sans outils de simulation adéquats, un tel processus itératif est quasiment impossible, d'où l'importance de ceux-ci.

Les principaux logiciels existants sont, par ordre alphabétique :

- Energis (sortie courant 2019)
- Picalor
- Termis



Fédération Nationale des Collectivités Concédantes et Régies

Optimisation et modélisation des réseaux de chaleur

FICHE N°4 – REGULATION
INTELLIGENTE DE RESEAU
DE CHALEUR

Rédigé par : V.BIZOUARD
Relecture : B. TRIMAILLE, B. LACHENAIT, G. PERRIN
Date : 07/05/2019



1. RESUME DE LA FICHE

L'objectif de ces fiches est la vulgarisation de sujets techniques pointus sur le fonctionnement ou les choix techniques des réseaux de chaleur, notamment sur les dernières évolutions technologiques. La prise de décision sur ces sujets peut parfois aboutir sur des décisions non optimisées sur le long terme car visant à l'optimisation directe des investissements. C'est pourquoi il est important que les maîtres d'ouvrage aient des connaissances et des attentes sur le sujet et mobilisent les bons outils pour choisir les moyens en adéquation avec les objectifs fixés.

Ces fiches balaieront l'ensemble du panorama des choix techniques sur les réseaux de chaleur, de la production aux émetteurs finaux en passant par la distribution ; en étudiant quelles sont les méthodes d'optimisation de chacune des facettes.

La présente fiche traite de la régulation sur les réseaux de chaleur, et tout particulièrement des possibilités d'optimisation dans le présent ou dans le futur proche, comme l'utilisation de la prévision de charge ou d'optimisation de fonctionnement sur la base d'intelligence artificielle.

Des outils commercialisés (mais peu utilisés) ou en développement sont présentés et permettent :

- **D'anticiper la charge à venir sur un réseau de chaleur**
- **D'optimiser la température départ pour diminuer les pertes thermiques**
- **D'optimiser la pression différentielle des pompes pour diminuer les consommations électriques**
- **D'optimiser le fonctionnement des différents moyens de production, d'utiliser l'inertie du réseau et des sous-stations afin de diminuer l'utilisation des énergies fossiles**

TABLE DES MATIERES

1. RESUME DE LA FICHE	2
2. ENJEUX	3
3. PREDICTION DE CHARGE	5
3.1. Usage	5
3.2. Intérêts à connaître en avance la puissance appelée	5
3.3. Modèles de prédictions	7
3.3.1. <i>Modèles statistiques</i>	7
3.3.2. <i>Modèles physiques</i>	9
3.3.3. <i>Modèle machine learning</i>	9
4. OPTIMISATION DE LA TEMPERATURE DEPART	13
5. OPTIMISATION DE LA PRESSION	14
6. DECLOISONNEMENT DES SYSTEMES DE REGULATION	18
7. LOGICIELS	20
7.1. Termis Online	21
7.2. Danfoss Mentor Planner	22
7.3. DC Brain	23
7.4. STORM DHC Controller.....	24

2. ENJEUX

Avant-propos

Cette fiche se base en partie sur :

- Notre connaissance, nos expériences et sur les démonstrations qui nous ont été faites des différents logiciels de contrôle de réseau de chaleur,
- Les travaux effectués par DHC+, « Digital roadmap for district heating and cooling » (feuille de route numérique pour le chauffage et la climatisation urbains), écrit par un groupe de travail issu de France, du Danemark, de Suède, d'Allemagne, de Slovénie, de Finlande, de Belgique et du Royaume-Uni. La plateforme technologique DHC+ a lancé un processus de réflexion sur l'avenir du système énergétique et le rôle de la numérisation des différentes parties du système de chauffage et de refroidissement urbain. La feuille de route numérique pour le chauffage et la climatisation urbains offre un aperçu de l'impact de la numérisation, présente l'état actuel de la technique, identifie les obstacles et présente les objectifs, les cibles et les recommandations pour plusieurs sujets.

Axes d'optimisation détaillés dans cette fiche

La régulation d'un réseau de chaleur peut se faire selon les axes suivants :

- Prédiction de charge et déclenchement des appoints

Usage : Pas de prévision hormis l'expérience de l'exploitant. Déclenchement d'un moyen de production supplémentaire par manque de température départ par rapport à la consigne.

Possibilité d'optimisation avec outils commercialisés actuellement : une prévision de charge par un modèle statistique, physique ou d'auto-apprentissage permet d'anticiper les pics de charge et aide l'exploitant à passer les pics de production. Cela permet de diminuer l'utilisation des appoints en énergie fossiles et l'optimisation des éventuelles capacités de stockage situées en sous station.

- Optimisation de la température départ

Usage : La température départ réseau est calculée en fonction de la température extérieure. Sa détermination intègre une marge de sécurité suffisamment haute pour couvrir tous les cas de fonctionnement

Possibilités d'optimisation avec outils commercialisés actuellement : calcul de la température départ réseau minimale. Ce calcul prend notamment en compte les temps de transport du fluide et les besoins réels des usagers. Cela permet d'optimiser les pertes thermiques et diminuer les consommations électriques des pompes réseau.

- Optimisation de la pression différentielle des pompes réseau

Usage : La pression différentielle des pompes réseau est calculée en fonction de la température extérieure. Sa détermination intègre une marge de sécurité suffisamment haute pour couvrir tous les cas de fonctionnement.

Possibilités d'optimisation avec outils commercialisés actuellement : Diverses techniques permettent d'utiliser la juste pression différentielle nécessaire au fonctionnement hydraulique du réseau. Cela permet d'optimiser les consommations électriques des pompes.

- Gestion de l'inertie du réseau et des sous-stations (lissage des pics d'appels de puissance))

Usage: L'inertie du réseau n'est pas utilisée pour lisser la charge. Dans certains cas, des priorités ECS sont utilisées en sous-station pour diminuer la puissance appelée maximale

Possibilités d'optimisation avec outils en développement : Utilisation des différentes inerties pour lisser la puissance appelée et ainsi diminuer l'utilisation des appoints à énergie fossiles.

Ces différents procédés sont détaillés dans la suite de ce rapport.

3. PREDICTION DE CHARGE

3.1. Usage

La manière classique d'enclencher ou non une production supplémentaire se fait par manque de température : si la température de consigne demandée n'est pas atteinte au bout d'une certaine temporisation, alors il faut enclencher un appoint de puissance.

Un exploitant expérimenté sait prendre des décisions manuelles visant à optimiser le fonctionnement des différentes productions, mais sans garantie autre que son intuition et son expérience.

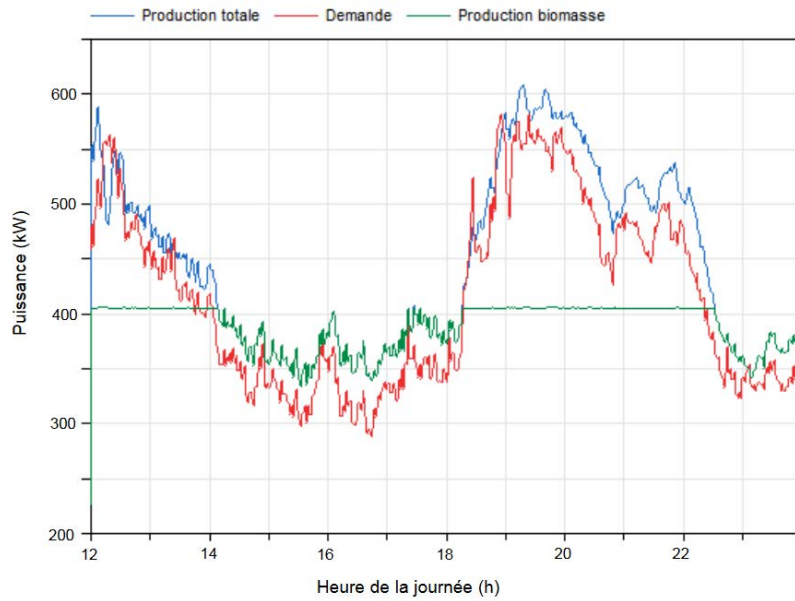
3.2. Intérêts à connaître en avance la puissance appelée

Des solutions de contrôle pour réseau de chaleur classiques (dits de troisième génération) visant à l'écrêtement des pointes existent et permettent de prévoir le fonctionnement d'un réseau de chaleur sur plusieurs heures/jours en avance. Les objectifs sont les suivants :

- Identification des pics de charge à venir nécessitant l'utilisation d'un appoint carboné
Exemple : Réseau fonctionnant en base biomasse et en appoint gaz.

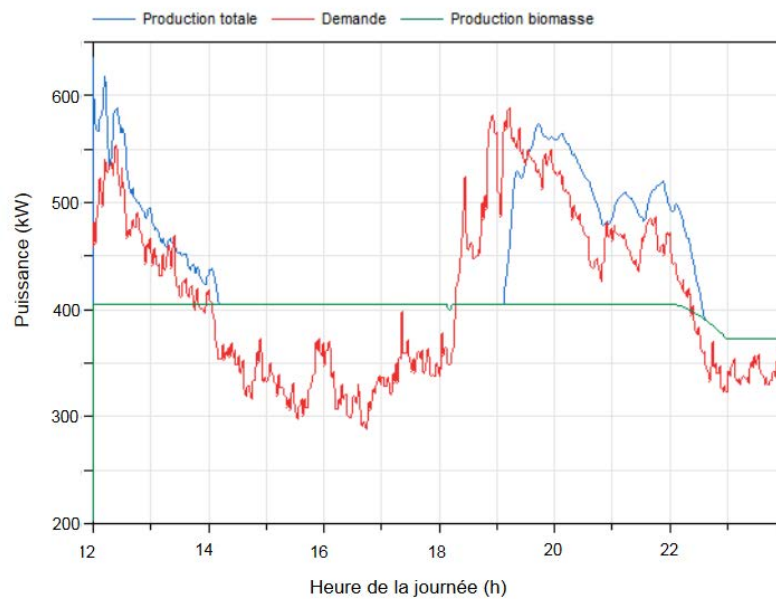
En prévoyant en avance que dans 3 heures les chaudières gaz vont devoir être enclenchées alors qu'à l'instant t la puissance biomasse n'est pas à son maximum, il est possible de stocker de l'énergie dans le réseau. Ce stockage est réalisé en produisant plus de puissance que nécessaire en avance et de la restituer aux sous-stations lors du pic de demande. Ainsi on augmente la part ENR et on diminue l'appoint gaz. Dans ce cas le volume de stockage est le volume d'eau contenu par l'ensemble des tuyauteries du réseau de distribution. L'énergie supplémentaire stockée se fait via une augmentation de la courbe de chauffe du réseau. L'ordre de grandeur de l'énergie stockable, pour un DN moyen de 100, est d'environ 10 kWh/°C/km de réseau. Pour un réseau de 10 km et une augmentation de température de 10°C, l'énergie stockée représenterait 1 MWh.

Les graphes ci-dessous (issus d'une étude ARMINES) montrent, pour un réseau muni d'une chaufferie biomasse en base, l'évolution de la puissance produite et consommée. En fonctionnement standard, l'évolution temporelle des puissances appelées et produites sont les suivantes :

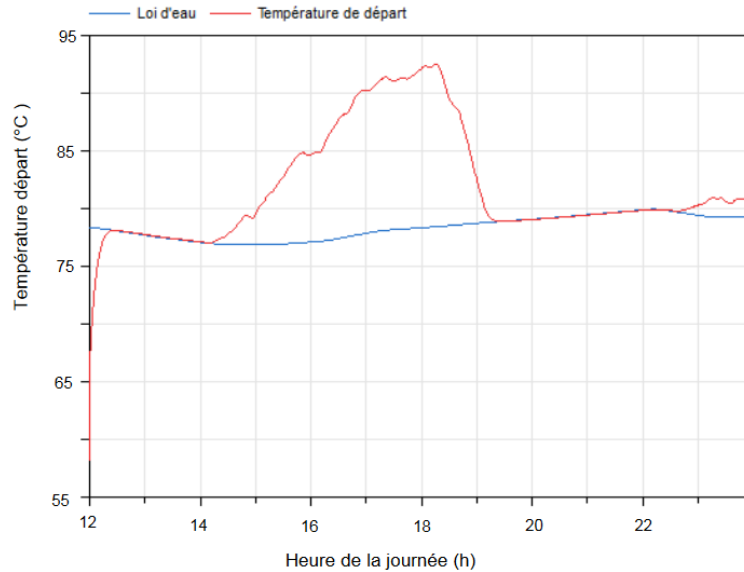


Source : ARMINES

En anticipant l'augmentation de la température départ du réseau par rapport à sa consigne théorique, il est possible de décaler l'enclenchement des appoints et ainsi diminuer la part de l'apport en énergie gaz :



L'écart entre les deux courbes est obtenu par augmentation de la température départ :



- Inversement, l'identification d'une fin de pic de charge permet d'anticiper l'arrêt de l'appoint gaz et bénéficier de l'inertie thermique du réseau et des bâtiments pour qu'aucun manque ne soit ressenti.
- Le calcul des possibilités de priorisation d'enclenchement en fonction des coûts.
- L'optimisation de la température départ réseau et de la gestion de l'inertie des sous-stations nécessitent la connaissance de l'appel de charge

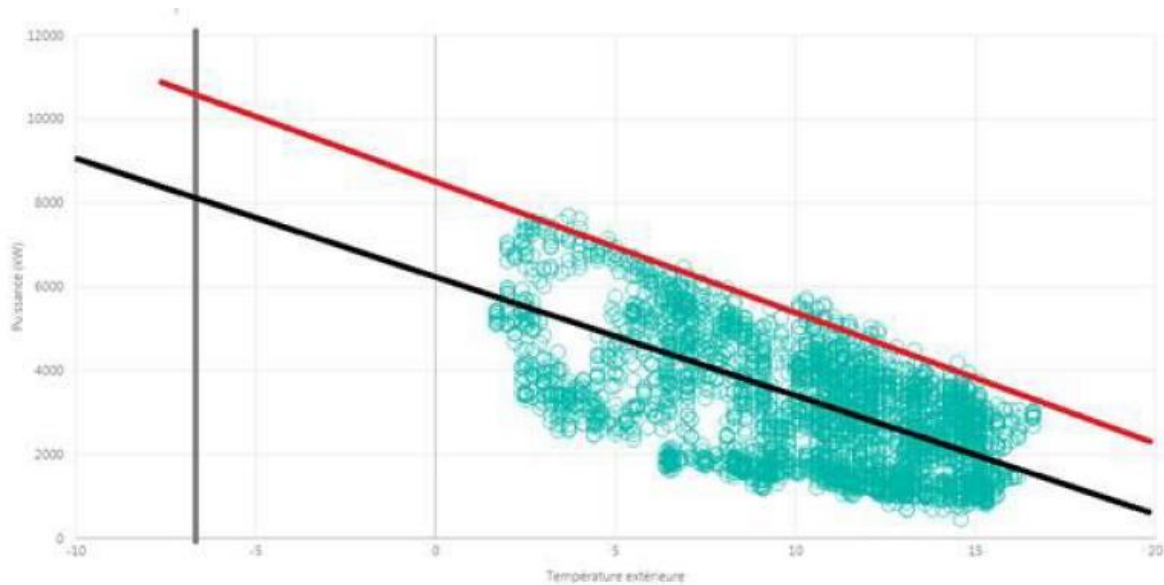
3.3. Modèles de prédictions

Les modèles de prédictions utilisés sont de type statistique ou physique (ou les deux couplés).

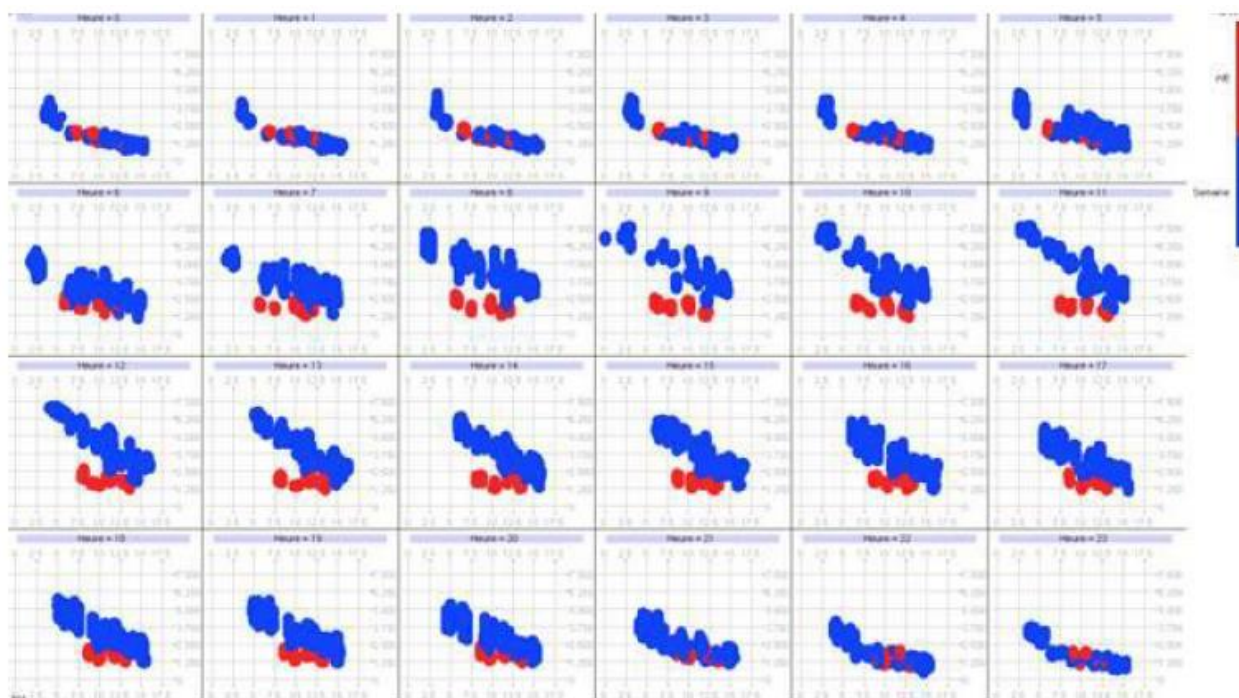
3.3.1. Modèles statistiques

Les modèles statistiques consistent en l'analyse d'historique de points de puissance appelée en fonction de la température extérieure et d'en déduire une courbe comportementale, éventuellement en effectuant des découpages complémentaires en fonction de la saison, du jour et de l'heure de la journée.

Ci-dessous figure un graphe représentatif de la puissance appelée en fonction de la température extérieure :



La variabilité des résultats est très forte (écart type de 2MW environ) et ne peut donner lieu à un modèle prédictif approprié (à 10°C extérieur par exemple, l'appel de puissance varie de 2 à 6 MW). En revanche, en découpant les données par heure de la journée et en semaine / week-end, la variance est divisée par 5. Chacun des graphes ci-dessous représente la courbe de puissance en fonction de la température extérieure pour les 24 heures de la journée (rouge : week-end, bleu : semaine).



Un tel découpage permet de créer un modèle prédictif plus fiable en réduisant significativement la variance.

Cette approche est notamment utilisée par le logiciel de modélisation de réseau Termis pour effectuer un modèle comportemental par type de consommateur.

3.3.2. Modèles physiques

Ce sont des modèles pour lesquels le réseau entier est modélisé, jusqu'aux sous-stations. Couplés à des modèles comportementaux statistiques (par sous station ou par groupe de sous stations) explicités dans le paragraphe précédent, ils permettent de calculer les déphasages d'appels de puissance induits par les temps de transport du réseau.

Ils permettent également d'obtenir des résultats viables quand il y a une modification sur le réseau : nouveau tracé, ilotage d'une partie du réseau, nouvelles sous-stations, destruction de sous-station, chaufferie d'appoint, etc...

, alors qu'un modèle statistique impose de refaire une étude prenant en compte une nouvelle analyse de l'historique.

C'est le cas du logiciel Termis.

3.3.3. Modèle machine learning

Point sur les avancées de l'Intelligence Artificielle (IA) de ces dernières années

L'IA a effectué ces dernières années, grâce à la puissance de calcul des ordinateurs, un bond en avant avec l'utilisation de réseaux neuronaux.

Leur utilisation est en plein essor notamment dans le monde de la finance, banque, assurance, sécurité, médecine, etc.

Le champ d'application va de l'analyse de données qui nous intéresse ici, à l'analyse de structure complexe telle que la reconnaissance d'images.

L'appellation Machine learning regroupe différents algorithmes, des plus simples (régression linéaire simpliste, mais multidimensionnelle) aux plus complexes mais précis (réseaux neuronaux).

Les algorithmes se basent sur l'analyse de grandes quantités de données. Les données sont séparées en deux groupes :

- Le groupe d'entraînement permet à l'algorithme de découvrir les relations existantes entre les différents paramètres
- Le groupe de contrôle est utilisé pour vérifier les résultats de l'algorithme. Il compare ses propositions aux données et en déduit leurs pertinences. Si besoin, il corrige.

Les différents algorithmes de machine learning peuvent être utilisés notamment :

- Pour prédire le futur en estimant les relations entre différentes variables (exemple : prédiction de chiffres de ventes, prévision de la puissance appelée) ;
- Pour identifier des anomalies dans un jeu de données (exemple : fraude bancaire, encrassement d'un échangeur de sous-station, maintenance prédictive) ;
- Pour découvrir une structure dans des données (exemple : proposer un film que quelqu'un devrait aimer en fonction de son historique de visionnage) ;
- Pour classifier des données en différents groupes (Reconnaissance faciale, classification de l'inertie d'un consommateur) ;

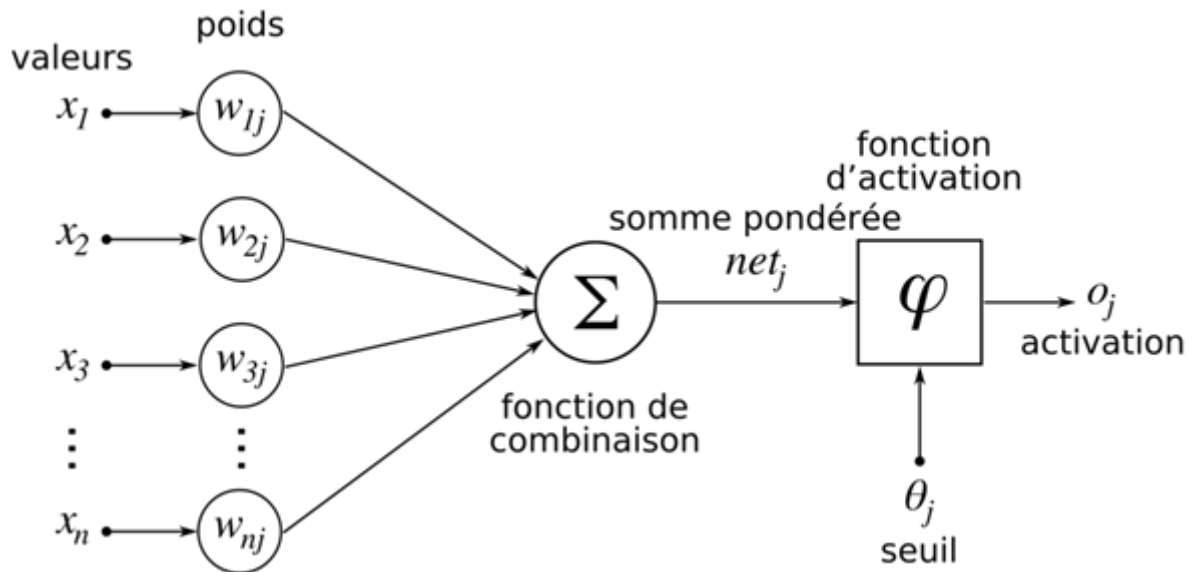
Les réseaux neuronaux sont un type de machine learning. Ils nécessitent une phase d'entraînement longue en temps de calcul. Ils sont cependant très précis et permettent d'effectuer des tâches

complexes telles la reconnaissance faciale ou d'objets, la composition musicale ou des IA conversationnelles.

Encart : pour aller plus loin sur les réseaux neuronaux

Les paragraphes suivant visent à expliquer plus en avant le fonctionnement précis des réseaux neuronaux.

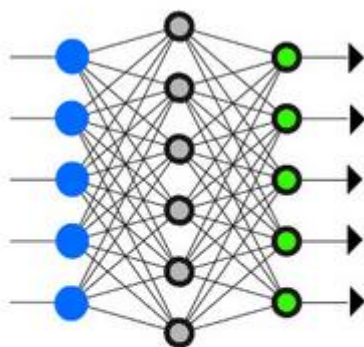
Les réseaux neuronaux consistent en l'empilement par couche d'objets mathématiques appelés neurones. Un neurone prend en entrée des nombres x_1, x_2, \dots, x_i et calcule une sortie Σ en donnant un poids w différent à chaque entrée, et en y ajoutant un biais b : $s = w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_ix_i + b$. Cette sortie est alors passée dans ce qu'on appelle une fonction d'activation permettant d'activer plus ou moins le neurone.



Source : wikipedia

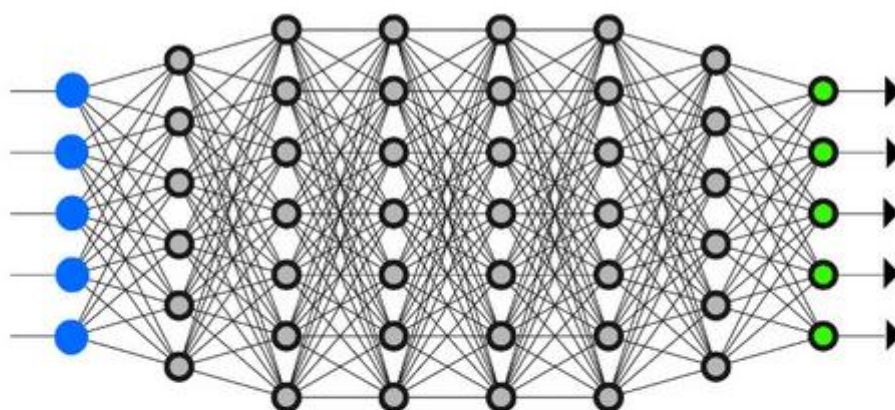
Les sorties des neurones sont utilisés comme entrées pour d'autres neurones, organisés sous forme de couches :




Réseau de neurones simple



Réseau "Deep Learning"

Le réseau d'apprentissage profond contient de nombreuses couches cachées



-  Couche d'entrée
-  Couche "cachée"
-  Couche de sortie

Source : Actua

Il a été prouvé mathématiquement que ce fonctionnement permet d'approximer n'importe quelle fonction. Tout l'enjeu est de découvrir les différents réglages des poids w et b pour les différents neurones. Ceci est effectué à l'aide d'une fonction de coût, définie en simplifiant comme l'écart entre l'objectif et le calcul. La rétroaction modifie les poids afin de minimiser cette fonction de coût, et donc être le plus proche possible du résultat. Ce réglage s'effectue par modifications successives, d'où l'important nombre de données nécessaires lors de la phase entraînement.

