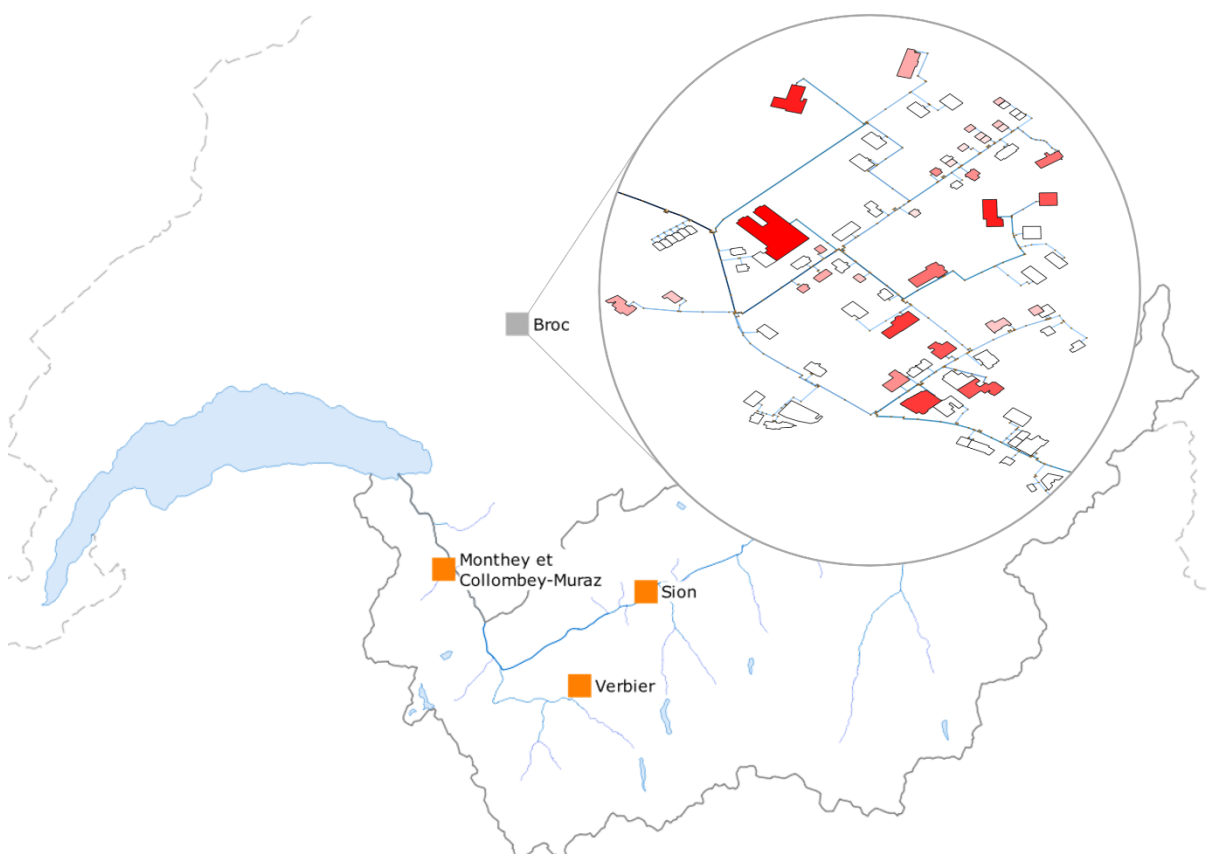




Rapport intermédiaire du 14 novembre 2022, version révisée du 27 janvier 2023

Eguzki

Programme de simulation de réseaux de chauffage à distance
basé sur l'intelligence artificielle pour la résolution rapide et
prédictive de réseaux complexes bouclés



Source : Composition images par RWB Valais SA : réseau CAD de Broc (Idiap Research Institute), Carte Suisse (Swisstopo)



Date : 14 novembre 2022, version révisée : 27 janvier 2023

Lieu : Berne

Prestataire de subventions :

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Cofinancement :

-

Bénéficiaires de la subvention :

RWB Valais SA
Rue d'Aoste 5b
1920 Martigny
www.rwb.ch

SATOM SA
Route Boeuferrant-Nord 16
1870 Monthey 1
www.satomsa.ch

ALTIS Groupe SA
Place de Curala 5
1934 Le Châble
www.altis.swiss

OIKEN SA
Rue de l'Industrie 43
1951 Sion
www.oiken.ch

Idiap Research Institute
Rue Marconi 19
1920 Martigny
www.idiap.ch

Auteur(s) :

Michel Bonvin (chef de projet), SATOM SA, bom@netplus.ch
Patrick Dewarrat, RWB Valais SA, patrick.dewarrat@rwb.ch
Jérôme Kämpf, Idiap Research Institute, jerome.kaempfer@idiap.ch
Mentor Ilazi, SATOM SA, mentor.ilazi@satomsa.ch
Anissa Nafzger, RWB Valais SA, anissa.nafzger@rwb.ch

Suivi du projet à l'OFEN :

Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/502111-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Abstract

District heating networks have a significant role to play in terms of energy efficiency, since they allow the recovery of heat usually lost in the environment.