Les avantages des réseaux neuronaux sont :

- La parallélisation possible des calculs, les neurones étant indépendants.
- La simplicité mathématique des fonctions utilisées
- Leur grande capacité d'adaptation

Cas des réseaux de chaleur

Dans le domaine de la prédiction sur les réseaux de chaleur, le machine learning peut être utilisé. Les mécanismes d'autoapprentissage permettent de simplifier la modélisation statistique ; ils prennent en

compte de multiples paramètres supplémentaires qui peuvent rentrer de près ou de loin dans l'explication des résultats obtenus. Par exemple, l'irradiation solaire, la vitesse du vent, l'hygrométrie, les plannings d'occupation, etc...

L'autre avantage par rapport à un modèle statistique simple est l'auto-apprentissage. Si le réseau commence à se comporter différemment (pour cause d'extensions, par exemple), l'algorithme va corriger ses prédictions au fur et à mesure en comparant systématiquement la prévision donnée par le modèle à la réalité.

Ces modèles nécessitent une grande quantité de données historiques (environ 2 ans et demi de données heure par heure pour le logiciel Mentor Planner de Danfoss).

Le projet de contrôleur STORM, en cours de développement, fonctionne sur ce principe. Il est actuellement en test sur le réseau de Heerlen au Pays-bas et sur celui de Rottne, en Suède. Voir <http://storm-dhc.eu> pour plus d'informations.

4. OPTIMISATION DE LA TEMPERATURE DEPART

Cette optimisation nécessite une prédiction de charge telle que définie précédemment.

Dans les réseaux traditionnels, la température de fourniture est définie par une courbe de production fonction de la température extérieure mesurée. La plupart du temps, une marge de sécurité est prise en compte dans la courbe : pour une température extérieure donnée, la température départ doit être suffisante pour tous les cas de figures.

En utilisant des solutions de modélisation et de prévision, il est possible d'utiliser une approche plus dynamique pour optimiser la température de fourniture. Sont notamment pris en compte les températures extérieures futures et les temps de transport dans le réseau.

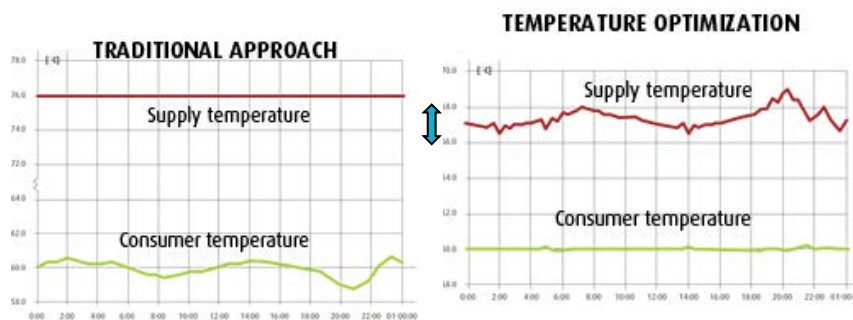
Une plus faible température départ diminue les pertes thermiques mais augmente les consommations électriques. En effet la diminution de l'écart de température entre le départ et le retour réseau engendre une augmentation du débit.

Le logiciel calcule le bon équilibre économique, qui est en général en faveur de la baisse des pertes thermiques.

La température départ est donc calculée pour remplir les conditions suivantes :

- Un coût total global (pertes thermiques et consommations électriques) le plus bas possible,
- Une alimentation assurée de l'ensemble des sous stations,
- Une pompe en capacité physique de fournir le débit demandé par le réseau.

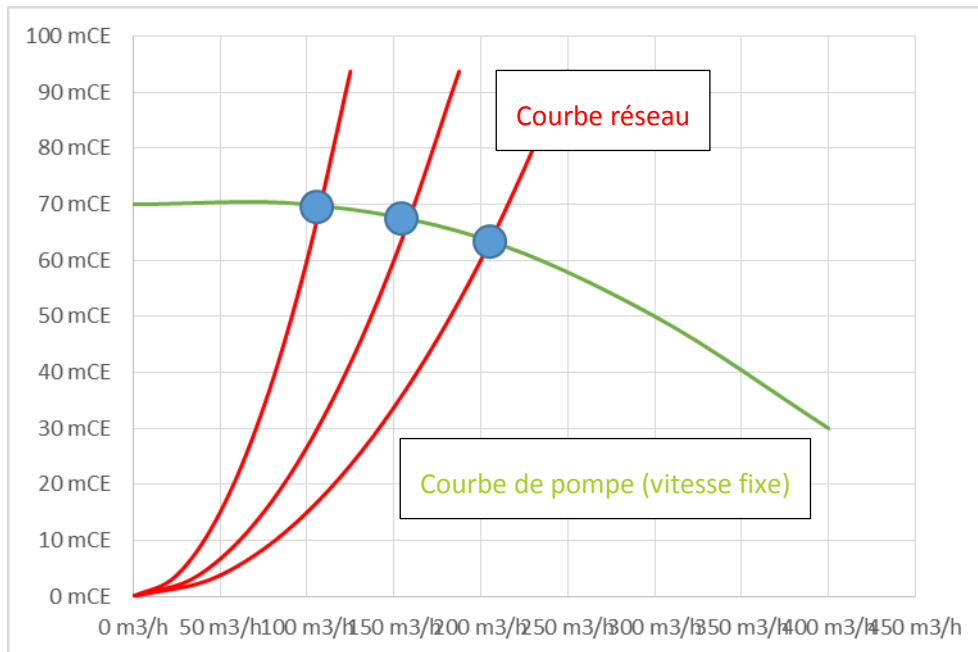
En fonction des réseaux, de l'isolation des canalisations, des régimes de températures, une baisse des pertes thermiques de l'ordre de 5 à 10% est envisageable. La baisse des températures départ favorise également l'utilisation des énergies renouvelables : par exemple, en améliorant les coefficients de performance des pompes à chaleur



Source : Schneider

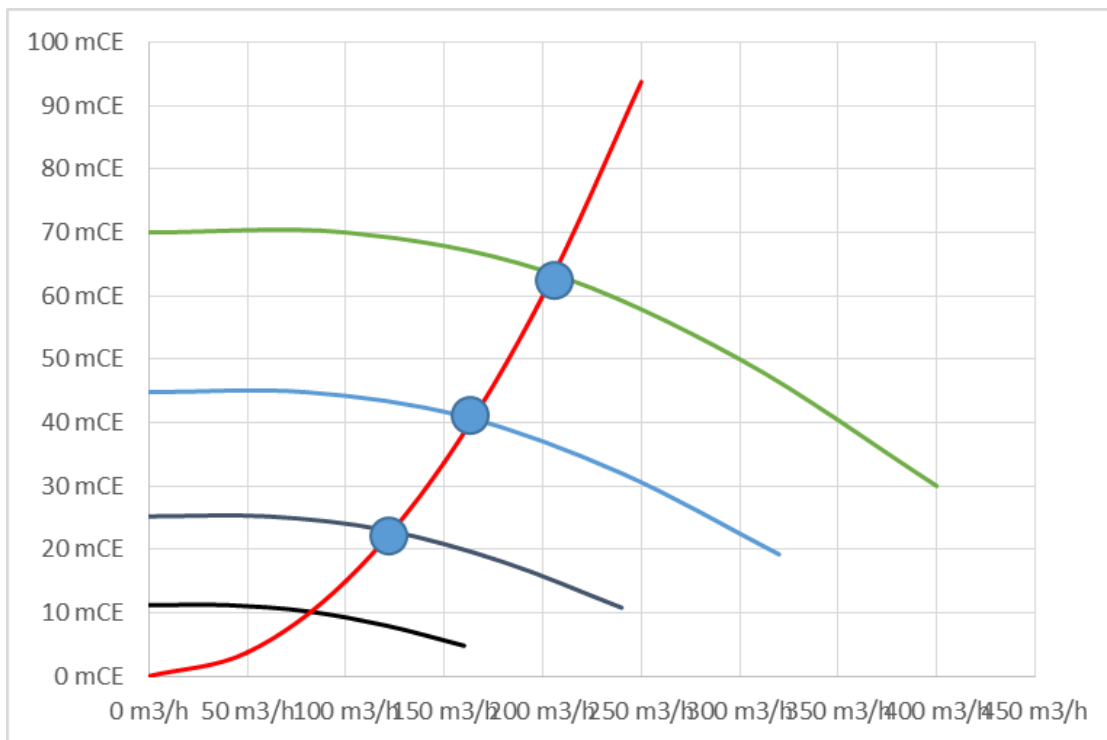
5. OPTIMISATION DE LA PRESSION

Sur un réseau, des pompes ne fournissent pas directement un débit ou une pression différentielle. A une certaine vitesse de rotation du moteur de la pompe correspond une réponse débit/pression qu'on appelle courbe de pompe. En fonction de la résistivité du réseau, le couple débit/pression se modifie.



La puissance électrique nécessaire pour faire fonctionner la pompe est le produit du débit par la pression différentielle divisé par le rendement. Ce dernier diminue quand le point de fonctionnement s'éloigne du point nominal de la pompe de sorte, qu'en vitesse fixe, la pompe consomme toujours une grande quantité d'électricité et ce, même en cas de réduction de débit par fermeture des vannes de régulation en sous-stations.

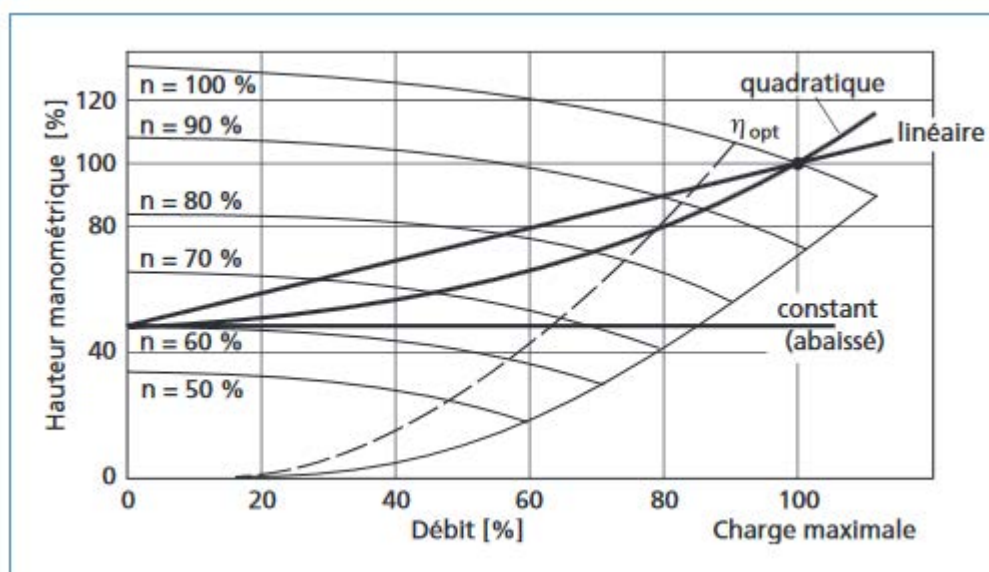
Historiquement les pompes étaient à vitesse fixe ; elles sont aujourd'hui systématiquement équipées d'un variateur de vitesse. En fonction de la vitesse de rotation de la pompe et de la résistivité du réseau, le couple débit/pression évolue ; mais c'est bien une résultante.



L'enjeu, pour optimiser le fonctionnement du réseau de chaleur, est de réguler cette variation de vitesse afin d'envoyer le juste débit à l'ensemble des sous-stations avec la pression minimale nécessaire.

La régulation des pompes réseau peut être effectuée d'une des manières suivantes :

- Avec un contrôle de delta de Pression constant au niveau de la pompe.
- Avec un contrôle de delta de Pression constant au niveau de la pompe, à une température extérieure donnée ; la pression varie en fonction de la température extérieure.
- Avec un contrôle de delta de pression linéaire ou quadratique : la pompe fait varier sa hauteur manométrique (HMT) avec le débit de manière à avoir un point de fonctionnement le plus proche possible de la courbe réseau.

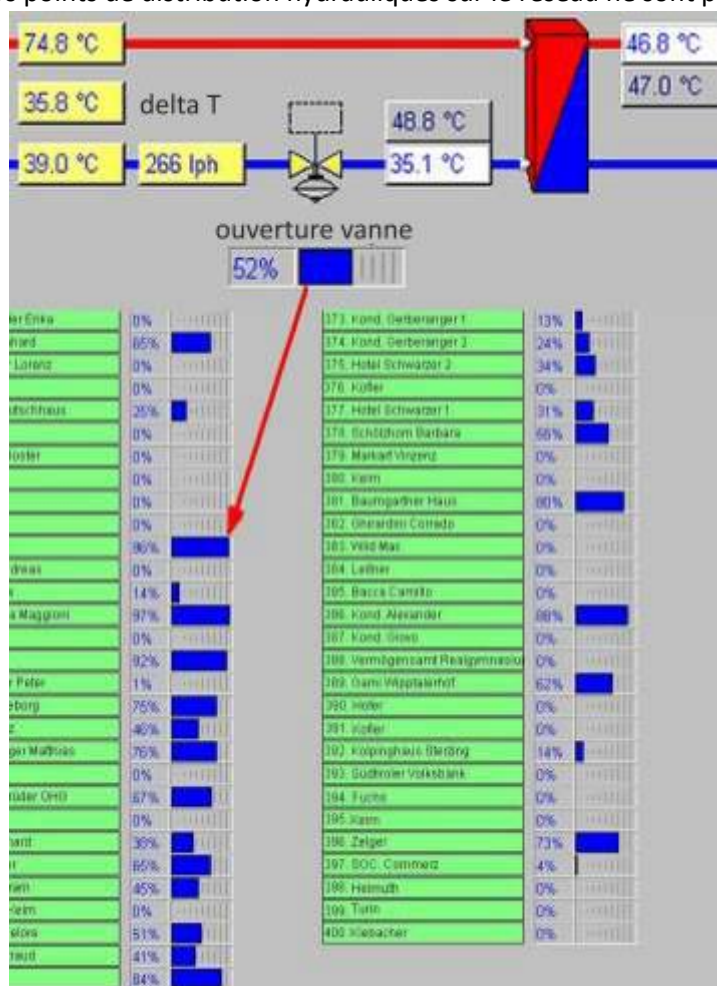


Source : KSB

- Avec une consigne de delta de Pression sur la sous-station critique. Ceci nécessite de disposer :
 - o de sondes de pression différentielle sur la sous-station critique
 - o d'une bonne connexion de données entre les sous-stations et la centrale de production.

La HMT de la pompe (et donc sa consommation électrique) est ainsi optimisée. Cependant ce système ne fonctionne pas si la sous station critique change. Dans ce cas l'ensemble des sous stations critiques probables doivent être équipées de sondes de pression différentielles.

- Par vérification de l'ouverture des vannes de régulation en sous station sur l'ensemble du réseau. La régulation des pompes est adaptée au taux d'ouverture des vannes afin qu'aucune ne soit ouverte à 100% (signe d'un défaut), mais qu'elles ne soient pas trop fermées (signe d'une surpression). Ce système nécessite que toutes les sous-stations remontent l'information d'ouverture de vanne, et une bonne connexion de données. Le système permet le fonctionnement même en cas de déplacement de la sous-station critique. En revanche, les cas où il y a plusieurs points de distribution hydrauliques sur le réseau ne sont pas traités.



Source : Schneid

Le fonctionnement en variation de vitesse par rapport à un fonctionnement en vitesse fixe permet d'obtenir des réductions importantes de consommations électriques.

Cas des réseaux multi production

Disposer de plusieurs points de production sur le réseau a de multiples avantages, notamment un dimensionnement moins important des canalisations principales et une plus grande flexibilité d’approvisionnement notamment en cas de fuite.

Quand un réseau possède plusieurs centrales de production, le fonctionnement se fait selon un des modes suivants :

- **Ilotage** : Lors de leur utilisation, les centrales secondaires ilotent (via des vannes de coupures) une partie du réseau qu’elles alimentent ensuite à 100%. Les centrales secondaires ne peuvent être que des énergies d’appoint fossile, car l’utilisation d’ENR&R ne serait pas optimisée du fait du caractère tout ou rien de l’utilisation.
- **Jonction** : il y a des canalisations de jonctions entre les productions « annexes » et la production principale (ce qui est possible si celles-ci ne sont pas trop éloignées). Dans ce cas l’architecture revient à dire qu’il n’y a finalement qu’un unique point d’injection de chaleur.
- **Appoint** : il y a déconnexion hydraulique entre les différentes productions. La production annexe est à la fois appoint et relai hydraulique de la production principale. De cette manière, la production annexe ne peut alimenter que les sous-stations en aval de celle-ci, et ne peut donc être utilisée à 100% de sa capacité ; ce qui est dommageable si c’est une ENR&R.
- **Multi-centrales** : Même s’il existe des centrales prioritaires en termes d’allumage, toutes fournissent de l’énergie au même réseau sans aucun découplage hydraulique. Les sous-stations sont alimentées par une des centrales ou par un mélange issu de plusieurs centrales. Chaque centrale peut possiblement envoyer dans l’ensemble du réseau, ce qui permet de disposer de toute la puissance appelée du réseau pour valoriser une production ENR&R. En revanche, ce fonctionnement est complexe hydrauliquement et en termes de pilotage. Les pompes de chaque centrale doivent prendre en compte l’existence des pompes des autres centrales. Elles doivent ainsi générer une contre-pression permettant de vaincre les pressions générées par leurs homologues.

Au niveau du dimensionnement des pompes et des canalisations, différents cas doivent être prévus. Il est nécessaire de calculer l’évolution des zones d’influences entre les différentes centrales et tenir compte des positionnements des sous-stations critiques (sous-stations disposant du moins de pression différentielle - voir fiche Sous-stations primaire). Cette approche ne peut être réalisée que par une simulation thermohydraulique du réseau par un logiciel de type Termis.

Au niveau de la régulation, une méthode usuelle est de faire fonctionner une pompe avec une des méthodes exposées précédemment, et l(es) autre(s) pompe(s) avec une régulation en débit. Cela consiste à :

- Fixer la puissance que l’on souhaite faire apporter sur le réseau par la centrale,
- En déduire le débit nécessaire,
- Augmenter ou réduire la vitesse de la pompe en fonction du débit mesuré à l’aide d’un débitmètre. De cette façon, la pression à créer n’est pas une consigne, mais une résultante.

Pour optimiser au mieux, il est également possible d’utiliser les résultats de calcul en temps réel d’un logiciel de modélisation thermohydraulique tel que Termis online afin d’alimenter les consignes de delta de Pression des différentes pompes.

6. DECLOISONNEMENT DES SYSTEMES DE REGULATION

Actuellement, le contrôle de chauffage urbain se compose d'un certain nombre de systèmes décentralisés tant au niveau de la production (chaufferie) que des utilisateurs (sous-stations). Il n'y a pas d'interactions entre eux : chaque système a un objectif de contrôle individuel ; ce qui ne conduit pas à un contrôle optimisé du système global.

Les modèles statistiques ou physiques ne sont pas ou peu adaptés aux réseaux complexes (quatrième génération). En effet, les principaux objectifs de la transition vers des systèmes de chauffage urbain de quatrième génération sont la maximisation de l'intégration de sources de production de chaleur durables (énergies renouvelables et la récupération). Par rapport aux réseaux traditionnels, les réseaux de 4ème génération deviennent de plus en plus complexes, avec de multiples sources de production de chaleur voire même des « prosomateurs » (contraction de consommateurs et producteurs, c'est-à-dire des sous-stations qui peuvent donner ou prendre de l'énergie au réseau). Au niveau de la production, sans contrôle intelligent englobant l'ensemble des chaufferies et sous-stations, l'optimisation des sources durables ne sera jamais possible. En effet, les sources d'énergie durables sont souvent incontrôlables, intermittentes et même partiellement imprévisibles ; d'où la nécessité de nouveaux types de contrôleurs de réseaux de chaleur.

Les sources d'énergie renouvelables sont souvent très fluctuantes :

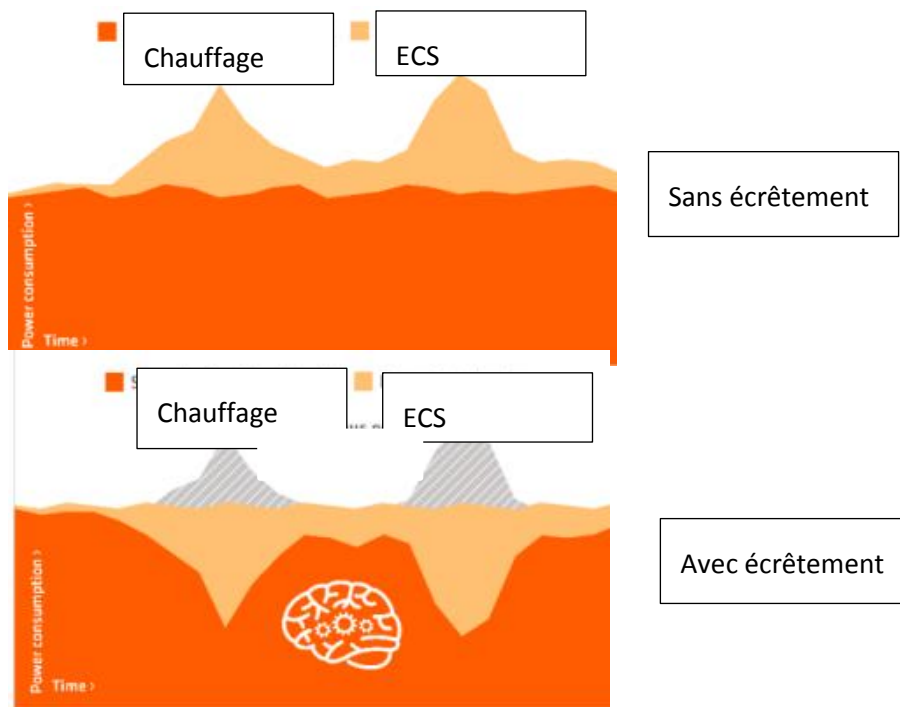
- L'énergie solaire thermique est par exemple fortement influencée par la présence de nuages dans le ciel.
- Bien qu'il soit plus facile de contrôler l'excès de chaleur provenant de l'industrie, celle-ci est un sous-produit des besoins directs de l'industriel.

C'est par un contrôle intelligent des sources de chaleur contrôlables (comme les centrales de cogénération, les chaudières, les pompes à chaleur...), que ces sources fluctuantes peuvent être utilisées à leur maximum.

Souvent, la source d'énergie durable des réseaux de chaleur n'est pas dimensionnée en fonction de la demande de pointe du réseau de chaleur. En effet il n'est pas rentable de concevoir une source de chaleur assez coûteuse pour un nombre limité d'heures de fonctionnement. Les pics sont souvent couverts par des chaudières à combustible fossile. L'écêtement des pointes de consommations, une forme de contrôle intelligent, peut cependant maximiser le fonctionnement de la source durable. Comme vu précédemment, il peut s'agir de production anticipée en jouant sur les moyens de production, ou l'utilisation d'un stockage en centrale. Mais il peut également être possible d'utiliser l'inertie thermique des bâtiments pour passer les pics de puissance qui nécessiteraient le déclenchement des appoints.

Par exemple, s'il est calculé que dans quelques heures, un pic de puissance du réseau devrait déclencher des appoints en production, alors une possibilité pourrait être de réduire la puissance transmise à une sous-station disposant d'une grande inertie thermique. Mais ceci n'est possible qu'avec des mesures sur le circuit secondaire telles que les températures intérieures pour vérifier que ces baisses de puissances ne s'effectuent pas au détriment du confort, et le droit d'agir sur la régulation secondaire.

Exemple d'écêtement de pic au niveau d'une sous-station :



Source : Danfoss LeanHeat AI

Cependant un certain nombre d'obstacles sont à surmonter, notamment :

- Un système de contrôle globalisé nécessite des mesures et une prise de contrôle de la régulation du système secondaire. Or dans la majorité des cas, le périmètre contractuel est distinct entre les installations primaires et secondaires. Le consommateur doit permettre à l'opérateur du réseau de gérer en quasi intégralité la sous-station ; il garde juste la possibilité de fixer ses exigences de confort.
- Les modèles d'affaires actuels n'incitent pas les propriétaires à permettre à leurs bâtiments d'agir comme source de flexibilité thermique (qui peut donc être utilisée pour la gestion de la charge de pointe).
- Dilemme utilisateur-investisseur : des investissements sont nécessaires pour permettre au bâtiment de déplacer sa charge, mais les avantages (prix de la chaleur moins élevé) sont répercutés sur l'utilisateur, l'investisseur n'a donc pas de motivation pour investir.
- Les modèles de tarification de la chaleur ne sont pas ajustés pour stimuler un contrôle intelligent. Des modèles de tarification horaire ou des modèles réglementaires de comportement similaires pourraient être utiles pour orienter la demande des clients et les charges de production. (Voir fiche Police d'abonnement)

7. LOGICIELS

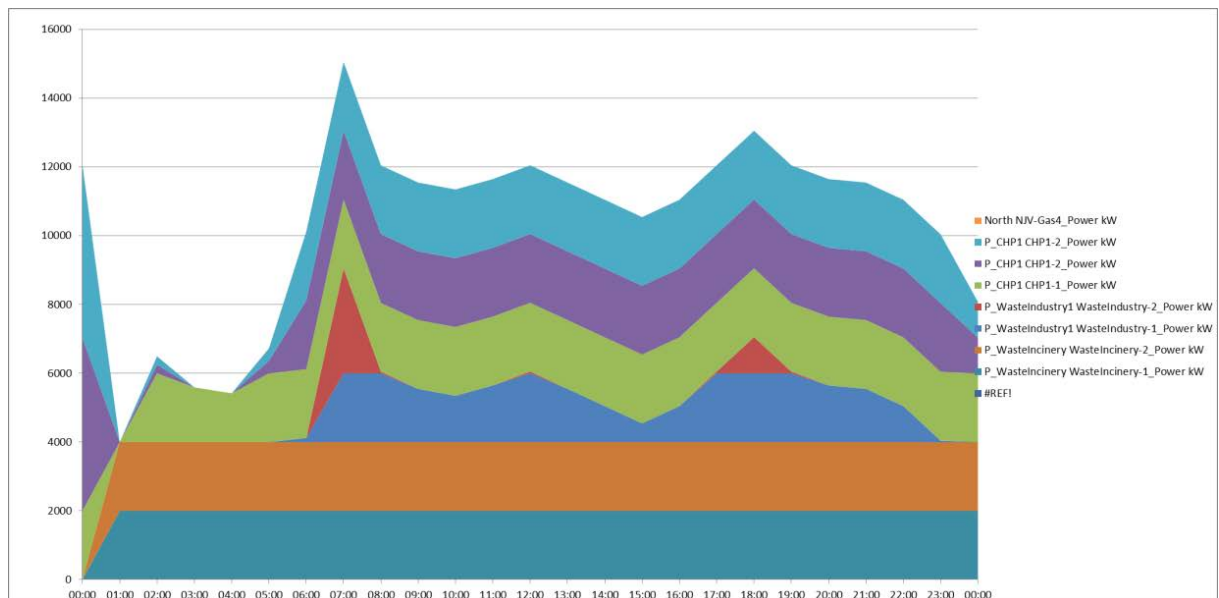
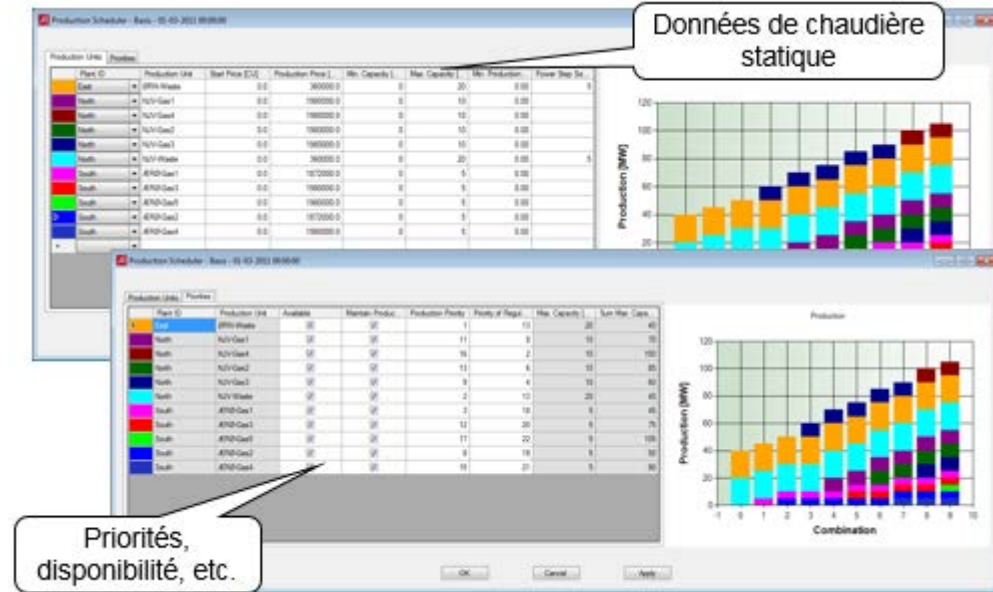
Le tableau suivant récapitule les caractéristiques de trois logiciels ayant attiré notre attention.

Logiciel	Termis (Aveva)	Mentor Planner (Danfoss)	DC Brain	STORM DHC Controller
Etat de développement	Commercialisé	Commercialisé	Commercialisé/test	Recherche (phases de tests sur réseaux réels)
Modélisation thermohydraulique	Oui	Non	Non	Non
Modèle de prédiction	Physique + Statistique	Machine Learning	Machine learning	Machine Learning
Règles d'engagement des centrales	Oui	Oui		Oui y compris « Prosommateurs »
Optimisation de la température départ	Oui	Oui	Non	Oui
Optimisation de la pression (cas des réseaux multiproduction)	Oui	Non	Non	Oui
Auto-apprentissage / Correction	Non	Oui	Oui	Oui
Préconisation d'écrêtement des pics	Par stockage tampon en centrale uniquement	Par stockage tampon en centrale uniquement	Non	Oui : stockage, inertie du réseau, inertie des bâtiments
Implantation sur réseau de chaleur	La Défense (Enertherm) – Réseau chaud et froid	De nombreux réseaux de chaleur européens mais aucun français	Saint-denis (ENGIE) Boulogne (IDEX) Créteil (DALKIA)	Rottne (Suède), Heerlen (Pays-bas)

7.1. Termis Online

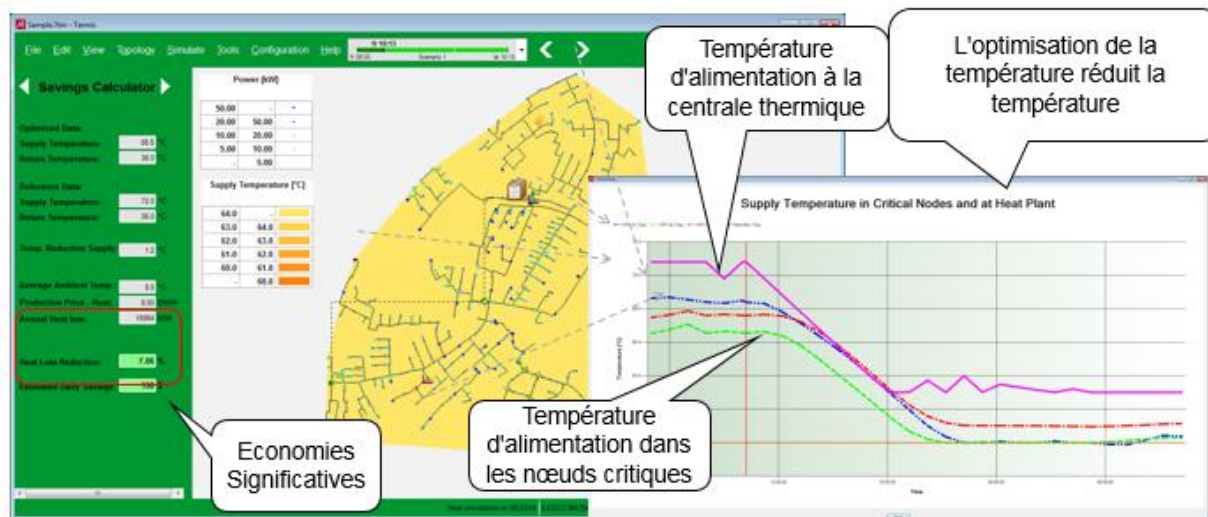
La société Aveva commercialise un logiciel de simulation thermohydraulique de réseau de chaleur appelé Termis. La version dite Online est connectée et associée à un modèle comportemental des sous-stations et des centrales. Le logiciel :

- Reçoit les données du système SCADA comme des informations prévisionnelles sur les conditions météorologiques au travers de différents « Data Services » (OPC Serveur, BDD, fichiers textes, Excel...).
- Prévoit la consommation future en continue et les règles d'engagements des différentes centrales



Exemple :Prévision d'engagement des différents moyens de production sur les 24 prochaines heures

- Propose un fonctionnement d'optimisation de la température départ tel que décrit dans le chapitre « optimisation de la température départ »



Vue du logiciel avec calcul de la température départ optimale proposée

- Effectue des simulations pour calculer en tous points du réseau l'ensemble des paramètres thermiques et hydrauliques. Ces simulations sont :
 - Effectuées périodiquement pour définir les résultats actuels et futurs (maximum 72h) basés sur la prévision de puissance.
 - Capables de calculer l'ensemble des paramètres hydrauliques en tous points (nœuds, canalisations, centrales, vannes, pompes...)

Les résultats peuvent être visualisés sous forme de thèmes graphiques pour faciliter l'interprétation

Le fait de fonctionner avec un modèle physique est à la fois une force (meilleure compréhension du fonctionnement du réseau, pression, etc.) et une faiblesse (un changement physique du réseau nécessite une mise à jour manuelle du modèle et une nouvelle calibration, à contrario des modèles machine learning où la correction est automatique).

7.2. Danfoss Mentor Planner

La société Danfoss commercialise un système de planification de production appelé Mentor Planner. Un exemple nous a été montré sur un cas simple avec gestion d'une cogénération associée à un stockage d'énergie et des appoints gaz. Le système est également utilisé sur des réseaux solaires.

Pour la création du modèle, le logiciel utilise un réseau neuronal / machine learning sur une à deux années d'historiques. Cela permet de créer une prédiction des besoins de chaleur et de puissance appelée réseau en fonction de divers paramètres (température extérieure, irradiation solaire, vitesse du vent, jour de la semaine / jour férié, mois, etc).

Ces données sont couplées :

- à un modèle météo qui permet de calculer la puissance appelée du réseau sur les 3 prochains jours
- à un prix de vente prévu de l'électricité (ici valable dans le cas de la cogénération).

Les règles d'engagement des différents moyens de production sont alors calculées. Ci-dessous, un exemple composé d'une cogénération associée à un stockage. Le prix de vente de l'électricité est variable. Le système optimise le tout :

- en surproduisant avec la cogénération (courbe du milieu, trait violet) quand le prix de l'électricité est haut (Barres vertes des graphes du dessous = prévision de prix, barres rouges = prix réel),
- en stockant le surplus de production quand le prix de l'électricité est haut (niveau de stockage = courbe bleue sur le graphique du milieu), et déstockant quand il est bas :



Cet exemple est peu applicable en France (les prix de vente de l'électricité cogénération sont la plupart du temps fixes), mais montre le potentiel.

Le Mentor Planner permet également :

- Le calcul de la température départ optimale tel que vu dans le chapitre « optimisation de la température »
- L'engagement optimal des différents producteurs, en prenant en compte les capacités et caractéristiques de chaque production (montée en charge, coût, CO2, etc.)

Contrairement à Termis, le réseau n'est pas modélisé ce qui est à la fois un avantage (la modélisation est moins contraignante) et un désavantage (non connaissance du fonctionnement du réseau, ce qui peut poser une limitation en présence de multi-centrales).

Comme il est basé sur du machine-learning, le modèle s'adapte automatiquement aux modifications de comportement.

7.3. DC Brain

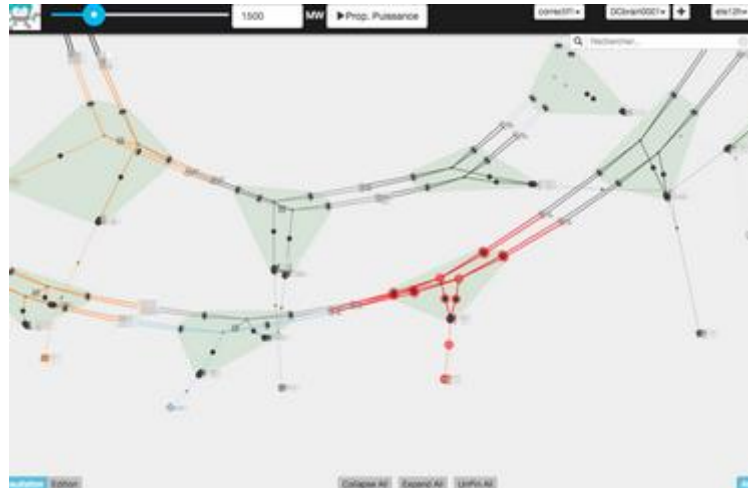
DC Brain est un logiciel basé sur le machine learning visant à exploiter la richesse des données d'un réseau de chaleur facilement.

Les grandes fonctionnalités sont :

- Datavisualisation des données
- Anticipation des dérives de consommations

- Identification d'anomalies sur le réseau (fuite, surpression, incident, etc.)
- Analyse automatique d'impact de pannes
- Simulation d'évolution du réseau (intégration de nouveaux points de production, nouveaux clients, ...)

Le logiciel n'a pas de modèle thermohydraulique. Il ne semble pas proposer d'optimisation de pilotage tel que défini dans ce rapport.

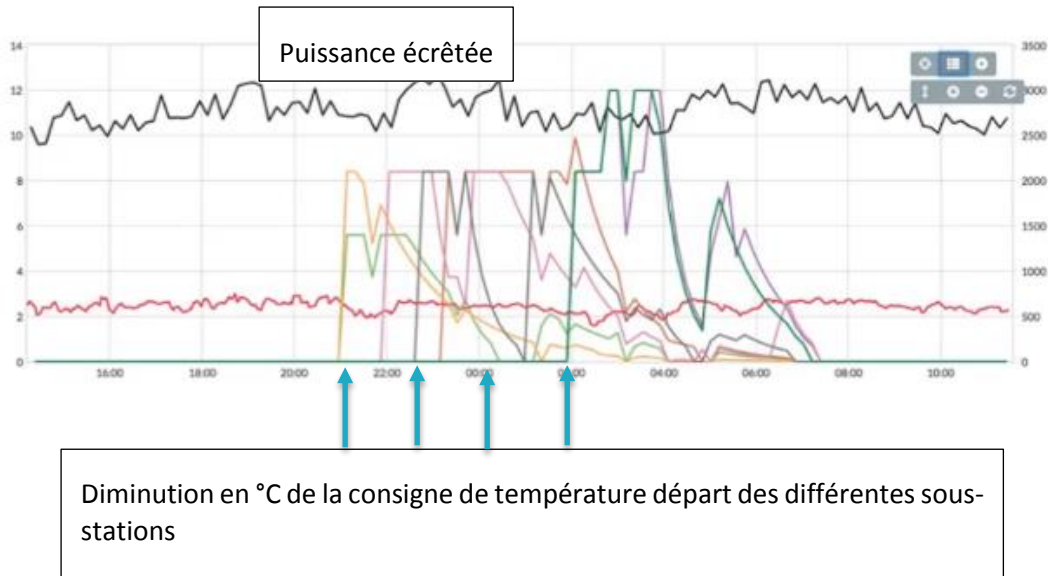


7.4. STORM DHC Controller

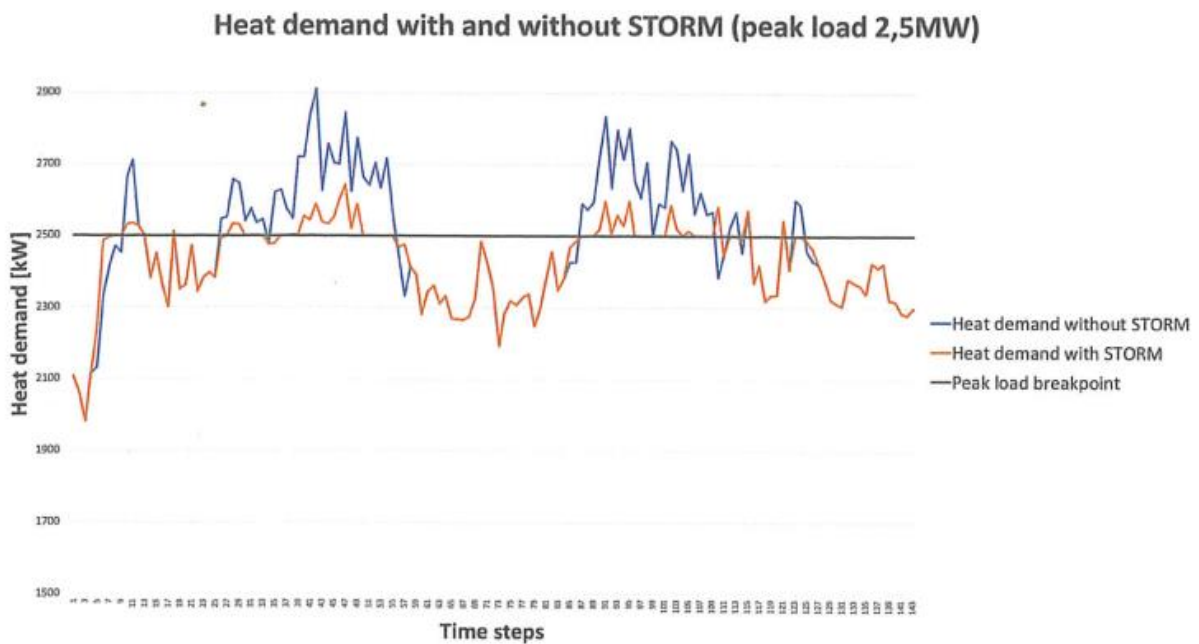
Le projet Européen STORM DHC est un projet visant à créer le contrôleur ultime et regroupant une grande partie des objectifs décrits ci-dessus.

Pour créer le modèle de prévision de charge, l'équipe de recherche a testé plusieurs algorithmes de réseaux neuronaux (machine learning) différents, et constatés qu'en fonction des saisons, certains algorithmes étaient plus précis que d'autres. Aussi, un algorithme maître, également basé sur le machine learning, est chargé d'évaluer au fil de l'eau l'efficacité des différents algorithmes prédictifs afin de choisir duquel ou du mélange desquels la prédiction finale est issue. Comme il s'agit de modèle avec auto-apprentissage par boucle de rétroaction, le modèle s'adapte aux modifications structurelles du réseau. Le résultat est un modèle de prévision robuste.

Un deuxième bloc du logiciel comprend la notion de lissage des pics de production par utilisation de l'inertie thermique de certains consommateurs partenaires, tout en leur garantissant un niveau de confort. Habituellement au niveau des sous-stations, la température départ secondaire est régulée par l'intermédiaire d'une vanne de régulation primaire en fonction d'une température extérieure. En cas de détection d'un futur déclenchement des appoints, le logiciel rentre dans une phase de « négociation » avec les différentes sous-stations identifiées pour permettre l'écrêtage tout en permettant le confort des usagers. A Rottne en Suède, où Storm est utilisé, cet écrêtage a permis de réduire l'utilisation de 13% des énergies d'appoint. En avril 2018, une réduction de 57% a pu être atteinte.



Source : Storm DHC sur le réseau de Rottne



Source : Storm DHC sur le réseau de Rottne – Cmparaison de la charge thermique du réseau de Rottne avec et sans controlleur Storm

Le Storm controller permet également une stratégie d'interaction avec le marché de l'électricité (similaire au danfoss mentor planner), et un processus d'équilibrage de la production/consommation pour les réseaux à boucle d'eau tempérée avec pompe à chaleur.



Fédération Nationale des Collectivités Concédantes et Régies

Optimisation et modélisation des réseaux de chaleur

FICHE N°5 – PRIMAIRE DES
SOUS-STATIONS

Rédigé par : V.BIZOUARD

Relecture : G. PERRIN

Date : 03/07/2019



1. RESUME DE LA FICHE

L'objectif de ces fiches est la vulgarisation de sujets techniques pointus sur le fonctionnement ou les choix techniques des réseaux de chaleur, notamment sur les dernières évolutions technologiques. La prise de décision sur ces sujets peut parfois aboutir sur des décisions non optimisées sur le long terme car visant à l'optimisation directe des investissements. C'est pourquoi il est important que les maîtres d'ouvrage aient des connaissances et des attentes sur le sujet et mobilisent les bons outils pour choisir les moyens en adéquation avec les objectifs fixés.

Ces fiches balaieront l'ensemble du panorama des choix techniques sur les réseaux de chaleur, de la production aux émetteurs finaux en passant par la distribution ; en étudiant quelles sont les méthodes d'optimisation de chacune des facettes.

La présente fiche traite de la partie primaire des sous-stations. Les points de vigilance sur les primaires des sous-stations sont :

- **Le dimensionnement des échangeurs doit prendre en compte les régimes secondaires réels des sous-stations.** C'est un point important souvent laissé de côté à toutes les étapes d'une DSP : le Maître d'Ouvrage n'a pas les informations et ne les fournit pas aux candidats. Les candidats considèrent des valeurs génériques et basent leur offre dessus. Ce n'est qu'après attribution où, parfois, l'entreprise attributaire vérifie ces points. Or, en fonction des températures, des optimisations pourraient être proposées par les candidats (cascades entre sous-stations par exemple, optimisation de diamètre, optimisation de la production), qui bénéficie alors au délégant. **Aussi est-il important de spécifier ces données dès l'appel d'offre, ce qui nécessite un travail d'étude complémentaire afin d'aller relever les régimes de fonctionnement**
- **La température primaire de dimensionnement des échangeurs, qui doit être la plus basse possible** pour permettre une température départ centrale faible et ainsi une diminution des pertes thermiques
- **Le pincement retour de dimensionnement des échangeurs doit être faible** afin de diminuer les pertes thermiques, diminuer les consommations électriques des pompes, optimiser le fonctionnement de certaines production (voir fiche n°0, objectifs des fiches)
- **Les vannes de régulation doivent être judicieusement dimensionnées** afin d'éviter une mauvaise précision, créant des surdébits, des températures retour côté primaire et des surchauffes côté secondaire
- **La solution la plus adaptée pour l'équilibrage est l'utilisation de vanne à pression différentielle ou de vanne de régulation indépendante de la pression**, particulièrement sur les réseaux en source de production multiple, avec consommateurs aux profils de charge différents et avec HMT de pompes primaires importants. Pour ces réseaux, l'efficacité des vannes d'équilibrages statiques standards est médiocre, notamment à faible charge. Imposer ce point est important car tous les exploitants n'ont pas encore intégré ce processus.

Cette fiche a été rédigée avec l'aimable participation de DANFOSS.

TABLE DES MATIERES

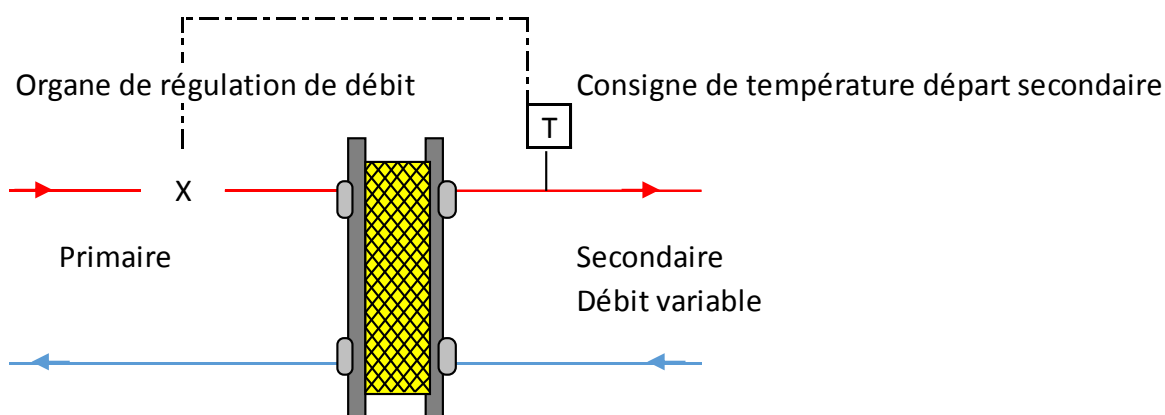
1. RESUME DE LA FICHE	2
2. ENJEUX	4
2.1. Fournir la température demandée au secondaire et la puissance à transmettre avec une température primaire la plus faible possible.	4
2.2. Ne pas rehausser outre-mesure la température retour entre le secondaire et le primaire, à débit nominal (pincement retour)	5
2.3. Transmettre la puissance avec le juste débit nécessaire, sans surdébit par rapport au débit nominal.	6
3. ROLE DE L'EQUILIBRAGE	7
4. ORGANE DE REGULATION PRIMAIRE	8
4.1. Organe de régulation primaire : la vanne trois voies	8
4.2. Organe de régulation primaire : la vanne deux voies	9
4.3. En résumé :	13
5. COMMENT BIEN EQUILIBRER	14
6. COUTS ET BENEFICES	17

2. ENJEUX

Le primaire d'une sous-station désigne la partie hydrauliquement connectée au réseau de chaleur au niveau d'un point de livraison, et est sous la responsabilité de l'exploitant primaire.

Il est constitué d'un ou plusieurs échangeurs de chaleur, d'organes de régulation, d'organes d'équilibrage.

La régulation se fait par l'intermédiaire d'une vanne modifiant le débit primaire arrivant à l'échangeur afin de modifier la température départ secondaire.



Le choix des technologies et des choix de dimensionnement des échangeurs et des vannes va déterminer la capacité de la sous-station à :

2.1. Fournir la température demandée au secondaire et la puissance à transmettre avec une température primaire la plus faible possible.

Dépend

Du dimensionnement de l'échangeur (surface d'échange). Plus la surface d'échange est importante, plus l'écart entre la température départ secondaire et la température du réseau primaire (pincement départ) peut être faible.

Exemple

Un échangeur de production d'eau chaude sanitaire doit pouvoir rehausser côté secondaire une température de 10°C (eau froide) à une température de 55°C (température de distribution de l'eau chaude sanitaire). La température primaire nécessaire varie avec la taille de l'échangeur. Pour fonctionner avec une température primaire de 60°C plutôt qu'une température de 80°C, l'échangeur doit être deux fois plus gros (mais seulement de 20 à 25% plus cher)

Impact sur l'efficacité énergétique du réseau

La température départ primaire en sortie de centrale doit être supérieure ou égale à la plus grande des températures départ primaire de dimensionnement de chaque sous-station.

Par exemple, sur un réseau de 100 sous-stations ;

- 99 sous-stations (par exemple des bâtiments neufs nécessitant des températures faibles) ont des besoins en température primaires de 60°C.
- 1 sous-station (un hôpital ancien non rénové) a un besoin primaire de 90°C.

Par conséquent : la température départ nécessaire pour *l'ensemble du réseau* est de 90°C au lieu de 60°C sans cette dernière sous-station. Les pertes thermiques sur le réseau départ augmentent de +60%.

Avoir des températures primaires de dimensionnement faibles permet l'abaissement de la température générale, et donc la réduction des pertes thermiques et l'utilisation des ENR basses températures telles que la géothermie. Ceci est particulièrement important pour l'eau chaude sanitaire (ECS) afin de pouvoir abaisser les températures l'été et permettre aux réseaux avec géothermie de fonctionner sans appoint durant cette période.

2.2. Ne pas rehausser outre-mesure la température retour entre le secondaire et le primaire, à débit nominal (pincement retour)

Dépend

Du dimensionnement de l'échangeur (surface d'échange)

Impact sur l'efficacité énergétique

Obtenir une température retour plus faible en sous-station permet d'obtenir une température retour plus faible en chaufferie ; donc, comme vu en fiche n°0, diminution des pertes thermiques et amélioration des performances des productions nécessitant de faibles température retour (condensation, géothermie, pompe à chaleur, etc.)

2.3. Transmettre la puissance avec le juste débit nécessaire, sans surdébit par rapport au débit nominal.

Dépend

Du dimensionnement et choix techniques de la vanne de régulation et d'équilibrage

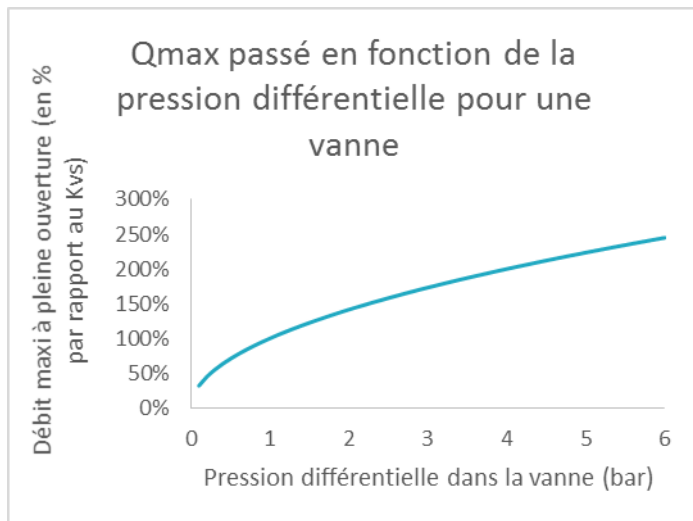
Impact sur l'efficacité énergétique du réseau

Un débit non maîtrisé en sous-station entraîne :

- Une augmentation du débit primaire et donc des consommations électriques de pompage supplémentaire
- Oscillations de la température départ secondaire
- Augmentation de la température retour primaire

Les raisons et les conséquences de ce point sont expliquées en détail dans les paragraphes suivants.

3. ROLE DE L'ÉQUILIBRAGE



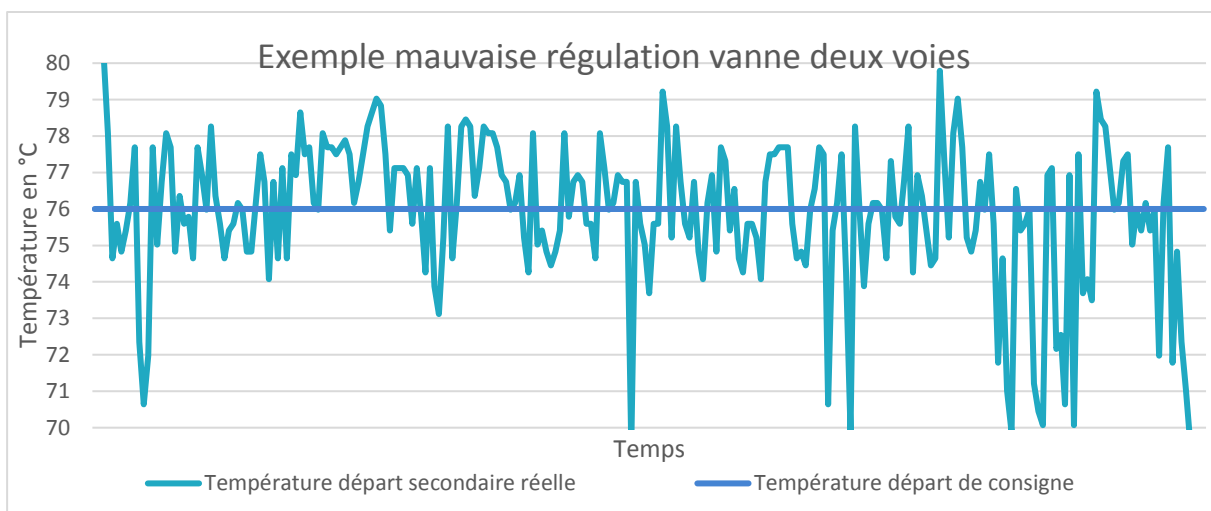
Le débit nominal à pleine ouverture que peut faire passer une vanne de régulation (deux ou trois voies) est directement lié à la différence de pression disponible à ses bornes.

Plus la pression est importante, plus le débit à pleine ouverture sera important.

L'objectif de l'équilibrage est de régler la pression disponible sur la vanne de sorte à ce qu'à pleine ouverture, le débit soit égal au débit maximum souhaité (calculé sur la puissance maximale à faire passer). Ainsi, le débit réel varie en faisant moduler la vanne de 0 à 100%. Un

mauvais équilibrage entraîne une plage de modulation réduite pour la vanne de régulation, réduisant ainsi sa précision.

Si la vanne de régulation est **sur dimensionnée** (trop grosse), ou que **la pression est trop importante** (par exemple sur une sous-station en début de réseau sans équilibrage), alors la vanne aura un débit trop important à pleine ouverture. La régulation s'effectuera alors sur une plage plus petite (par exemple, entre 0 et 10% d'ouverture), réduisant ainsi la précision. Ci-dessous, un exemple d'installation où la vanne de régulation, surdimensionnée, n'est pas assez précise et fait alternativement passer trop et pas assez de débit, entraînant de grandes fluctuations autour de la température réelle secondaire autour de sa consigne :



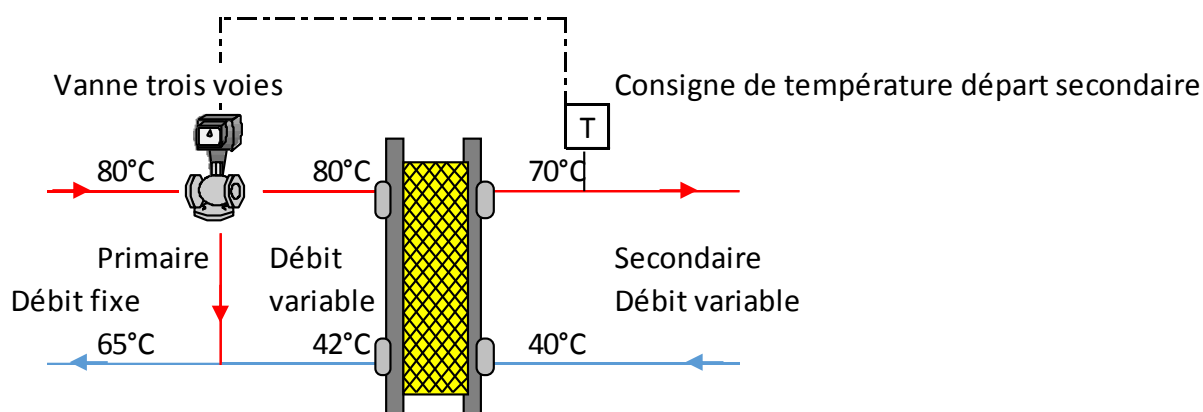
4. ORGANE DE REGULATION PRIMAIRE

4.1. Organe de régulation primaire : la vanne trois voies

Historiquement, les pompes réseau fonctionnaient en vitesse fixe et les débits de branche ne variaient pas tout au long de l'année.

Une vanne trois voies montée en répartition sur le primaire de l'échangeur permettait d'avoir un débit fixe dans chaque branche. En cas de faibles besoins en puissance, le débit primaire est renvoyé directement dans la branche retour sans passer par l'échangeur.

De cette manière, les débits sont fixes sur chaque branche du réseau et les delta P fixes sur chaque sous-station, ce qui rend très simple l'équilibrage car il est valable quelle que soit la charge. Avec ces réseaux, l'utilisation de vannes d'équilibrages classiques¹, dites statiques, étaient appropriées car les pressions disponibles en sous-station ne changent pas au cours du temps. Cependant leur réglage nécessite des metteurs aux points expérimentés et plusieurs jours de réglage.



Surplus de débit renvoyé en centrale --> Augmentation de la température retour

Ce fonctionnement fait face à plusieurs problèmes :

- A charge partielle, la température retour est rehaussée, ce qui induit plus de pertes thermiques sur le réseau retour, et de moins bons rendements en fonction de la source de production
- Les débits réseaux étant constants, les pompes réseaux fonctionnent à vitesse constante, ce qui occasionne jusqu'à plus de 80% de consommation électrique supplémentaires par rapport à une pompe fonctionnant en vitesse variable et bien optimisée

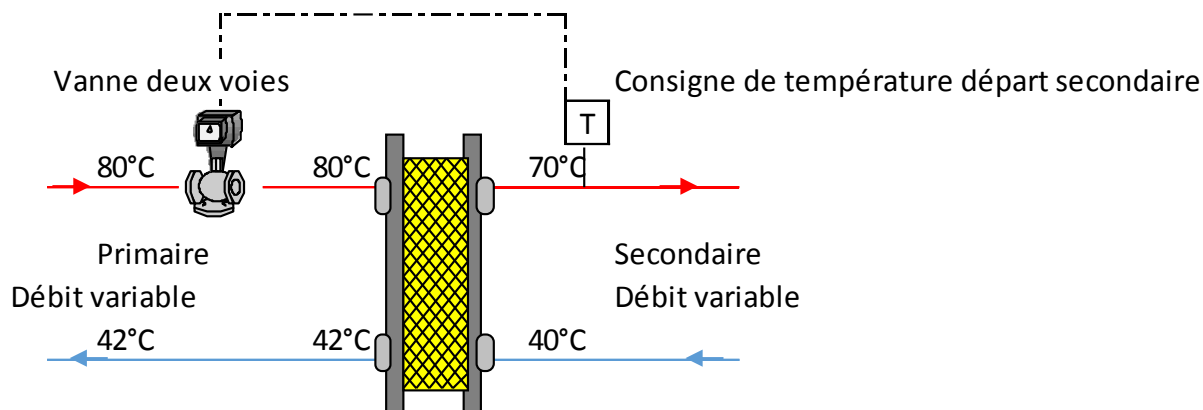
De fait, ce fonctionnement n'est plus utilisé dans les réseaux modernes ; notamment grâce à l'utilisation de pompes à vitesse variable, qui permettent d'adapter la pression aux besoins sur le réseau (voir fiche n°4 sur la régulation intelligente des réseaux de chaleur).

¹ Diaphragme réglable avec prises de mesures de pression, permettant de régler une pertes de charges variant au carré du débit passant dans l'organe

4.2. Organe de régulation primaire : la vanne deux voies

La vanne deux voies va créer une diminution du débit dans l'échangeur mais aussi dans l'ensemble de la branche en se fermant plus ou moins en fonction de la température départ secondaire.

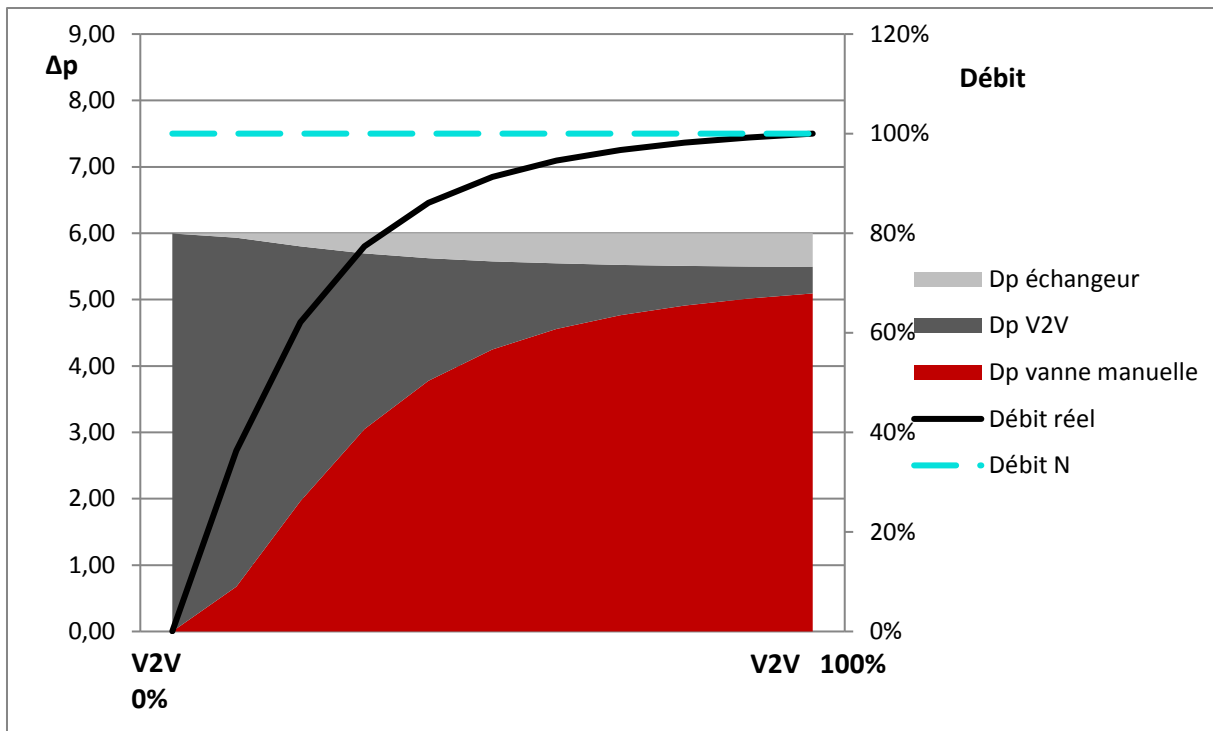
Ainsi, en envoyant le juste débit, la température retour n'est pas rehaussée.



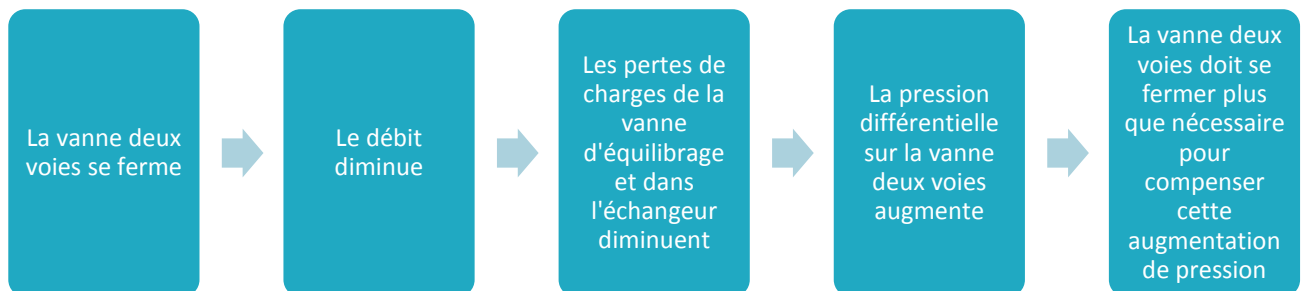
Deux problèmes s'opposent à la bonne régulation.

Variation de pression due à l'ouverture de la vanne de régulation

Considérons dans un premier temps une pression différentielle constante aux bornes de la sous-station, constituée d'une vanne deux voies, d'un échangeur et d'une vanne d'équilibrage statique. La vanne d'équilibrage statique est réglée pour qu'à pleine ouverture de la vanne deux voies, seul le débit maximal (nominal) passe dans la sous-station, et pas plus. Le graphe ci-dessous représente en rouge la perte de charge de la vanne d'équilibrage (vanne manuelle), en gris clair la perte de charge de l'échangeur, et en gris foncée la pression différentielle qui s'applique sur la vanne deux voies. L'abscisse représente l'ouverture de la vanne deux voies.



Voici ce qu'il se passe quand la vanne deux voies se ferme afin de réguler le débit :



Le débit est représenté par la courbe noire sur le graphique précédent : on voit que l'ouverture (en abscisse) n'est pas proportionnelle à l'ordonnée (débit en pourcentage du débit nominal). A cause de l'augmentation de pression sur la vanne de régulation à faible ouverture, 80% de la régulation de débit s'effectue sur 30% de l'ouverture, réduisant ainsi la précision. Ce problème est d'autant plus important que la pression différentielle totale l'est aux bornes de la sous-station.

Mais ce n'est pas le seul problème, puisqu'en dehors de l'action sur la sous-station elle-même, la pression différentielle disponible peut varier en fonction des autres sous-stations.

Variation de pression du au réseau

Le débit que va laisser passer une vanne deux voies à pleine ouverture dépend de la pression disponible à ses bornes : or, sur un réseau de chaleur où les débits sont variables, cette pression évolue en fonction de la charge, de l'ouverture et de la fermeture des autres sous-stations, de la vitesse de la pompe principale... En bref, il est impossible de garantir une pression stable aux bornes de la vanne deux voies à l'aide d'une vanne d'équilibrage classique car le réglage effectué n'est valable que pour une seule répartition de débit dans le réseau (les débits nominaux).

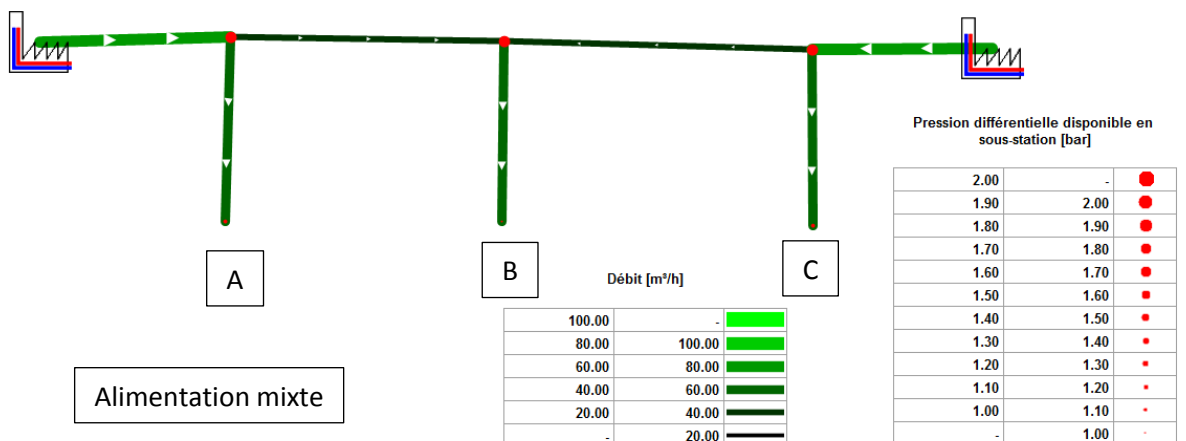
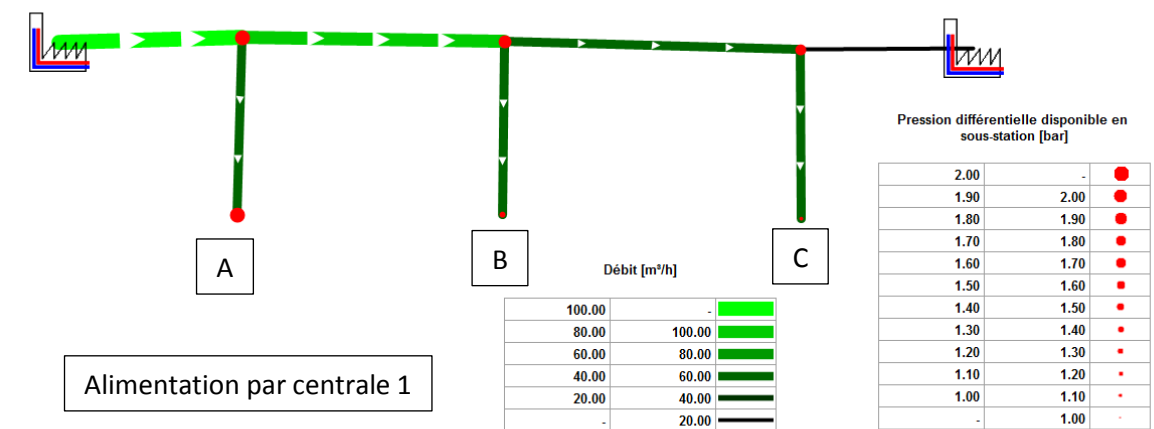
Ce problème est d'autant plus important :

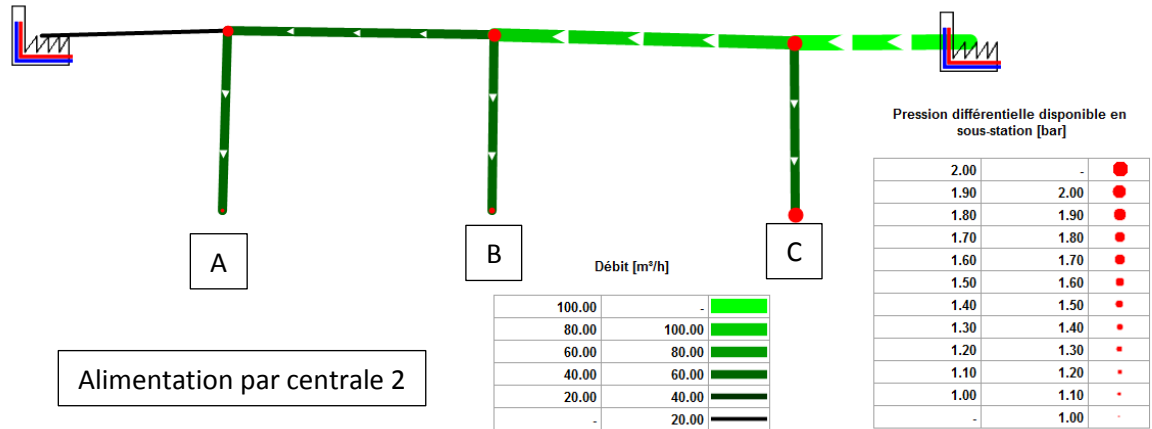
Si le réseau dispose de plusieurs points de distribution

Si le réseau dispose de plusieurs points de distribution (voir fiche n°4 : régulation intelligente), alors, pour une même puissance à distribuer, la pression différentielle disponible sur une sous-station située entre les deux centrales va intégralement dépendre de l'équilibre entre ces deux centrales.

Exemple concret :

Ci-dessous nous présentons un cas fictif de 3 sous-stations où un réseau est alimenté par deux centrales. Sur les trois schémas ci-dessous, la taille des nœuds représente la pression différentielle disponible et la taille et couleur des tuyaux le débit (seul le réseau aller est représenté)

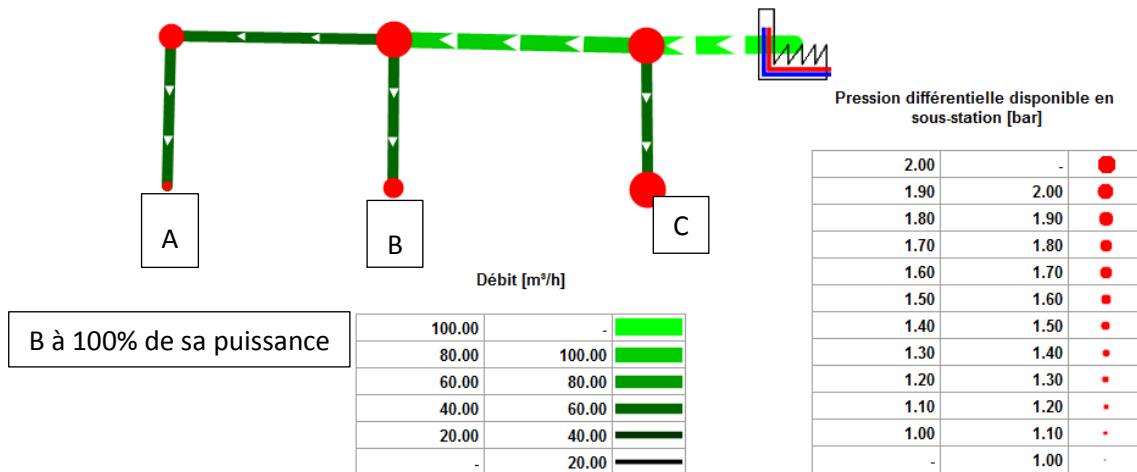


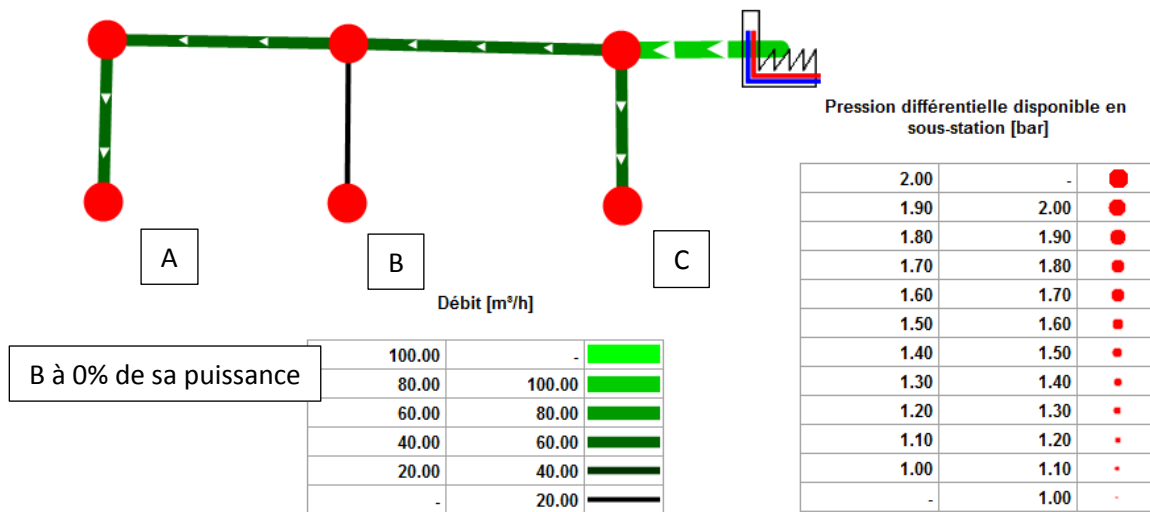


En fonction de la / des sources d'alimentation, la pression différentielle disponible en sous-station varie grandement pour le même débit, rendant le principe d'un équilibrage statique impossible.

Si les besoins des sous-stations sont hétérogènes et ne dépendent pas toutes de la même façon de la température extérieure

L'hétérogénéité des besoins va créer des déséquilibres. Considérons le cas fictif ci-dessous où les deux consommateurs A et C appellent la même puissance, alors que la puissance de la sous-station B varie de 0 à 100% de sa puissance nominale (cas d'une industrie dont les besoins sont décorrélés de la température extérieure ; ou d'un appel ECS du matin, d'une école en réduit important lors des vacances scolaires, etc.)





En général, les pompes en centrale sont réglées pour fonctionner avec une pression différentielle dépendant de la température extérieure. Cette pression différentielle est calculée pour satisfaire aux besoins les plus importants à cette température extérieure (donc ici, quand B est à 100%), mais est appliquée quelle que soit la charge totale.

- En sous-station B, la pression différentielle est d'autant plus forte que la puissance appelée est faible : plus de pression s'applique sur la vanne qui doit encore plus se fermer pour réguler
- En sous-station A, la pression différentielle disponible varie du simple au double : c'est-à-dire que pour ne faire passer que le débit nominal, la vanne deux voies doit se fermer pour compenser cette augmentation de pression liée à la fermeture d'une autre sous-station.

Si la HMT en tête est importante

Naturellement, les variations des différences de pressions en sous-stations vont de pair avec les variations de HMT des pompes principales : si celles-ci sont importantes, les problèmes évoqués ci-dessus sont d'autant plus importants, alors qu'ils peuvent être considérés comme négligeables pour des réseaux fonctionnant avec des HMT faibles.

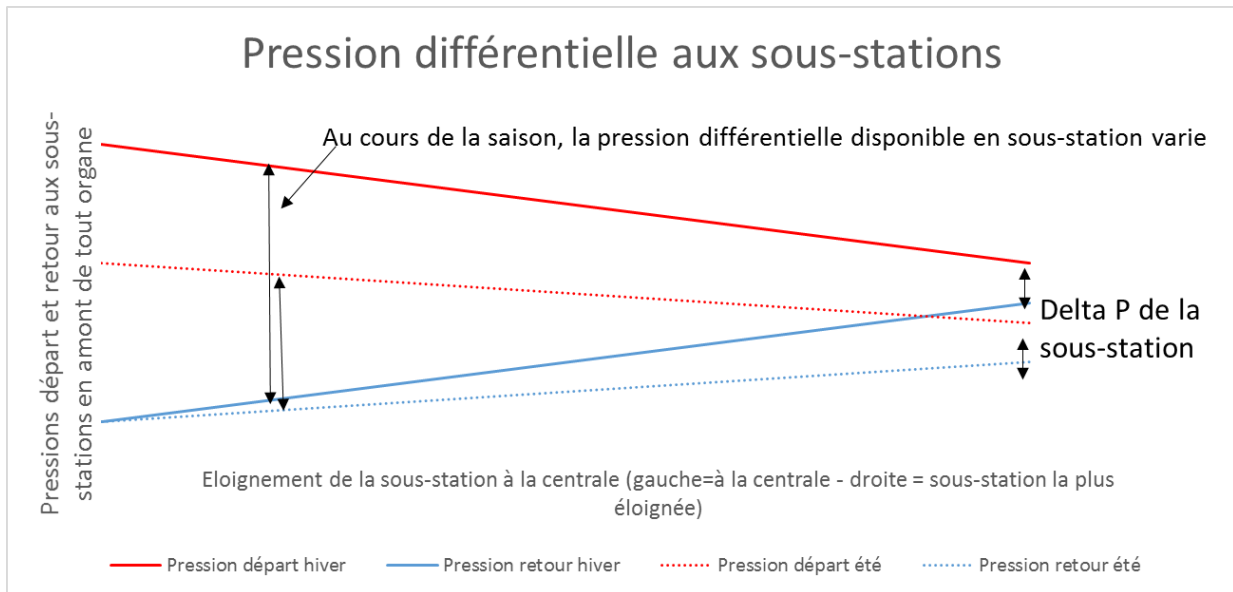
4.3. En résumé :

- Les vannes d'équilibrages statiques ne sont pas adéquates pour permettre un équilibrage correct d'un réseau de chaleur à débit variable avec régulation par des vannes deux voies en sous-stations
- Un mauvais équilibrage et/ou un surdimensionnement des vannes de régulation entraîne des surdébits sur les primaires des sous-stations, et par conséquent une hausse des températures retour primaire et une instabilité sur les températures départ secondaire

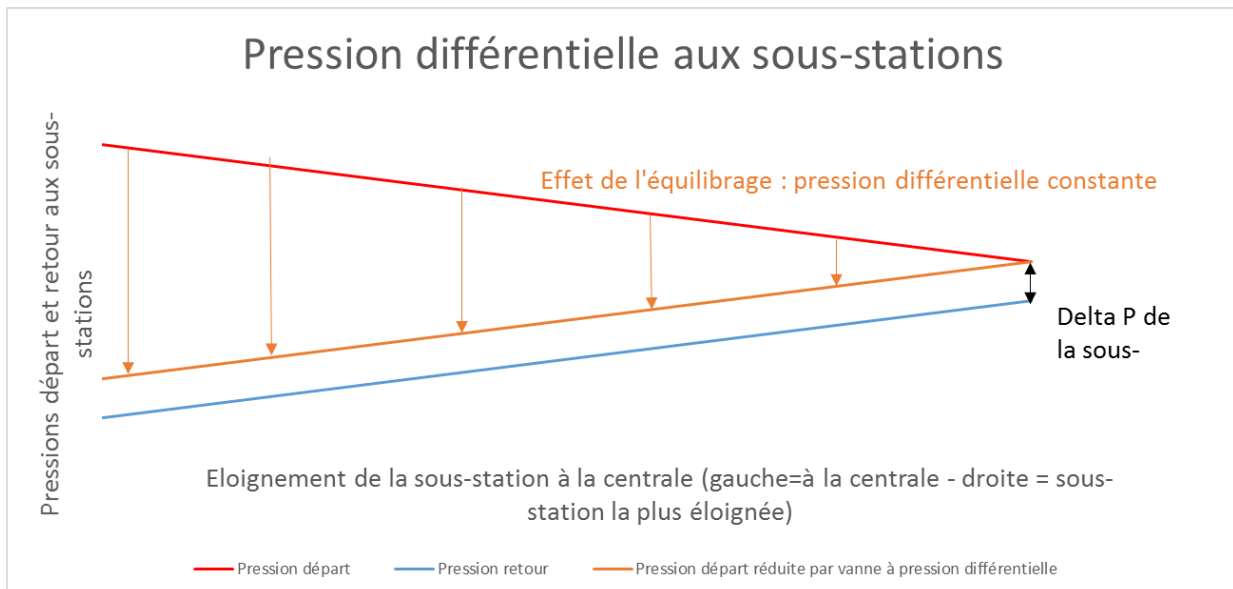
5. COMMENT BIEN EQUILIBRER

Comme vu précédemment, sur un fonctionnement moderne de réseau de chaleur, les vannes d'équilibrages classiques dites statiques ne sont pas capables de s'adapter aux variations de pression sur le réseau.

Pour une même vanne, plus le delta P est important, plus le débit est important. Or, sur les réseaux modernes la pression aux bornes des sous-stations varie grandement en cours de saison en fonction du delta P donné par la pompe en centrale et de l'ouverture/fermeture dans les autres sous-stations :



Un équilibrage parfait permettrait donc d'effacer ces variations temporelles de pression, et d'uniformiser la pression différentielle disponible afin de simplifier la sélection des vannes deux voies :



Donc :

- Les sous-stations qui n'auraient pas d'organe d'équilibrage, ou dont les organes d'équilibrages seraient non correctement réglés, ne peuvent être régulées efficacement (autorité faible → peu d'influence de la vanne sur le débit de la sous-station) : on obtient des phénomènes de pompage (la vanne s'ouvre et se ferme car elle ne peut trouver la position correspondant au débit voulu)
- L'utilisation de vanne d'équilibrage statique permet une légère amélioration (si le réseau est correctement équilibré, ce qui est rarement le cas dans les faits), mais la pression n'est toujours pas constante aux bornes de la vanne deux voies. Notamment, les variations d'appel de puissance dans les autres sous-stations créent des déséquilibres et des variations de pression. De plus, plus le débit de la sous-station diminue par rapport au débit nominal, plus Ceci est surtout vrai dans le cas des vannes deux voies, où le ΔP circuit est très variable. Cependant, le réglage parfait de la vanne d'équilibrage implique de faire fonctionner en manuel les sous-stations en mettant leur vanne deux voies complètement ouvertes, et de passer plusieurs fois en sous-stations : la modification du réglage sur une sous-station influe sur les pressions des autres sous-stations. Dans les faits, cette action n'est pas réalisée, aussi les équilibrages ne peuvent être qu'approximatif. De plus, toute modification structurelle du réseau (ajout d'une branche, suppression de sous-stations, maillages, etc.), rend caduque l'équilibrage.
- **L'utilisation de vanne à pression différentielle** en remplacement de la vanne d'équilibrage statique permet de conserver un différentiel de pression constant sur la vanne deux voies quelques que soient les conditions du réseau (HMT de la pompe centrale, ouverture fermeture des autres sous-stations, etc.). Donc, le ΔP étant fixé aux bornes de la vanne, le débit passant dans la sous-station dépend uniquement de la vanne deux voies. L'interaction entre les sous-stations est supprimée.



Elle permet de plus d'auto équilibrer la sous-station sans intervention ultérieure en cas d'évolution du réseau, ce qui n'est pas le cas des vannes statiques. Le réglage de l'équilibrage est facile car il suffit de laisser la vanne deux voies ouverte à 100% sur la sous-station, et de régler pour obtenir le débit nominal, puis de repasser la vanne deux voies en automatique.

Son fonctionnement est le suivant :

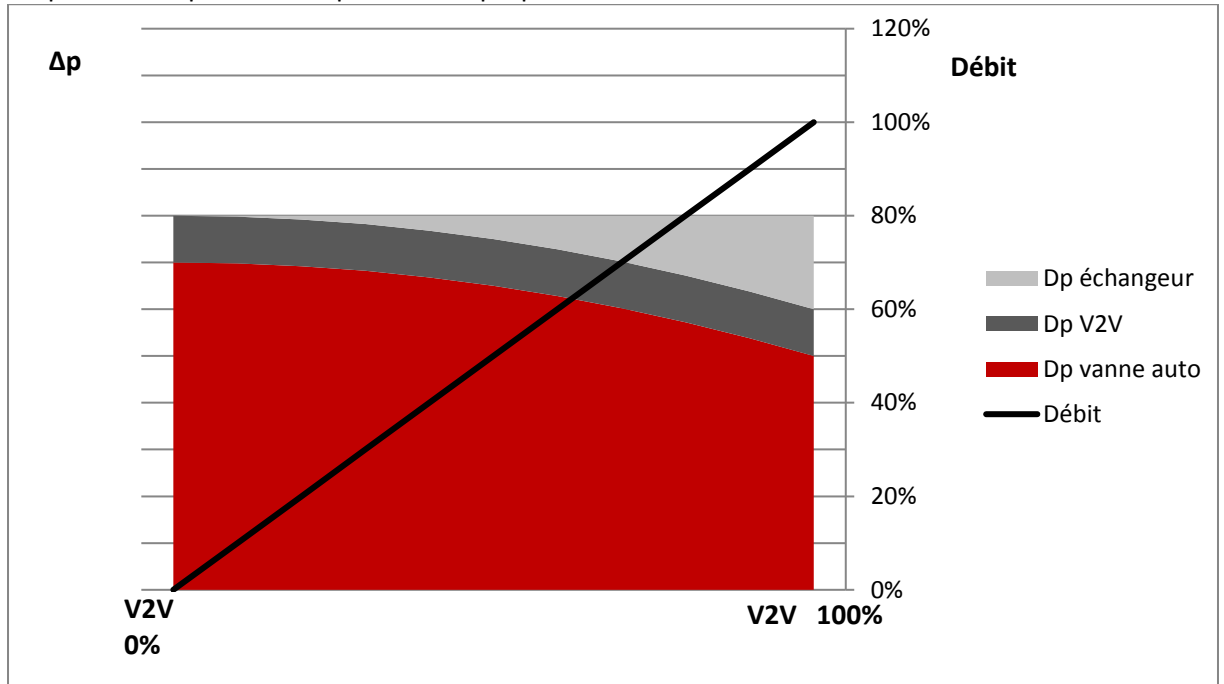
Les variations de pression issues des conduites de retour et de départ sont transférées par les tubes d'impulsion aux chambres de l'actionneur, où elles agissent sur le diaphragme d'équilibrage pour réguler la pression différentielle.

La pression différentielle est régulée au moyen du ressort de réglage prévu à cet effet. La vanne de régulation se ferme lorsque la pression différentielle augmente et s'ouvre lorsque la pression différentielle diminue pour maintenir une pression différentielle constante.

Il existe également des vannes dites « de régulation indépendantes de la pression », qui sont l’alliance d’une vanne deux voies et d’une vanne à pression différentielle réunies en une seule vanne.

Tous les constructeurs de vannes (Siemens, TA, Danfoss, etc.) proposent ces produits, que ce soit pour les gros diamètres (régulation de sous-station) ou pour les petits (équilibre de colonnes voire de panneau de sol).

Contrairement à la vanne d’équilibrage statique, la perte de charge créée ne diminue pas avec le débit, de sorte à ce que la pression différentielle reste constante sur la vanne de régulation et que le débit passant soit pleinement proportionnelle à l’ouverture de la vanne :



Autres solutions envisageables pour un bon équilibrage :

- Utiliser en sous-stations plusieurs vannes de régulation. Cette solution n’est que très rarement utilisée.
- Utilisation de pompe à injection ou hydrojecteur, qui fonctionne par effet venturi et possède également une très bonne autorité. Également, il est possible avec ce matériel, fonctionnant comme une vanne trois voies en mélange, d’abaisser la température primaire rentrant dans l’échangeur, ce qui est bon notamment pour les échangeurs ECS (une trop grande température au primaire entartre le secondaire).



6. COÛTS ET BÉNÉFICES

Le coût d'une vanne de régulation indépendante de la pression en lieu et place vanne deux voies et vanne d'équilibrage statique est double. (Exemple pour un DN80 : 7600 € au lieu de 3800€). En revanche, les bénéfices apportés sont les suivants :

La prestation complexe d'équilibrage du réseau est supprimée.

La maîtrise des débits à toutes les charges ouvre un gisement d'économies d'énergie très important :

- **Alimentation de toutes les sous-stations y compris les plus éloignées (moins de pertes de charges donc plus de pression différentielle disponible)**
- **Economies électriques sur le fonctionnement de la pompe**
- **Pas de sur-débit même sur des réseaux maillés avec plusieurs sources de productions de chaleur.**
- **Abaissement des températures retour (pertes thermiques en baisse, meilleur rendement de production de chaleur en fonction de la production)**
- **Suppression du pompage des vannes de régulation (confort des usagers, augmentation de la durée de vie de la vanne motorisée)**
- **Moins de risque de cavitation des vannes (Durée de vie allongée)**



Fédération Nationale des Collectivités Concédantes et Régies

Optimisation et modélisation des réseaux de chaleur

FICHE N°6 – SECONDAIRE
DES SOUS-STATIONS

Rédigé par : V.BIZOUARD

Relecture : G. PERRIN

Date : 03/07/2019



1. RESUME DE LA FICHE

L'objectif de ces fiches est la vulgarisation de sujets techniques pointus sur le fonctionnement ou les choix techniques des réseaux de chaleur, notamment sur les dernières évolutions technologiques. La prise de décision sur ces sujets peut parfois aboutir sur des décisions non optimisées sur le long terme car visant à l'optimisation directe des investissements. C'est pourquoi il est important que les maîtres d'ouvrage aient des connaissances et des attentes sur le sujet et mobilisent les bons outils pour choisir les moyens en adéquation avec les objectifs fixés.

Ces fiches balaieront l'ensemble du panorama des choix techniques sur les réseaux de chaleur, de la production aux émetteurs finaux en passant par la distribution ; en étudiant quelles sont les méthodes d'optimisation de chacune des facettes.

La présente fiche traite de la partie secondaire des sous-stations. Les points de vigilance les sous-stations sont :

- Les secondaires sont le plus souvent hors de la compétence du réseau primaire. Aussi il est difficile d'avoir une action sur le secondaire sauf arrangement. Cependant, l'optimisation du secondaire est importante pour le fonctionnement du réseau car des températures retour non optimisées se reporteront sur le primaire.
- Sur les bâtiments neufs, il est plus facile de disposer de températures retour froides mais ce n'est pas automatique car dépend du dimensionnement des émetteurs. A la construction, il est important de peser sur ce choix dimensionnant auprès des promoteurs, par exemple par le biais de police d'abonnement.
- La présence de bouteilles de découplage est à éviter. Sur les sous-stations disposant de ses propres sous-stations secondaires, il est fréquent de trouver des bouteilles dans celles-ci. Sauf adaptation hydraulique détaillées ici, elles sont sources de surdébits et de hausse des températures retour à charges partielles.
- La distribution peut être source de surconsommation et d'inconfort en cas de mauvais équilibrage, mais également de température retour trop hautes. Les moyens d'équilibrages statiques aboutissent en général à un mauvais équilibrage.
- En raccordant une chaufferie existante ou en passant de sous-station HT à BT, il est important de ne pas perturber le fonctionnement des pompes existantes en ayant des pertes de charges secondaires les plus faibles possible. L'usage de bouteille est à proscrire.

TABLE DES MATIERES

1. RESUME DE LA FICHE	2
2. ENJEUX	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
2.1. Fournir la température demandée au secondaire et la puissance à transmettre avec une température primaire la plus faible possible.....	Erreur ! Signet non défini.
2.2. Ne pas rehausser outre-mesure la température retour entre le secondaire et le primaire, à débit nominal (pincement retour)	Erreur ! Signet non défini.
2.3. Transmettre la puissance avec le juste débit nécessaire, sans surdébit par rapport au débit nominal.	Erreur ! Signet non défini.
3. ROLE DE L'EQUILIBRAGE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
4. ORGANE DE REGULATION PRIMAIRE.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
4.1. Organe de régulation primaire : la vanne trois voies.....	Erreur ! Signet non défini.
4.2. Organe de régulation primaire : la vanne deux voies	Erreur ! Signet non défini.
4.3. En résumé :.....	Erreur ! Signet non défini.
5. COMMENT BIEN EQUILIBRER	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
6. COUTS ET BENEFICES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

2. ENJEUX

Le secondaire d'une sous-station, bien que ne faisant pas partie du réseau de chaleur en tant que tel selon les découpages traditionnels, est d'une importance capitale quand il s'agit de l'optimisation de température retour. En effet, quelles que soient les optimisations réalisées sur le primaire, la température retour primaire d'une sous-station ne peut être inférieure à sa température retour secondaire : si la température retour secondaire est élevée, la température retour primaire le sera aussi. Les avantages à obtenir une température retour générale faible est décrite dans la fiche n°0 et comporte la diminution des pertes thermiques et la meilleure intégration d'énergies renouvelables et de récupération.

3. TEMPERATURES USUELLES SUR LE CHAUFFAGE

La température retour secondaire pour les circuits chauffage dépend avant tout de la surface d'échange dédiée aux émetteurs, sur lequel il est rare d'avoir une influence en tant que Maître d'Ouvrage public ou exploitant ; car même en cas de bâtiments neufs, ces choix et les choix effectués sur le réseau de chaleur sont complètement dissociés. Pour autant, sachant que les bâtiments neufs ont des obligations en termes de consommation et des EnR, une obligation de disposer de retour bas sur les nouveaux bâtiments pourrait être imposé aux promoteurs (voir fiche n°8 sur les polices d'abonnement).

Voici les températures qui peuvent être constatées :

	Type	Température départ secondaire	Température retour secondaire
Chauffage eau	Nouveaux bâtiments résidentiels, radiateurs	60°C	40°C
	Anciens bâtiments résidentiels, radiateurs	80°C	60°C
	Anciens bâtiments résidentiels, radiateurs, après isolation par l'extérieur	70°C	50°C
	Bâtiments résidentiels, panneaux de sol	50°C 40°C	40°C 30°C
Ventilation	Nouveaux bâtiments	45°C	40°C
	Anciens bâtiments	90°C	70°C

Ces températures sont indicatives : même sur les bâtiments neufs, il peut être observé des régimes haute température (type 80-60). Tout dépend du dimensionnement des émetteurs et de leur taille :

La taille d'un radiateur est multipliée par deux pour un fonctionnement 60-40°C au lieu d'un fonctionnement 80-60°C. La taille d'une CTA est multipliée par 1,5 pour un fonctionnement 45-40°C au lieu de 90-70°C.

Si les régimes de températures sont habituellement plus bas dans les bâtiments neufs, c'est que les déperditions thermiques plus faibles du bâtiment permettent de diminuer les surfaces d'échange nécessaire à l'amélioration des régimes de température. Aussi, pour les bâtiments ayant fait l'objet d'une rénovation thermique, il est possible de diminuer la température de fonctionnement des émetteurs sans changer ces derniers.

4. FONCTIONNEMENT D'UNE BOUTEILLE DE DECOUPLAGE

Une situation rencontrée fréquemment est l'existence de bouteille de découplage en chaufferie. C'est un reliquat du temps où les chaudières nécessitaient un débit minimal et des retours chauds, mais est encore répandu, notamment dans les chaufferies/sous-stations possédant des sous-stations secondaires, tels que les centres hospitaliers ou les bâtiments tertiaires.

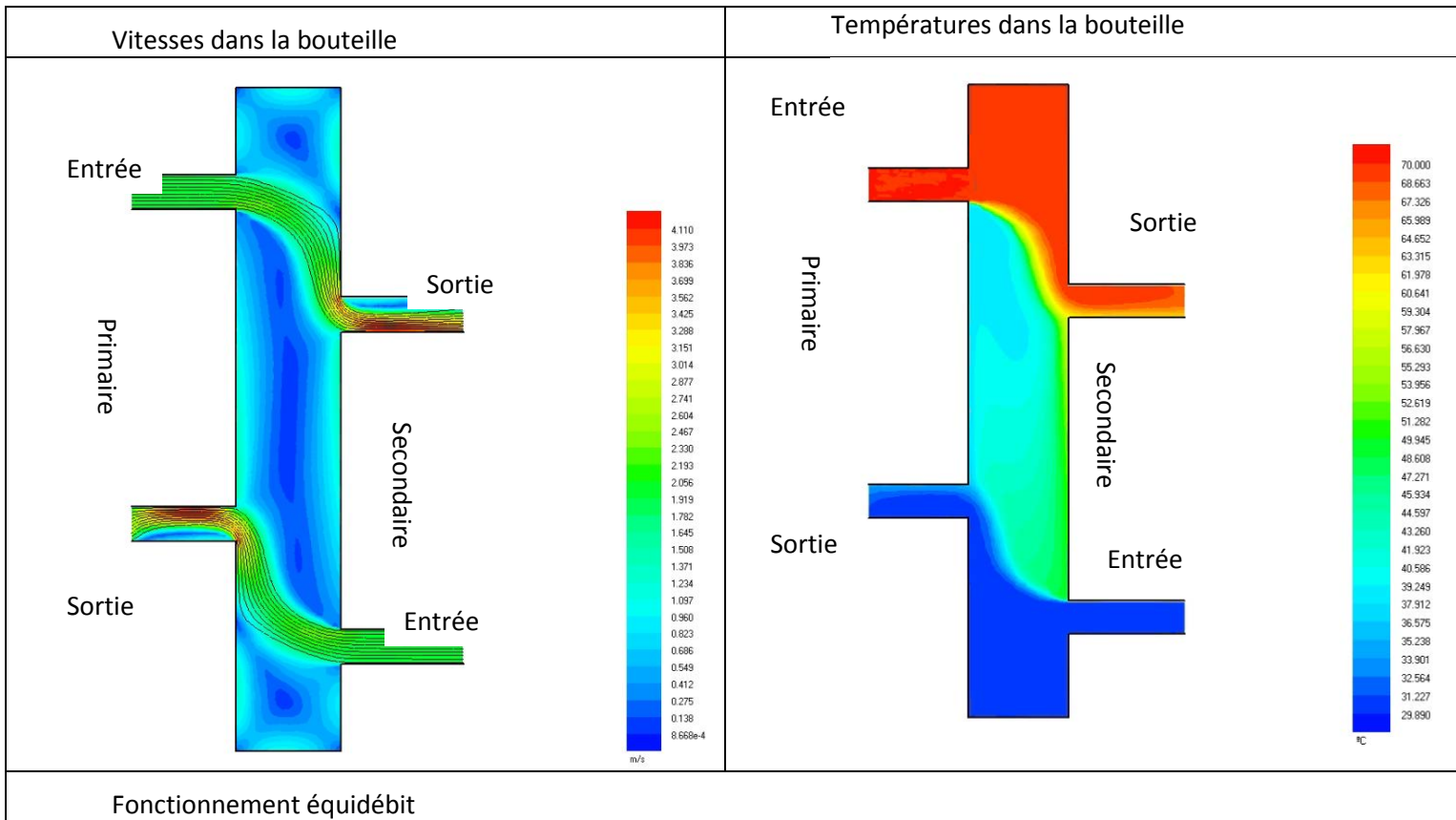
Ces bouteilles permettent la séparation hydraulique. En effectuant un bilan de puissance en amont (primaire) et en aval (secondaire) de la bouteille, on sait que :

$$\begin{aligned} \text{Débit primaire} * (T_{\text{entrée primaire}} - T_{\text{sortie primaire}}) \\ = \text{Débit secondaire} * (T_{\text{sortie secondaire}} - T_{\text{entrée secondaire}}) \end{aligned}$$

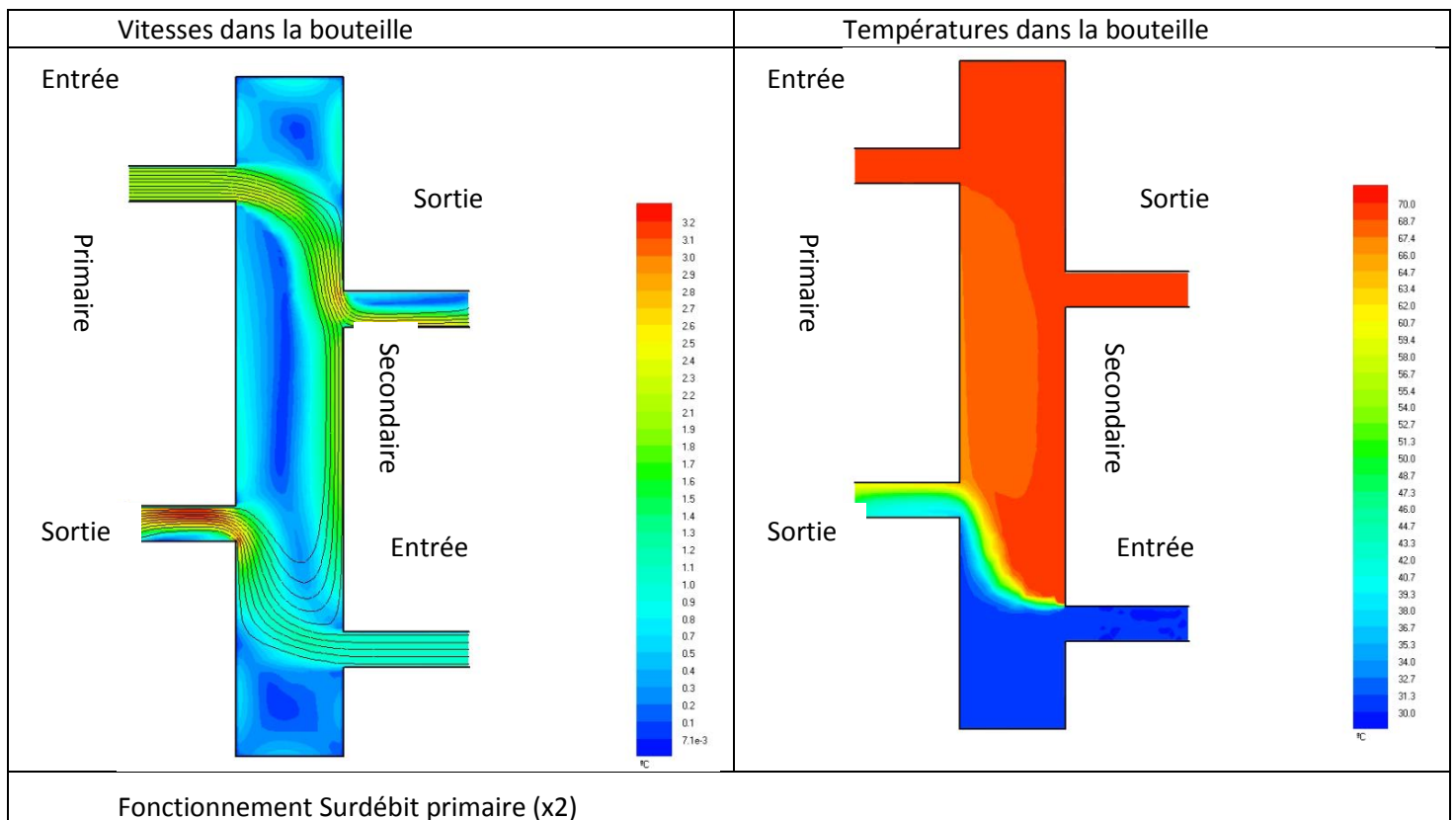
Si le débit primaire et le débit secondaire sont égaux, alors la température sortie secondaire est théoriquement égale à la température entrée primaire et la température sortie primaire est égale à la température entrée secondaire. En revanche en cas de surdébit primaire, le delta T primaire diminue également, ce qui augmente la température retour.

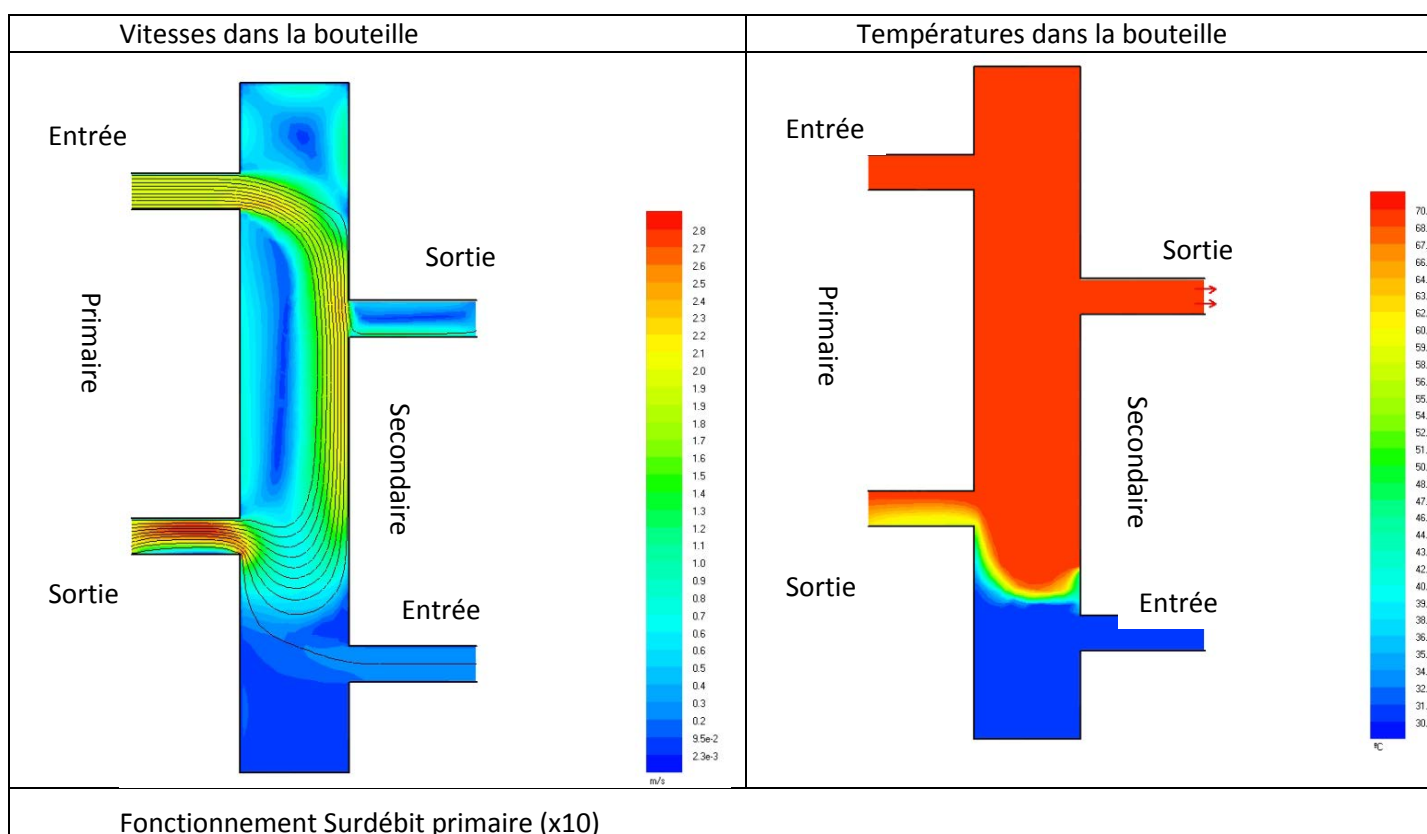
Nous avons effectués des simulations en CFD (Computational Fluid Dynamics) afin d'étudier le comportement des flux à l'intérieur de la bouteille suivant différents cas.

Dans le cas où il y a débit égal (équidébit) entre primaire et secondaire, l'étude CFD montre que si les flux vont majoritairement d'entrée primaire vers sortie secondaire, et d'entrée secondaire vers sortie secondaire, il existe un petit mélange lié à une zone de recirculation qui va légèrement diminuer la température départ secondaire et augmenter la température retour primaire :



Cependant si le débit primaire est supérieur au débit secondaire, il y a un débit descendant qui augmente les températures de retour :





Ainsi, sans régulation du débit primaire bouteille, ce qui est fréquent, les températures retour (sortie) primaire vont être réchauffées par le débit descendant dans la bouteille car le débit primaire est constant alors que les besoins secondaires sont variables : en mi-saison, il peut-être courant d'avoir un retour de 30°C sur le retour (entrée) secondaire et de 78°C sur le retour (sortie) primaire. Cette haute température est alors transmise au retour secondaire de l'échangeur principal de la sous-station, puis au retour primaire de l'échangeur, et influence donc le retour général en chaufferie principale.

La solution la plus simple à ce problème est :

- La pompe primaire en amont de la/des bouteilles doit être à variation de vitesse et réglée en fonction de sa pression différentielle.
- Une vanne de régulation sur l'entrée primaire de la/des bouteilles doit être mise en place, afin de réguler le débit primaire et l'adapter au débit secondaire et ainsi éviter les surdébits. Les mesures décrites en fiche n°5 permettant d'obtenir un bon contrôle de la vanne (via l'utilisation de vannes à pression différentielles) sont à appliquer.
- Afin de piloter cette vanne, un régulateur contrôle son ouverture en fonction d'une consigne de température départ secondaire, et éventuellement en vérifiant l'écart entre les températures indiquées par des sondes de température sur les retours secondaires et primaires.

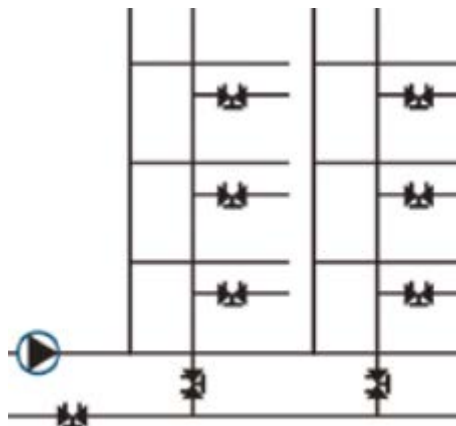
Des solutions sans bouteille sont à privilégier.

Notons qu'en cas de création et non transformation, s'il doit être mis une forme de découplage dans une sous-station secondaire (parce que les départs circuits sont éloignés de la sous-station principale, par exemple), avec un fonctionnement équidébit l'installation d'une bouteille est inutile. L'installation d'un simple bypass entre l'aller et le retour, dans le diamètre de la tuyauterie et avec une vanne de

régulation indépendante de la pression sur le primaire, permet également d'être en équilibre et en découplage hydraulique mais aussi de réguler la température départ. Ce montage est appelé en injection.

5. DISTRIBUTION

Habituellement, dans le cas spécifique des logements, les réseaux de distribution sont constitués de tuyauterie horizontale alimentant des colonnes montantes desservant les logements.



5.1. Le plus rencontré actuellement

De manière générale, les vannes d'équilibrages en pied de colonne sont des vannes d'équilibrages statiques ou manuelles, occasionnant des pertes de charges variables en fonction du débit. Elles sont adaptées à des fonctionnements à débit fixe (panneau de sol, radiateur sans robinet thermostatiques), mais pas aux réseaux à débit variables. La plupart du temps, il est constaté qu'elles ne sont pas réglées conformément aux règles de l'art. En effet, le bridage d'une vanne diminue la pression disponible sur la colonne et donc diminue le débit sur cette colonne, mais va augmenter la pression disponible sur les autres colonnes. De fait, un équilibrage correct nécessite un réglage rigoureux que peu d'exploitants ou metteurs au point appliquent. La méthode fréquemment appliquée est grossière et consiste à vérifier, en faisant un pré-réglage, que les températures départ-retour sont similaires sur toutes les colonnes, et de modifier les réglages au cas par cas. Un équilibrage correct consiste à effectuer un pré-réglage, mesurer avec un équipement les pressions sur chaque vanne, calculer les corrections à apporter, appliquer ces corrections, mesurer de nouveaux les pressions partout, et éventuellement ré effectuer une itération. Dans les faits, d'après une étude Danfoss, moins de 10% des installations en France sont correctement équilibrées.

En cas de mauvais équilibrage, les températures dans les différents logements vont être différentes. Certains logements seront sous-chauffés tandis que d'autres seront surchauffés (par exemple, pour une consigne à 20°C, certains logements seront chauffés à 24°C et d'autres à 17°C).

En cas de sous-chauffe et de mauvais équilibrage, la résolution facile est d'augmenter la température départ ou d'augmenter le débit de tête. Les logements sous-chauffés seront mieux alimentés, au prix d'une surchauffe dans les autres logements, d'une augmentation de la consommation globale et d'une augmentation de la température de retour.

5.2. Optimisation

Tout comme le fonctionnement du réseau primaire, ce n'est que par l'obtention d'une répartition correcte des débits que :

- La consommation sera optimisée
- Le confort sera optimal (pas de surchauffe, pas de sous-chauffe)
- Les températures retour seront cohérentes avec le dimensionnement des émetteurs.

Comme vu précédemment, avec des équipements de réglage manuel, il est compliqué d'obtenir un bon réglage car celui-ci est chronophage. Ceci est d'autant plus vrai s'il existe des vannes de réglages en pallier.

Il existe plusieurs solutions d'équilibrage automatique, mais la plus pertinente est d'adopter des vannes d'équilibrage et de régulation automatique combinées directement sur les émetteurs ou en gaine palière. Contrairement aux vannes manuelles, la pression différentielle s'adapte au pour un débit nécessaire.

- Les vannes de pieds de colonnes sont inutiles
- Le réglage est simple car celui-ci n'influe pas sur le réglage des autres vannes (c'est la pression qui est réglée et non une ouverture)
- L'autorité des vannes est parfaite
- Les températures retour sont optimisées.
- La pompe, qui doit être à vitesse variable et régulée en HMT constante ou proportionnelle, s'adapte à l'ouverture ou fermeture des vannes.

6. TRANSFORMATION D'UNE CHAUFFERIE OU D'UNE SOUS-STATION HT EN SOUS-STATION BT

Lorsqu'un des deux cas se présente :

- Transformation d'une sous-station HT en une sous-station BT
- Transformation d'une chaufferie en une sous-station BT

Il y a lieu d'apporter une attention particulière aux pertes de charges induites sur le secondaire par l'échangeur.

En effet, les pertes de charges totales que doivent vaincre les pompes de distribution du ou des réseaux secondaires sont l'addition des pertes de charges :

- de la production (chaudière ou échangeur)
- de la vanne de régulation secondaire. Afin de garantir une bonne qualité de régulation (autorité de la vanne), les pertes de charges de celles-ci doivent être équivalentes aux pertes de charges de la production.
- du circuit secondaire (généralement entre 3 et 10mCE selon les applications et circuits pour une sous-station « classique »)

Dans le cadre d'une transformation en sous-station BT, les pertes de charges de ces trois facteurs sont donc de

Pertes de charges	Production	Régulation (vanne trois voies)	Circuit secondaire
Avant Chaudière ou échangeur tubulaire HT	Négligeable	Négligeable	Entre 3 et 10mCE généralement
Après Echangeur à plaques	Entre 1 et 5 mCE selon le dimensionnement.	En cas d'un bon dimensionnement : 2/3 des pertes de charges de l'échangeur ou plus.	Inchangé

On voit donc que de base et même avec des pertes de charges faibles sur l'échangeur (2mCE), disposer d'une bonne autorité sur la vanne de régulation impose de changer celle-ci pour une permettant de créer au minimum 1,3 mCE, pour une perte de charge supplémentaire totale de 3,3mCE.

Dans la grande majorité des cas, les limites entre le primaire et le secondaire se situent sur les brides secondaires de l'échangeur. Ce qui signifie, pas de remplacement d'équipements (vanne trois voies de régulation secondaire, pompe de circulation). Par conséquent si la perte de charge secondaire de l'échangeur est importante :

- Les vannes trois voies de régulation en place, adaptées à des productions avec peu de pertes de charges, deviennent inadaptées et régulent mal les températures de départ circuit. Si la température départ secondaire général avant régulation est déjà bien adaptée au circuit, ceci n'est pas problématique car le niveau de température est déjà

correct. En revanche, si la température départ secondaire générale avant régulation est importante par rapport à celle du circuit et qu'il y a de vrais besoins de régulation au secondaire, alors la vanne trois voies en place risque de mal réguler.

- Les pompes de circulation risquent de ne pas permettre l'augmentation de perte de charge induite par l'ajout de l'échangeur, et encore moins si la vanne trois voies venait à être remplacée pour avoir une meilleure autorité.

Les solutions habituellement constatées sont les suivantes

- Soit les pompes circuits et les vannes de régulations ne sont pas changées
 - La qualité de la régulation baisse
 - On compte sur un surdimensionnement des pompes en place pour absorber le surplus de pertes de charges apportées par l'échangeur.

Par expérience, avec des pertes de charges sur échangeur de 1mCE, la quasi-totalité des pompes existantes ne sont pas à remplacer. Le reste est à remplacer après constatation que les circuits ne fonctionnent plus, souvent au frais du délégataire de réseau de chaleur qui n'a pas forcément intégré cette composante. Les pompes les plus touchées sont les pompes les moins puissantes. Les pompes de faible HMT (petits circulateurs) sont les plus touchées.

En revanche, les statistiques sont inversées lorsque les pertes de charges échangeur sont de 5mCE, où la quasi-totalité des circuits deviennent inopérants (les débits diminuent grandement du fait de l'augmentation de la perte de charge).

Cette méthode semble la plus pragmatique en termes de coût d'investissement, elle nécessite des investissements échangeur plus importants pour diminuer leurs pertes de charges.

- L'échangeur a de fortes pertes de charges. Les pompes et vannes de régulation ne sont pas changées. Une bouteille de découplage est insérée entre l'échangeur et les circuits de distribution.

La bouteille reproduit hydrauliquement ce qui se passait avant la mise en place de l'échangeur pour les circuits existants, en introduisant très peu de pertes de charges (les pertes de charges de l'échangeur sont vaincues par une nouvelle pompe faisant le lien entre échangeur et bouteille). Par conséquent, les vannes trois voies gardent une bonne autorité de régulation et le fonctionnement des pompes et des circuits ne sont pas modifiés.

Cette méthode permet d'être certain de ne pas avoir de contentieux avec le secondaire puisque les équipements existants ne sont pas perturbés.

En revanche, appliqué basiquement **un tel système rehausse fortement les températures retour par surdébit sur le primaire de la bouteille**. En effet, la pompe primaire bouteille est dimensionnée pour la puissance nominale à transmettre. A mi-saison, les vannes trois voies recyclent une partie des retours, diminuant le débit secondaire passant dans la bouteille. Il y a plus de débit côté primaire que côté secondaire : un débit descendant se forme dans la bouteille et la température retour primaire est rehaussée.

Cette solution est globalement à proscrire. Si elle est inévitable (pour cause de mauvais dimensionnement des pertes de charges de l'échangeur par exemple), la pompe de charge de la bouteille doit être régulée afin d'obtenir un équidébit entre le primaire et le secondaire de la bouteille et ainsi ne pas réchauffer les retours (voir paragraphe fonctionnement d'une bouteille).

ⁱ Capacité à réguler correctement



Fédération Nationale des Collectivités Concédantes et Régies

Optimisation et modélisation des réseaux de chaleur

FICHE N°7 – CASCADES

Rédigé par : V.BIZOUARD

Relecture : G. PERRIN

Date : 02/12/2019



1. RESUME DE LA FICHE

L'objectif de ces fiches est la vulgarisation de sujets techniques pointus sur le fonctionnement ou les choix techniques des réseaux de chaleur, notamment sur les dernières évolutions technologiques. La prise de décision sur ces sujets peut parfois aboutir sur des décisions non optimisées sur le long terme car visant à l'optimisation directe des investissements. C'est pourquoi il est important que les maîtres d'ouvrage aient des connaissances et des attentes sur le sujet et mobilisent les bons outils pour choisir les moyens en adéquation avec les objectifs fixés.

Ces fiches balaieront l'ensemble du panorama des choix techniques sur les réseaux de chaleur, de la production aux émetteurs finaux en passant par la distribution ; en étudiant quelles sont les méthodes d'optimisation de chacune des facettes.

La présente fiche traite des cascades entre usages et entre sous-stations. Les points de vigilance sont :

- Afin de diminuer les températures retours globales d'un réseau, il est possible de mettre en cascade différents usages dont les niveaux de température sont compatibles.
- Une cascade interne à une sous-station consiste à mettre en série deux usages (chauffage et ECS, CTA et chauffage, chauffage d'un bassin de piscine, etc.). Il est également possible d'étager la production d'ECS avec un préchauffage d'eau froide séparé du réchauffage de boucle.
- Une cascade entre sous-stations nécessite la pose d'un troisième tube afin de faire la jonction entre les sous-stations dont les retours sont utilisés pour alimenter d'autres sous-stations. Un point de vigilance est l'équilibre hydraulique des pressions sur le troisième tube : l'utilisation de logiciel de modélisation thermohydraulique pour la compréhension des phénomènes en jeu peut être un plus.

TABLE DES MATIERES

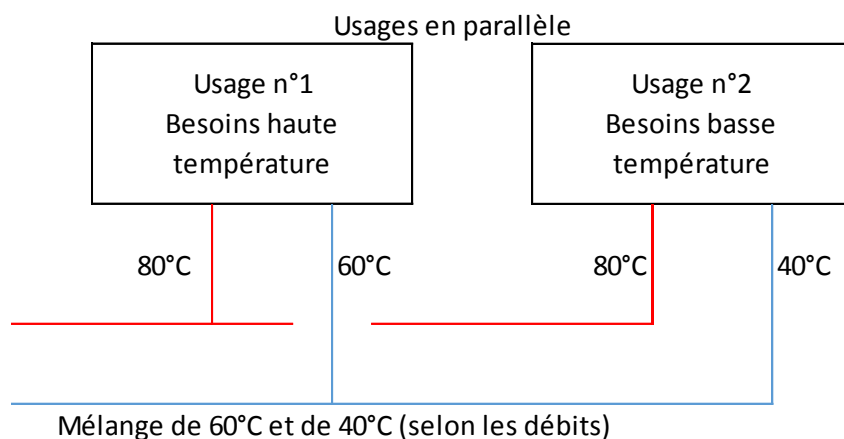
1. RESUME DE LA FICHE	2
2. DEFINITION ET ENJEUX	4
3. CASCADE INTERNE.....	5
3.1. Cascade avec eau de bassin	5
3.2. Cascade chauffage et ECS.....	6
3.2.1. <i>Raccordement en parallèle</i>	6
3.2.2. <i>Raccordement en série</i>	6
3.2.3. <i>Production à double étage</i>	9
3.2.4. <i>Production à triple étage</i>	10
4. RESEAU TROIS TUBES	11
4.1. Généralités	11
4.2. Pressions.....	11
4.3. Equilibre de production/consommation par effet sur la température HT	12

2. DEFINITION ET ENJEUX

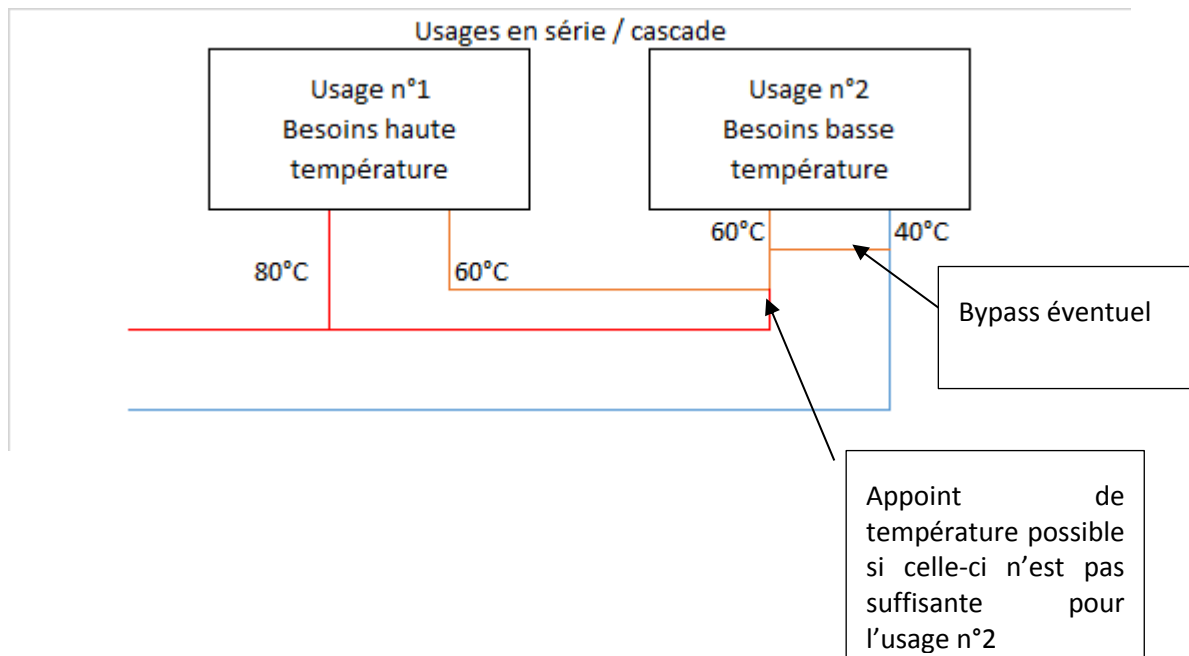
Quand l'enjeu d'optimisation de température de retour est important, il est possible de cascader les usages et ou les sous-stations en fonction de leur niveau de température, dans l'objectif de diminuer la température retour globale.

On appelle cascade le fait d'utiliser le fluide retour d'un usage haute température afin d'alimenter tout ou partie un autre usage dont le niveau de température départ est compatible avec les températures retour du premier usage.

La façon classique d'alimenter les usages est le suivant :



La façon cascadée d'alimenter les usages est la suivante :



La cascade ou mise en série permet de réduire la température retour globale.

Si celle-ci se fait entre usages d'une même sous-station, on parle de cascade interne.

Si celle-ci s'effectue entre sous-stations distinctes, on parle de réseau trois tubes.

3. CASCADE INTERNE

Nous nous focaliserons ici sur les cascades effectuées au primaire, c'est-à-dire entre échangeurs : par exemple, échangeur chauffage et échangeur ECS ; dans une piscine, entre échangeur bassins et échangeur chauffage.

Un rapport de l'Agence internationale de l'énergie, « Optimization of District Heating Systems by Maximizing Building Heating System Temperature Difference » (Optimisation des réseaux de chaleur par maximisation de la différence de température entre les systèmes de chauffage des bâtiments), présente des réflexions sur les mises en cascade d'usages au sein d'un bâtiment.

Les résultats de cette étude permettent de conclure que l'amélioration globale de ΔT , résultant de la mise en cascade de différentes charges thermiques, dépend des trois facteurs suivants :

- le niveau de température requis pour les différentes charges thermiques
- l'ampleur de ces charges
- l'heure de la journée d'utilisation des charges.

Il est donc important de garder ces trois facteurs à l'esprit lors de la conception d'un système en cascade. Un système avec des charges thermiques avec différents niveaux de température offre la possibilité d'une mise en cascade pour maximiser le ΔT . Les sous-systèmes de chauffage nécessitant une température élevée doivent être placés au premier niveau où les systèmes sont alimentés par de l'eau haute température. Les sous-systèmes de chauffage nécessitant des niveaux de température plus bas peuvent être cascades à un deuxième niveau où l'eau de retour du premier niveau peut être utilisée. Les systèmes étudiés dans le cadre de ce document ont été mis en cascade à deux niveaux. La mise en cascade à plusieurs niveaux (plus de deux niveaux) peut entraîner une amélioration encore plus grande, mais des systèmes de contrôle plus complexes sont nécessaires.

Pour obtenir une amélioration maximale de ΔT , les charges thermiques dans un système en cascade doivent être disposées de manière à équilibrer le rapport de charge entre les niveaux tout au long de l'année. Habituellement, l'ampleur des charges totales dans le niveau supérieur devrait être supérieure à celles du niveau inférieur afin d'éviter autant que possible l'utilisation d'eau à haute température dans le deuxième niveau.

Si le rapport entre le niveau supérieur et le niveau inférieur est trop élevé ou trop faible, l'eau de retour du premier niveau bypassera le deuxième ou l'eau à haute température sera nécessaire pour alimenter le deuxième niveau. La mise en cascade a son plus grand effet lorsque les charges sont équilibrées pendant une grande partie de l'année.

En outre, les conceptions en cascade qui favorisent la réduction du débit en hiver facilitent l'expansion du réseau, puisque le débit maximal du réseau est diminué.

Les cascades envisageables peuvent être de tout type :

- Circuits CTA vers chauffage basse température
- Chauffage ou ECS vers chauffage de bassin (piscine)
- Chauffage vers ECS ou ECS vers chauffage.

3.1. Cascade avec eau de bassin

Dans les sous-stations alimentant des piscines, il existe de nombreux usages avec des niveaux de température très différents. En général, il y a à minima :

- Un réseau CTA avec niveau de température élevés
- Un réseau ECS avec niveau de température moyen (60-50°C)
- Un réseau réchauffage Bassin, dont les besoins secondaires sont en général de 36°C-28°C.

Dans ce cas, si la disposition des lieux le permet il y a lieu de séparer les échangeurs de livraison primaire, et d'utiliser les retours primaire CTA pour alimenter le primaire des échangeurs bassins, qui doivent être dimensionnés pour fonctionner à très basse température.

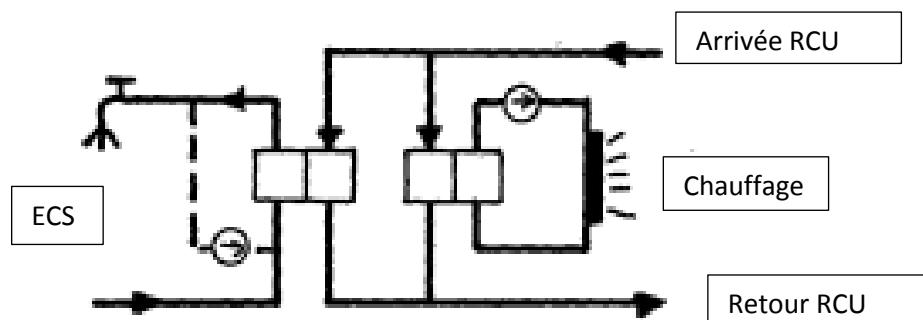
3.2. Cascade chauffage et ECS

Dans ce cas particulier de traitement du chauffage et ECS, le document de l'AIE analyse les performances de 6 cas de raccordement. Les schémas sont de source AIE.

Les systèmes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire peuvent être raccordés de différentes manières dans les sous-stations de chauffage urbain. Pour plus de simplicité, aucune commande ou vanne n'est représentée.

3.2.1. Raccordement en parallèle

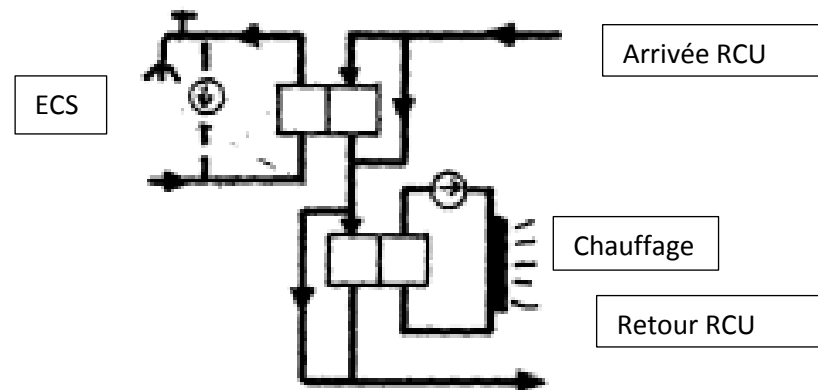
C'est probablement le schéma le plus largement utilisé, dans différents pays. Il ne permet pas d'optimisation de température mais est le plus simple à mettre en œuvre.



3.2.2. Raccordement en série

Le raccordement en série se retrouve relativement fréquemment en France, mais est considéré comme rare et peu usité dans les pays d'étude du document (à savoir le Danemark, le Royaume-Uni, la Corée du Sud, la Suède, les Pays-Bas, l'Allemagne, la Norvège et la Finlande).

Série ECS vers chauffage

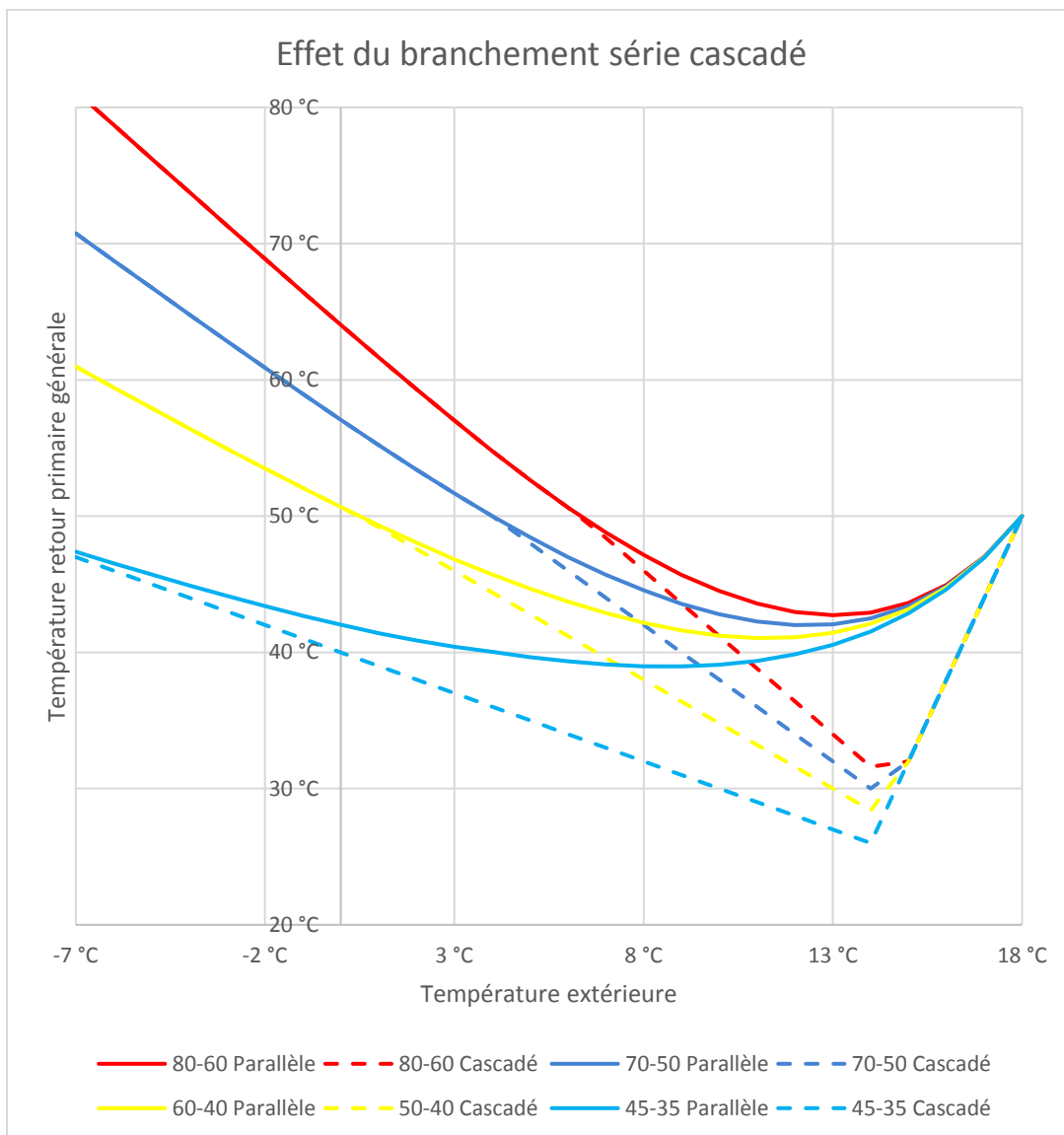


Analyse complémentaire par nos soins :

Ce système utilise les retours primaires de l'échangeur ECS en cas de non tirage ECS ($\sim 50^{\circ}\text{C}$) qui sont utilisés pour alimenter le primaire d'un échangeur chauffage ayant de faibles besoins de température, ce qui nécessite donc en prérequis d'avoir un chauffage basse température. Un appoint depuis le réseau aller primaire permet de compléter énergétiquement cette récupération afin de transmettre la puissance requise.

Lors du tirage ECS, l'échangeur ECS primaire a des retours froids qui sont inutilisables, une vanne trois voies redirige le fluide retour primaire ECS vers le retour général.

Nous calculons l'effet d'un tel dispositif en fonction du régime de température chauffage avec une répartition réaliste entre puissance de boucle ECS et puissance maximale chauffage :

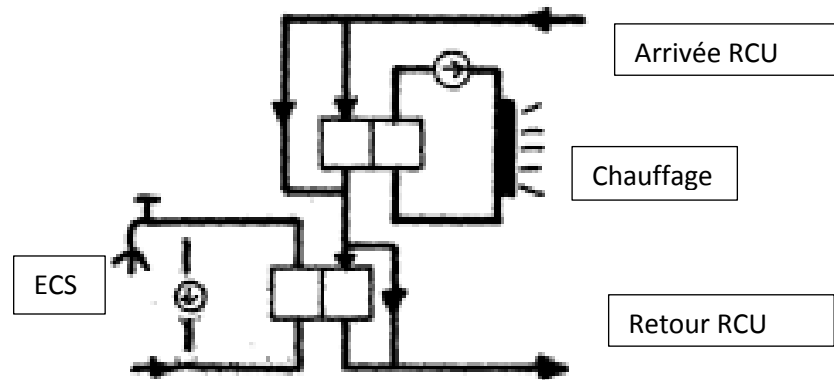


Plus les besoins en température chauffage sont importants, moins la cascade est intéressante.

En considérant un fonctionnement hors tirage de l'ECS à 80% du temps, et en prenant en compte la répartition horaire des températures extérieures nous calculons que l'abaissement de température moyen engendré au niveau de la sous-station pour un tel dispositif est :

Régime de température chauffage	80-60	70-50	60-40	45-35
Gain moyen annuel en température	1,5 °C	1,9 °C	2,5 °C	3,6 °C

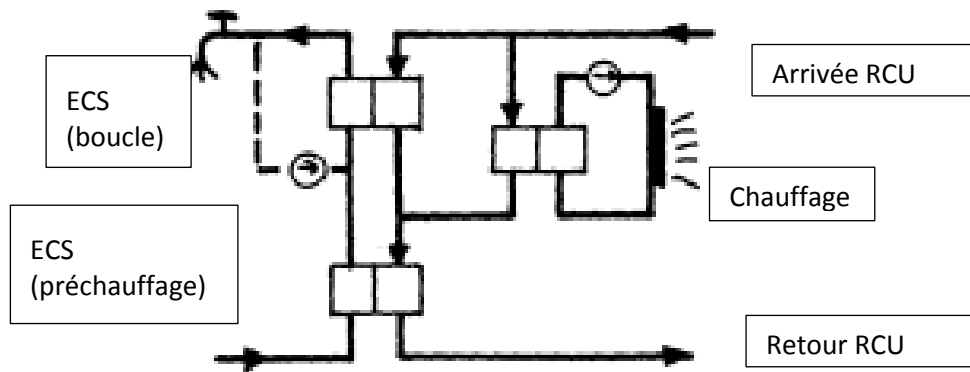
Les gains réels dépendent de l'équilibre des puissances entre ECS et chauffage.



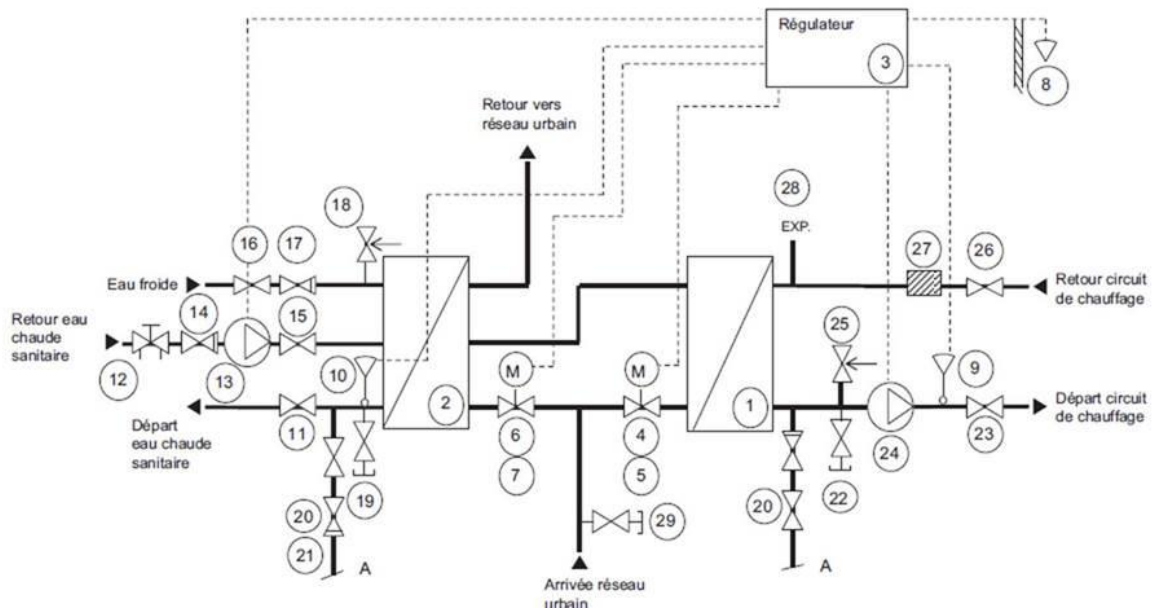
S'envisage en cas de retour chauds constants du circuit chauffage. En revanche, quand c'est le cas une autre optimisation (réduction des surdébits, suppression de bouteilles de découplages, etc.) permettent de diminuer les températures de retour du réseau chauffage et par conséquent de rendre dispensable ce schéma.

3.2.3. Production à double étage

En Suède, la fourniture échelonnée d'eau chaude sanitaire (le chauffage étant divisé en un préchauffeur et un post-chauffeur) est utilisée depuis de nombreuses années, en particulier dans les grands bâtiments. Le système en deux étages a été le plus couramment adopté.



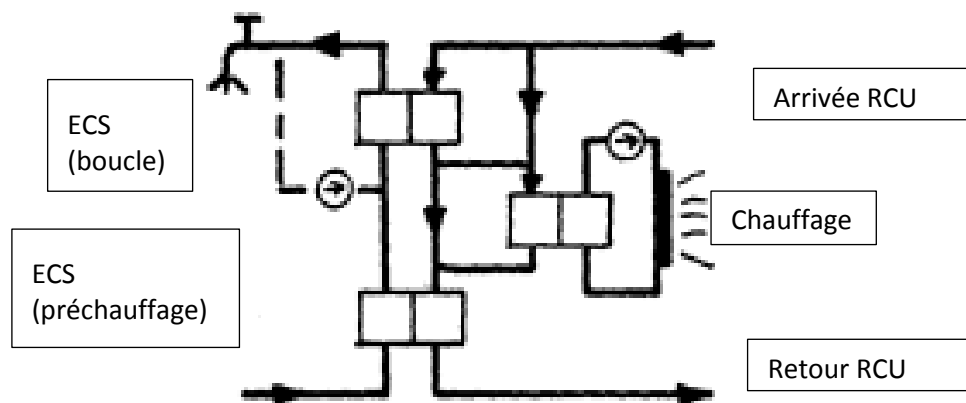
Certains constructeurs comme Alfa Laval proposent des skids avec ce système déjà monté, ici avec un échangeur ECS possédant de base les deux étages :



Le principal intérêt est de revenir froid lors du tirage ECS, et par conséquent augmenter le ΔT et ne pas augmenter le débit alors que la puissance fournie augmente, ce qui permet un gain lors du dimensionnement des tuyauteries.

3.2.4. Production à triple étage

Originaire de Russie, ce système combine la production double étage pour l'ECS avec une production série ECS>Chauffage. Il est nécessaire que le réseau de chauffage fonctionne avec des niveaux bas de température (voir Série ECS vers chauffage).



Ce type de schéma de raccordement à trois étages, est susceptible d'entraîner des températures de retour particulièrement basses. Ce schéma de raccordement nécessite des équipements de commande assez compliqués et peut donc n'être pratique que dans les grandes sous-stations, par exemple dans les hôtels.

4. RESEAU TROIS TUBES

4.1. Généralités

De la même façon, il s'agit de cascader différents niveaux de température. Ici, les cascades s'effectuent entre sous-stations ce qui nécessite au moins un troisième tube de liaison entre sous-stations.

Nous appellerons HT (Haute température) et BT (Basse température) les tubes classiques départ et retour d'un réseau. Les sous-stations nécessitant un haut régime de température et disposant de retours hauts consomment depuis la HT et rejettent sur un réseau MT (Moyenne température). Les sous-stations avec de faibles besoins de températures s'alimentent depuis ce même réseau MT.

Certaines sous-stations produisent de la MT tandis que d'autres consomment de la MT.

La production et la consommation de MT sont rarement équilibrées, il y a lieu soit d'appointer la MT avec de la HT, ou au contraire de bipasser le MT en trop dans la BT.

La cascade peut se faire de manière locale, c'est-à-dire entre deux sous-stations (une HT-MT et une MT-BT), ou entre plusieurs groupes de sous-stations HT-MT et MT-BT proches géographiquement. C'est le cas notamment du réseau d'Arcueil-Gentilly (ARGEO), où les niveaux de températures ont été pris en considération avant la construction du réseau afin d'effectuer des cascades équilibrées localement, c'est-à-dire avec une production de MT du même ordre de grandeur que la consommation MT. Le but est d'éviter le surinvestissement en effectuant optimisant la longueur de zone tritube.

Sur certains réseaux, la cascade se fait de manière plus globale, c'est-à-dire sur l'ensemble du réseau. C'est le cas par exemple du réseau de Bonneuil sur Marne (SETBO) ou celui de Villejuif/Haÿ les roses/Chevilly-Larue (SEMHACH), dont la majeure partie du réseau est alimentée en tritube. Dans ce dernier cas, le réseau possède même 5 tubes par endroit : Très haute température, Haute température, Moyenne température, Basse température et Très basse température.

4.2. Pressions

Un point technique important est la gestion des pressions. En effet :

Les pressions sur l'ensemble du réseau HT sont déterminées par la pompe en centrale et par les pertes de charges.

Les pressions sur l'ensemble du réseau BT sont déterminées par le maintien de pression en centrale et par les pertes de charges.

En revanche, les pressions sur le MT ne sont pas contrôlées directement puisque créées depuis la HT. La pression de la MT dépend donc des pressions HT aux sous-stations où elle est créée, des pressions BT des sous-stations où elle est consommée, des ouvertures de vannes. En fonction du tracé, du dimensionnement, il existe des risques que la pression MT descende en dessous de la pression BT, et que certaines sous-stations tournent à l'envers.

Afin de maîtriser le fonctionnement, avoir une connaissance précise de l'hydraulique du réseau et de son dimensionnement que peut apporter une simulation thermohydraulique peut être intéressante. Notamment sur le dimensionnement, chaque diamètre doit être adapté aux débits en jeu. Contrairement à un réseau bitube où l'aller et le retour sont de taille identique, en tritube les trois tubes ont un diamètre différent.

Egalement, l'utilisation de vannes à pressions différentielles sur la MT et sur la HT avec conservation d'un delta P constant avec la BT peut permettre un bon fonctionnement et un delta P suffisant. C'est ce qui est en place dans les sous-stations du réseau ARGEO d'Arcueil-Gentilly.

4.3. Equilibre de production/consommation par effet sur la température HT

Comme vu précédemment, l'équilibre entre production de MT et consommation de MT est important.

Si la production de MT est inférieure en débit à la consommation de MT, alors un appoint de HT est nécessaire dans les sous-stations MT-BT.

Si la production de MT est supérieure en débit à la consommation de MT, alors une partie du débit MT est by-passé dans la BT, réchauffant alors les retours BT.

Nous nous plaçons dans ce dernier cas. Pour éviter ce dernier phénomène, il est possible de jouer sur la température de départ HT afin de diminuer ce débit de by-pass.

Prenons l'exemple d'un réseau fictif dans lequel les sous-stations HT-MT ont une puissance de deux fois celle des sous-stations MT-BT. Dans cet exemple, les températures d'alimentation et retour primaire sont :

	HT-MT	MT-BT
Température d'alimentation nécessaire	80	60
Température retour primaire	60	40

Les températures d'alimentation sont les températures primaires minimum pour lesquelles les sous-stations fonctionnent ; elles peuvent être dépassées. En prenant pour hypothèse que les vannes de régulation (voir fiche primaire des sous-stations) régulent correctement et ne laissent pas surdébit, et que les échangeurs sont correctement dimensionnés, alors quel que soit la température d'alimentation primaire la température retour primaire est constante, car le débit s'adapte à la puissance à faire passer.

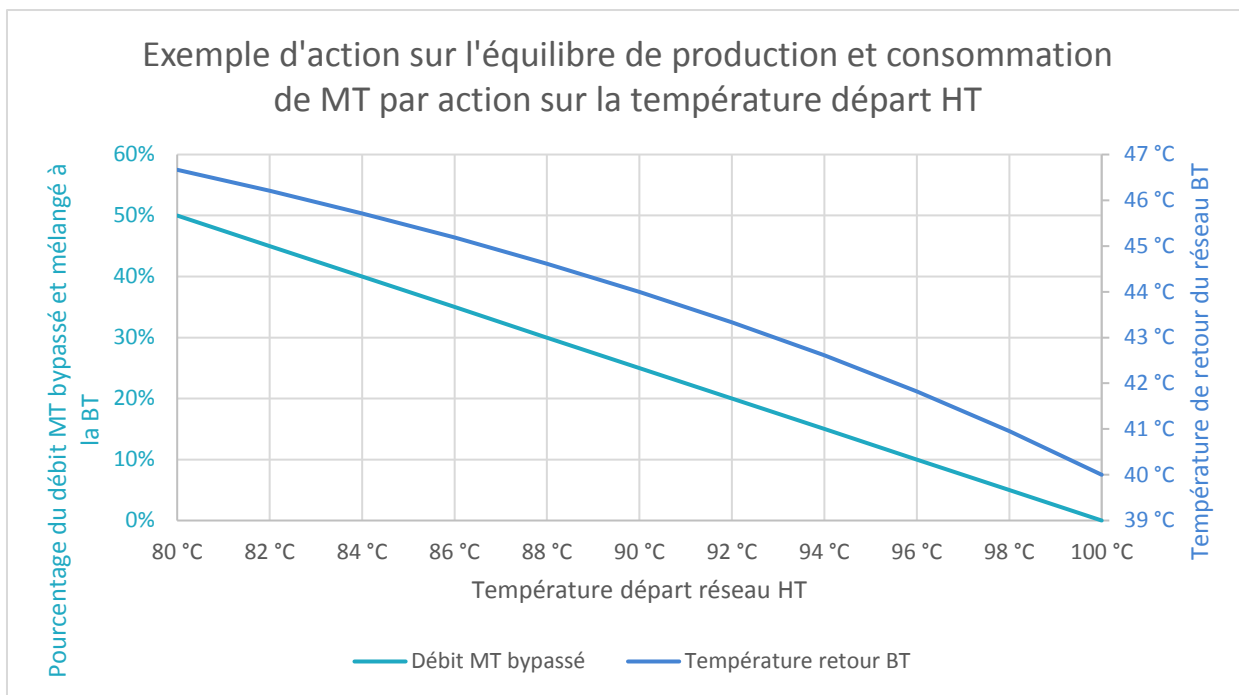
Or, ce débit est proportionnel à la puissance et inversement proportionnel au delta T primaire : plus celui-ci est important, plus le débit est faible.

Dans notre cas exemple, la température d'alimentation des sous-stations MT-BT est toujours 60°C tant qu'il y a suffisamment de MT, donc le débit de consommation de MT est constant sur cette plage.

En revanche, la production de MT va dépendre de la température départ réseau : plus celle-ci est élevée, plus le delta T des sous-stations HT-MT est important, moins le débit est important, moins le débit de MT à 60°C) by-passé dans la BT à 40°C est important, moins la température du BT est élevée.

En bref, il est possible de tendre vers une température départ pour laquelle la production de MT égale la consommation de MT.

Dans ce cas particulier d'un réseau tritube avec surproduction de MT, le résultat contre-intuitif de prime abord est le suivant : plus la température départ est élevée, plus la température retour est froide.



Le réseau de Bonneuil sur Marne, le SETBO, utilise ce phénomène en régulant la température départ du réseau en fonction de l'ouverture de régulation des vannes des sous-stations MT-BT et en visant une ouverture importante (si ces vannes sont fermées, ça veut dire que le débit de MT est trop important).



Fédération Nationale des Collectivités Concédantes et Régies

Optimisation et modélisation des réseaux de chaleur

FICHE N°8 – POLICES
D'ABONNEMENT INCITATIVES

Rédigé par : V.BIZOUARD

Relecture : G. PERRIN

Date : 02/12/2019



1. RESUME DE LA FICHE

L'objectif de ces fiches est la vulgarisation de sujets techniques pointus sur le fonctionnement ou les choix techniques des réseaux de chaleur, notamment sur les dernières évolutions technologiques. La prise de décision sur ces sujets peut parfois aboutir sur des décisions non optimisées sur le long terme car visant à l'optimisation directe des investissements. C'est pourquoi il est important que les maîtres d'ouvrage aient des connaissances et des attentes sur le sujet et mobilisent les bons outils pour choisir les moyens en adéquation avec les objectifs fixés.

Ces fiches balaieront l'ensemble du panorama des choix techniques sur les réseaux de chaleur, de la production aux émetteurs finaux en passant par la distribution ; en étudiant quelles sont les méthodes d'optimisation de chacune des facettes.

La présente fiche traite des polices d'abonnement incitatives.

L'objectif de ces polices est de pousser par une récompense financière les abonnés à avoir une meilleure utilisation de l'énergie livrée et de favoriser :

- Les grands delta T de température
- Le lissage de puissance appelée

Cette fiche présente un retour d'expérience sur diverses mises en place de tels tarifs. Les raisons de la réussite ou l'échec de police incitatives sont analysées. Des recommandations globales sont formulées. Une police incitative doit posséder trois volets : l'information, l'assistance, et l'incitation financière.

TABLE DES MATIERES

1. RESUME DE LA FICHE	2
2. CAS COMMUN	4
3. ENJEUX	5
3.1. Les mécanismes de lissage de puissance appelée.....	5
3.2. Les grands deltas de température.....	5
4. INVENTAIRE DE MECANISMES D'INCITATIONS ACTUELS	6
4.1. Cas d'étude : retour d'expérience sur les effets long termes d'une police d'abonnement incitative sur le réseau Danois de Viborg.....	6
4.2. Tour d'horizon de mécanismes existants en France	7
4.2.1. Mécanismes visant à diminuer la puissance de pic.....	8
4.2.2. Mécanismes visant à augmenter le delta de température	8
4.2.3. Conseils	8
4.2.4. Forme des mécanismes incitatifs	9
5. BONNES PRATIQUES	10
5.1. Information.....	11
5.2. Proposition	13
5.3. Incitation.....	13

2. CAS COMMUN

La police d'abonnement est un contrat liant le gestionnaire du réseau (le primaire) et son abonné (le secondaire).

Le cas le plus commun est une police d'abonnement qui indique :

- Une puissance maximale
- Une température départ secondaire maximale / minimale

C'est à notre sens une erreur que de se limiter à ce minimum, puisqu'elle n'impose ni ne favorise aucune efficacité dans l'utilisation de l'énergie.

3. ENJEUX

Comme vu sur la fiche régulation, les modèles d'affaires actuels n'incitent pas les propriétaires à permettre à leurs bâtiments d'agir comme source de flexibilité thermique (qui peut donc être utilisée pour la gestion de la charge de pointe), ni à optimiser leur température de retour.

Il existe un dilemme utilisateur-investisseur : des investissements sont nécessaires pour permettre au bâtiment d'être plus performant, mais les avantages (prix de la chaleur moins élevé) sont répercutés sur tous les utilisateur, l'investisseur n'a donc pas de motivation pour investir.

Les modèles de tarification de la chaleur ne sont pas ajustés pour stimuler un contrôle intelligent.

En fonction de la production, il y a lieu d'envisager des contrats qui favorisent financièrement :

3.1. Les mécanismes de lissage de puissance appelée

Les mécanismes de lissage de puissance appelée, réalisés par le secondaire :

- Soit par un stockage d'énergie,
- Soit par une régulation intelligente et connectée permettant de compter sur l'inertie du bâtiment pour avancer/reculer le pic de charge par rapport au pic de charge total du réseau.

Le but est de maximiser l'utilisation des productions énergies renouvelables et de récupération, qui sont limitées en puissance : aussi augmenter leur production énergétique revient à diminuer les pics de puissances appelées réseaux au-delà desquels des appoints fossiles doivent être engagés.

3.2. Les grands deltas de température

Comme vu notamment sur la présentation générale des fiches, la diminution de la température retour est bénéfique pour le réseau :

- Baisse des pertes thermiques
- Diminution du débit et donc de la consommation électrique
- Augmentation des rendements de beaucoup de production (géothermie, pompe à chaleur, condensation, etc.)

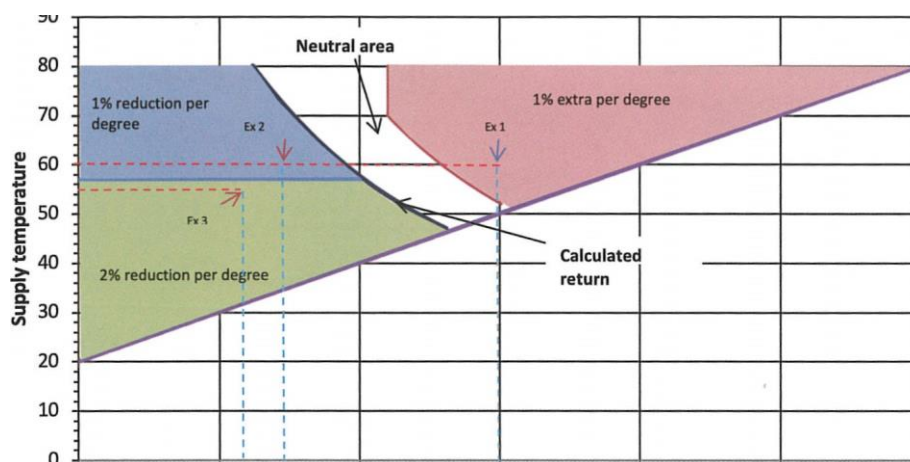
4. INVENTAIRE DE MECANISMES D'INCITATIONS ACTUELS

4.1. Cas d'étude : retour d'expérience sur les effets long termes d'une police d'abonnement incitative sur le réseau Danois de Viborg

D'après l'article « Motivation Tariff » de Tom Diget, paru dans le Magazine HOT|COOL n°1 2019

Le tarif incitatif utilisé à Viborg, Danemark est un modèle dans lequel la température de départ en moyenne annuelle est utilisée pour calculer l'objectif de la température de retour. Les températures moyennes de départ et de retour peuvent être collectées à partir des compteurs d'énergie utilisés à Viborg. Si le client refroidit bien l'eau, l'abonné reçoit un bonus. Si l'installation est inefficace, l'abonné doit payer un supplément.

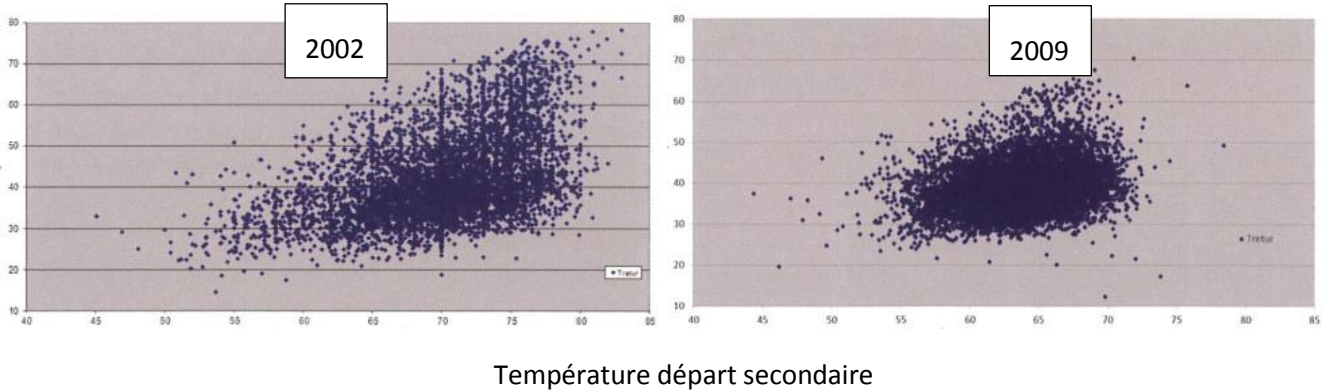
- Si la température de retour secondaire d'un consommateur est **entre le niveau théorique et jusqu'à 6°C au-dessus**, le consommateur paie simplement le **prix standard**. C'est un consommateur normal avec une installation de chauffage normale qui fonctionne normalement. Le client se trouve dans la zone neutre, où il paie simplement le prix standard.
- Si la température de retour moyenne annuelle est **inférieure à la température de retour théorique** calculée, le consommateur bénéficiera d'une **remise de 1 % par degré en dessous de la cible** (zone bleue ci-dessous). La zone d'économie est divisée en deux zones : si la température d'alimentation est faible, les économies sont multipliées par 2 (zone verte).
- Si le consommateur dispose d'une installation de chauffage qui fournit une température de retour **supérieure à la température théorique plus 6 degrés**, il devra payer un supplément. Le **surcoût est de 1 % par degré au-dessus du seuil** (zone rouge). Ces frais supplémentaires se sont avérés très efficaces pour motiver les propriétaires d'immeubles à améliorer leur système de chauffage.



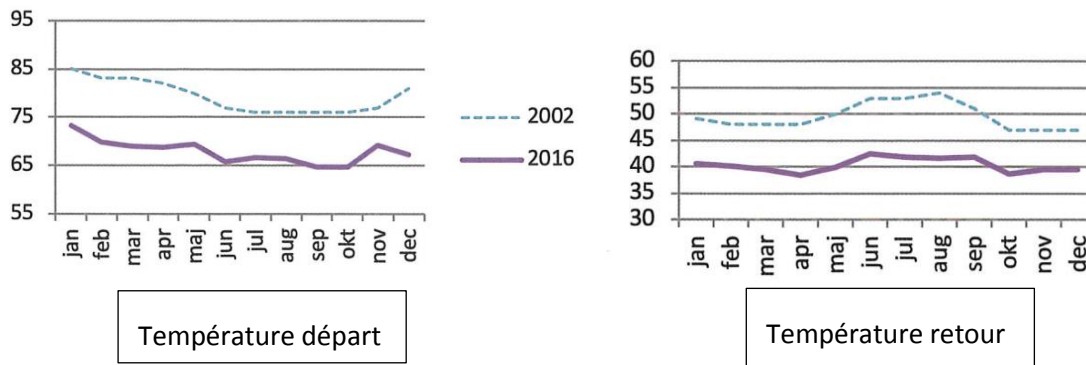
Ce système de bonus-malus s'accompagne d'une prestation de conseil auprès des abonnés. La société d'exploitation aide les clients dont le delta-T est le plus élevé à moderniser leur système, et à sortir de la zone de malus voire d'entrer dans la zone de bonus.

Les graphes ci-dessous montrent pour tous les clients les températures départ et retour de chaque client. En 2002 à l'introduction du tarif incitatif, de nombreux clients ont besoin d'une température d'approvisionnement très élevée et ne parviennent qu'à baisser légèrement la température de retour. En 2009 très peu de clients ont besoin d'une température départ élevée, et beaucoup ont réussi à diminuer leur température retour.

Température retour



Résultats en centrale :



Le tarif incitatif coûte à l'entreprise plus cher en réductions que ce qui est payé en malus par les clients en dépassement. De ce point de vue, le modèle tarifaire coûte à l'opérateur environ 270.000 euros par an.

La réduction des pertes de chaleur, grâce à la possibilité de livrer à une température plus basse, compense largement ces pertes dans l'économie simple et permet à la société Viborg DH d'économiser environ 670 000 euros par an. L'effet global de l'introduction du tarif incitatif est une économie d'environ 400 000 euros par an, qui est répercutée par des baisses de prix pour tous les abonnés.

4.2. Tour d'horizon de mécanismes existants en France

Cette partie non exhaustive récapitule quelques mécanismes incitatifs utilisés sur des réseaux de chaleur français.

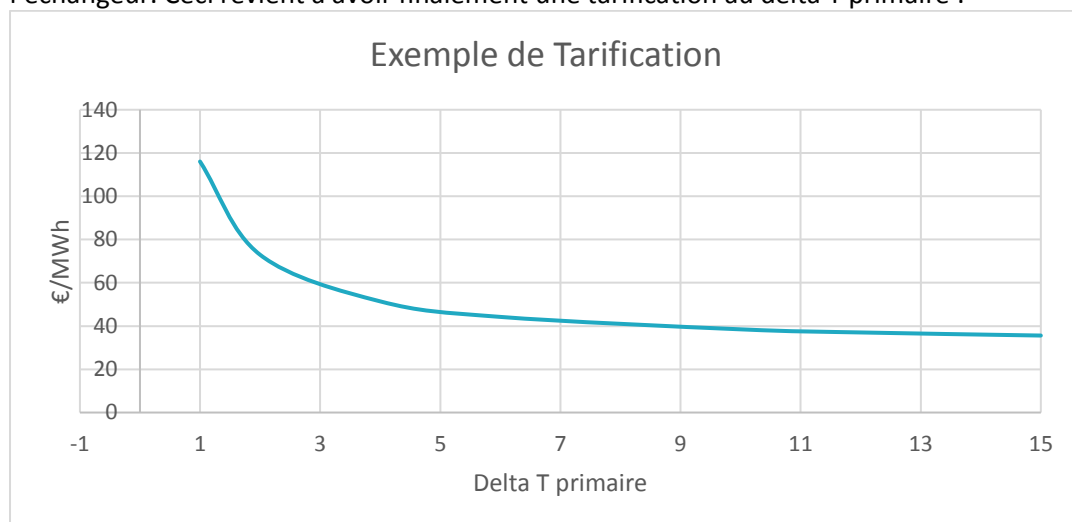
4.2.1. Mécanismes visant à diminuer la puissance de pic

- L'abonné peut choisir de brider volontairement sa puissance souscrite par rapport à la puissance théorique.

4.2.2. Mécanismes visant à augmenter le delta de température

- Les réseaux de froids ont une méthode de facturation au volume : plus le delta T primaire est grand, moins le volume est important, moins l'énergie est facturée. Ce fonctionnement est difficilement applicable en l'état aux réseaux de chaleur, car le delta T primaire ne dépend pas que des températures retour mais aussi de la température départ en chaufferie, indépendante de la volonté des consommateurs.

Un réseau de quatrième génération à boucle tempérée avec température départ constante applique également une forme de tarification au volume : la facturation R1 chauffage se décompose en deux termes : un terme proportionnel à la consommation d'énergie (mesurée par le compteur) et un terme proportionnel au volume de fluide primaire circulant dans l'échangeur. Ceci revient à avoir finalement une tarification au delta T primaire :



- Un réseau redistribue un total de 8000€ si la température retour moyenne annuelle descend de plus de 10°C par rapport à sa valeur classique, auprès des vingt abonnés ayant le plus contribué à cette baisse (soit 400€ par abonné, ce qui n'est pas vraiment incitatif).
- Imposition des régimes de températures retour secondaire aux nouveaux abonnés dans la police d'abonnement
- Reversement d'une partie des économies générées par la baisse des pertes thermiques liées à la baisse des températures retour.
- Certains réseaux ont une police d'abonnement standard promettant une température secondaire et aucune contrainte sur la température retour. Mais, s'ils s'aperçoivent que l'énergie est mal utilisée (delta T secondaire trop faible), alors l'automate diminue légèrement la température d'alimentation secondaire en deçà de la température de consigne théorique.

4.2.3. Conseils

- Réalisation d'un audit gratuit des installations secondaires préconisant les améliorations à effectuer pour optimiser l'efficacité de la sous-station.

4.2.4. Forme des mécanismes incitatifs

D'une manière générale ces mécanismes d'incitations sont laissés à la libre proposition des exploitants lorsqu'ils répondent à des marchés de délégation de service publics. Les propositions sont souvent anecdotiques en termes de montants et ne représentent pas de réelles incitations.

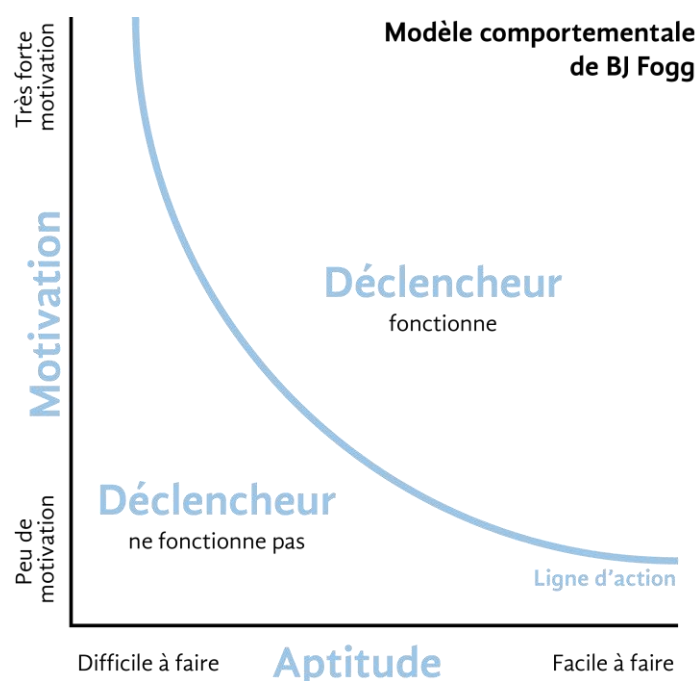
5. BONNES PRATIQUES

5.1. Qu'est ce qui rend une police d'abonnement incitative... incitative ?

Les tarifs incitatifs qui récompensent ou pénalisent les utilisateurs finaux sont souvent inefficaces, car la taille de la pénalité ou de la récompense potentielle est trop faible par rapport à leur facture totale de chaleur et à la difficulté de découvrir le problème créant la mauvaise utilisation de l'énergie.

Le modèle comportemental de Fogg décrit les ingrédients nécessaires à passer à l'action d'une entité ou d'une personne :

- La motivation
- L'aptitude
- Le déclencheur



Pour qu'un déclencheur (l'incitation à améliorer sa sous-station) fonctionne, il faut

- soit que les actions à effectuer soient très faciles à faire (aptitude), auquel cas la Motivation (le tarif incitatif) n'a pas besoin d'être très importante;
- soit créer une forte motivation pour inciter l'utilisateur à mettre en œuvre des actions plus complexes.

Une bonne incitation est donc un mélange d'une motivation tarifaire suffisamment importante et d'une aide apportée suffisamment développée pour encourager le passage à l'action d'un client non sachant : en bref une solution clef en main et bénéficiaire ou neutre pour le client final.

Trois axes sont donc à développer :

- L'information de la performance de la sous-station (le déclencheur)
- La proposition et l'assistance permettant de cibler les transformations à effectuer (l'aptitude)
- L'incitation tarifaire en tant que telle (la motivation).

5.2. Information

Pour que les abonnés puissent modifier leurs installations pour une utilisation plus efficace de l'énergie, ceux-ci doivent être informés au travers d'indicateurs simples, de leur part de contribution à l'efficacité globale du réseau en termes de température retour.

La méthode présentée ici a l'avantage de ne requérir aucun enregistrement de température, et utilise des équipements qui sont déjà installés dans la quasi-totalité des sous-stations : le compteur d'énergie. Il y a donc moyen d'être plus précis, mais cette méthode a l'avantage de ne pas nécessiter d'équipements supplémentaires et est donc adaptable à tous les réseaux.

Sur une période fixe, via les simples relevés des compteurs d'énergie qui équipe la grande majorité des sous-stations de réseau de chaleur urbains, nous pouvons obtenir :

- L'énergie livrée
- Le volume consommé

De ces deux données, nous pouvons calculer le delta T primaire moyen sous-station par sous-station, puisque celui-ci est proportionnel au rapport de l'énergie livrée par le volume.

Nous pouvons alors comparer le delta T de la sous-station au delta T réseau (est-ce que la sous-station contribue au réchauffement ou à l'amélioration des retours), et donner une pondération par le volume qui a transité par la sous-station (plus le volume est important, plus le poids de la contribution à l'amélioration ou à la dégradation du delta T global est important. Au final, nous aboutissons à la contribution de chaque sous-station à la température retour globale.

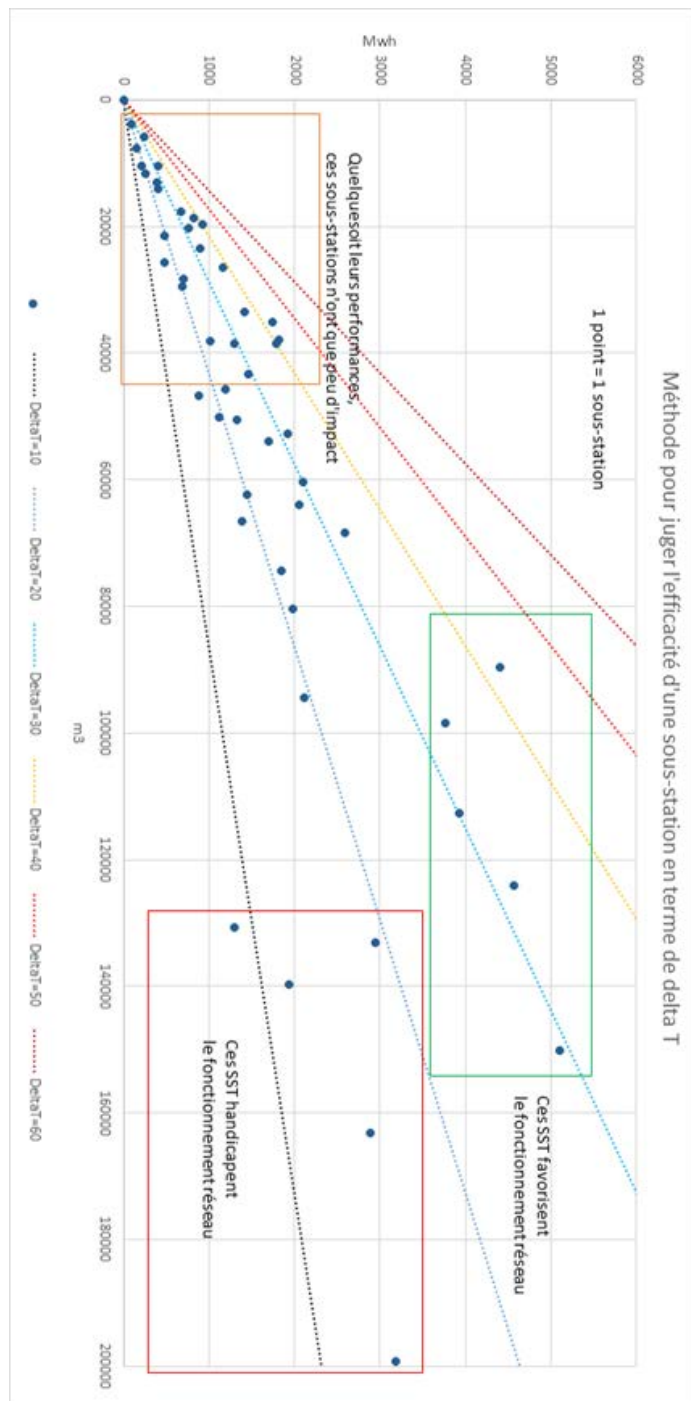
Exemple :

SST	Données relevées		Données calculées	
	MWh	m3	Delta T	Contribution
A	773	22980	29 °C	-0,7 °C
B	910	34098	23 °C	-0,7 °C
C	557	19198	25 °C	-0,5 °C
D	769	36843	18 °C	-0,4 °C
E	368	10944	29 °C	-0,3 °C
F	659	33437	17 °C	-0,3 °C
G	406	17504	20 °C	-0,3 °C
H	260	8617	26 °C	-0,2 °C
I	240	8987	23 °C	-0,2 °C
J	27	3305	7 °C	0,0 °C
K	158	13635	10 °C	0,1 °C
L	221	31780	6 °C	0,4 °C
M	48	20771	2 °C	0,4 °C
N	531	57226	8 °C	0,4 °C
O	957	103127	8 °C	0,8 °C
P	645	111241	5 °C	1,5 °C

L'intérêt de cette technique est qu'elle ne nécessite pas de sous-stations très instrumentées et télérelevées ; un simple compteur d'énergie suffit.

Elle permet d'informer l'abonné de sa contribution moyenne au réseau, et donner une information d'ordre de priorité à l'exploitant si l'on souhaite œuvrer à l'amélioration des températures retour.

Ce tableau peut se visualiser sous la forme d'un graphe permettant à l'opérateur d'avoir une vue globale :



Cette analyse ne rend pas compte des bas delta T qui seraient « normaux » (hauts régimes de températures sur le secondaire).

Une information plus pertinente peut également être mis en place grâce à des télérelevés en continu.

5.3. Proposition

Le délégataire du réseau doit être capable de proposer, notamment aux sous-stations ayant été identifiées comme contribuant à l'augmentation des températures retour du réseau, un audit ciblé sur l'amélioration des températures de retour au niveau du secondaire, la proposition d'un chiffrage clé en main pour le client secondaire ainsi que d'un plan de financement. Si les premiers points sont simples, le dernier point nécessite un calcul théorique précis sur l'effet pour le réseau de l'amélioration en question.

5.4. Incitation

Des mécanismes d'incitations tarifaires non anecdotiques doivent être mis en place pour inciter les abonnés à leur bonne gestion de l'énergie.

Néanmoins, ceux-ci doivent :

- Respecter le principe d'égalité de traitement envers tous les abonnés. Ce point n'est pas trivial : si un abonné contribue à l'augmentation des températures retour parce que l'immeuble est vieux et ses émetteurs hautes températures, mais qu'il n'a pas de surdébits et a une installation bien équilibrée ; doit-il être pénalisé par rapport à un bâtiment qui a été par construction conçu pour fonctionner avec des températures plus froides ? En d'autres termes, l'efficacité doit-elle être vue pour le réseau de manière absolue ou relative ?
- On peut en revanche avoir moins de scrupules en ce qui concerne les bâtiments neufs, et faire en sorte d'imposer aux promoteurs des régimes de températures bas pour que ceux-ci soient prévus dès la construction.
- Être sur des montants suffisamment incitatifs pour provoquer une volonté d'amélioration chez les abonnés. ; mais ne mettant pas en jeu les finances du réseau primaire. Ceci nécessite un calcul de l'influence de baisse de température, et le calcul des impacts financiers, en prenant en compte les moyens de production et l'impact d'une baisse sur ceux-ci.

Glossaire des termes utilisés dans les fiches

Charge : **pour une production, il s'agit de la puissance divisée par la puissance nominale**

Densité thermique : **Quantité d'énergie de chauffage appelée par mètre de conduite du réseau de chaleur installée.**

Degré Jour Unifié (DJU) : Différence de température entre la température extérieure et la température de 18°C (température intérieure des logements), multipliée par la durée de cette différence (en jours).

DN : **Diamètre Nominal (d'une conduite)**

ECS : Eau Chaude Sanitaire

ENR&R : Energies renouvelables et de récupération

Energie : **Mesure, en Wh, kWh, MWh, caractéristique d'un changement d'état d'un système. A savoir ici, un changement ou maintien de température (énergie utilisée pour le chauffage, c'est-à-dire la chaleur), un changement ou maintien de vitesse (énergie mécanique transmise au fluide pour le mettre en mouvement). Un Wh est une unité de mesure d'énergie, correspondant à l'énergie produite par une puissance de 1 watt en une heure. On rencontre plus souvent le kWh (échelle d'un logement) ou le MWh (échelle d'un réseau de chaleur).**

FOD : fioul domestique

FOL : fioul lourd

Foisonnement : Sur un réseau de chaleur, les relances de certaines sous-stations compensent les réduits des autres. Les appels de puissance en sortie chaufferie sont alors lissés, on parle de foisonnement.

HMT : Hauteur Manométrique Totale ; différence de pression créée par une pompe, servant à faire circuler le fluide dans le réseau.

Intermittence : Cette donnée, utilisée dans les bilans de puissance, permet de prendre en compte les éventuels réduits de température selon le type de bâtiment : par exemple la nuit, le week-end ...

PAC : Pompe A Chaleur - appareil permettant de transférer de la chaleur d'un milieu froid à un milieu chaud grâce à un cycle thermodynamique. Sur les réseaux de chaleur, utilisé en combinaison avec une **source (géothermie, eaux usées, etc.) qui n'a pas une température suffisante pour être utilisée telle quelle.**

Pertes de charges : forces de frottement réduisant la pression du fluide. Exprimé en Pa/m ou en mmCE/m

Pertes de charges linéaires : pertes de charges causées par la circulation du fluide dans les tuyauteries

Pertes de charges singulières : pertes de charges causées par la circulation du fluide dans des organes tels que les échangeurs, les vannes, les coudes, etc.

Pertes thermiques : Energie produite mais non consommée par les consommateurs.



Pression différentielle : différence de pression entre les **tuyauteries aller et retour, en bar. C'est cette** différence de pression dans le fluide qui crée la circulation de celui-ci.

Puissance : Mesure, en W, kW, MW, de la production énergétique à fournir à un moment donné.

Puissance nominale : maximal de puissance que peut fournir une production ou consommer un consommateur

Rendement d'un réseau de chaleur : Rapport entre la quantité de chaleur livrée en sous-stations et la **quantité de chaleur produite en tête de réseau, permettant d'évaluer les pertes** thermiques du réseau

Réseau primaire : Partie du réseau de chaleur située en amont des sous-stations, reliant celles-ci aux centrales de production de chaleur

Réseau secondaire : Réseau situé en aval des sous-stations, permettant de relier celles-ci aux locaux à chauffer. Le réseau secondaire ne fait pas juridiquement partie du réseau de chaleur géré par le fournisseur du service de chauffage urbain.

Température de base : Température extérieure de référence pour la réalisation des bilans thermiques. **Elle correspond à la température minimale (constatée au moins 5 jours dans l'année) d'un lieu donné.**

Sous-station : Interface entre le réseau primaire et le réseau secondaire, la sous-station est le lieu où la chaleur est livrée par le **fournisseur du service de chauffage urbain. Physiquement, il s'agit d'un échangeur thermique, situé en général en pied d'immeuble.**

UIOM : Usine d'Incinération d'Ordures Ménagères



RESEAUX DE CHALEUR ET DE FROID



SERVICE RÉSEAUX DE CHALEUR ET DE FROID

Suivez www.fnccr.asso.fr pour toutes les actualités de la filière, les outils dédiés et les formations pour les élus et services !

La FNCCR, Fédération nationale des collectivités concédantes et régies, fédère plus de 850 collectivités dans le domaine de l'énergie (électricité, gaz, EnR&R, chaleur, froid), du numérique et de l'eau et l'assainissement. La FNCCR accompagne les collectivités dans leurs projets EnR&R, en leur apportant un conseil personnalisé et en leur permettant d'échanger et de co-construire ensemble les évolutions de la filière. Le service « réseaux de chaleur et de froid » apporte conseils sur les projets des collectivités, outils, partage d'expériences et de bonnes pratiques.

VOTRE CONTACT

Guillaume PERRIN
tél : 01 40 62 16 30
email : g.perrin@fnccr.asso.fr
🐦 @chaleur_FNCCR

www.fnccr.asso.fr
www.energie2007.fr
www.france-eaupublique.fr
www.telecom2012.fr



Suivez-nous sur twitter :
@fnccr
@energie2007
@fnccr-dechets
@twitteau
@telecom2012
@chaleur_FNCCR