However, to be profitable compared to the production of heat of fossil origin (gas, fuel oil), the operators of these networks must be able to reduce losses in the pipes while ensuring a stable supply all year round. They also must provide for expansion opportunities to use the power that the energy efficiency measures imposed on buildings will generate. Concretely, they must be able to dynamically optimize the control parameters of their networks and simulate their extensions as a function of demand and local production of buildings.

The use of artificial intelligence (the core of this approach) should enable instantaneous simulation to replace explicit physical simulation of networks. The aim is to develop decision-support software for contractors to enable them to proceed with foresight when making heavy investments.

In fact, Eguzki will make it possible, on the one hand, to optimize the architecture of the networks by reducing the investment costs and, on the other hand, to optimize the operation and reduce the energy losses of the network.

Zusammenfassung

Fernwärmenetze spielen eine wichtige Rolle in Bezug auf die Energieeffizienz, da sie die Rückgewinnung von Wärme ermöglichen, die normalerweise an die Umwelt verloren geht.

Um jedoch im Vergleich zur Erzeugung fossiler Wärme (Gas, Heizöl) rentabel zu sein, müssen die Betreiber dieser Netze in der Lage sein, die Verluste in den Rohrleitungen zu verringern und gleichzeitig eine stabile Versorgung über das ganze Jahr hinweg sicherzustellen. Sie müssen auch Erweiterungsmöglichkeiten vorsehen, um die Leistung zu nutzen, die durch die erforderlichen Energieeffizienzmaßnahmen von Gebäuden freigesetzt wird. Konkret müssen sie in der Lage sein, die Steuerparameter ihrer Netze dynamisch zu optimieren und ihre Erweiterungen als Funktion der lokalen Nachfrage und Produktion der Gebäude zu simulieren.

Der Einsatz künstlicher Intelligenz (das Herzstück dieses Ansatzes) soll eine sofortige Simulation anstelle der expliziten physikalischen Simulation der Netze ermöglichen. Es geht darum, eine Software zu entwickeln, die den Betreibern bei der Entscheidungsfindung behilflich ist, damit sie mit Zuverlässigkeit hohe Investitionen tätigen können.

In der Praxis wird Eguzki einerseits die Netzarchitektur durch Senkung der Investitionskosten optimieren und andererseits ebenso den Betrieb durch das Verringern der Energieverluste des Netzes optimieren.



Résumé

Les réseaux de chaleur à distance ont un rôle prépondérant à jouer au niveau de l'efficacité énergétique, puisqu'ils permettent la valorisation de chaleur habituellement perdue dans l'environnement.

Toutefois, afin d'être rentables par rapport aux productions de chaleur d'origine fossile (gaz, mazout), les exploitants de ces réseaux doivent être en mesure de réduire les pertes dans les conduites tout en assurant un approvisionnement stable toute l'année. Ils doivent aussi prévoir des possibilités d'extension pour utiliser la puissance qui ne manquera pas d'être libérée par les efforts d'efficacité énergétique demandés aux bâtiments. Concrètement, ils doivent pouvoir optimiser dynamiquement les paramètres de contrôle de leurs réseaux et en simuler les extensions comme fonction de la demande et de la production locale des bâtiments.

Le recours à l'intelligence artificielle (le cœur de cette démarche) devra permettre d'effectuer une simulation instantanée en remplacement de la simulation physique explicite des réseaux. Il s'agit de développer un logiciel d'aide à la décision pour les contracteurs afin de leur permettre de procéder avec clairvoyance à de lourds investissements.

Dans les faits, Eguzki va permettre, d'une part, d'optimiser l'architecture des réseaux en diminuant les coûts d'investissement et, d'autre part, d'optimiser l'exploitation en diminuant les pertes énergétiques du réseau.



Note au lecteur

Ce rapport intermédiaire 2022 reprend l'essentiel des contenus présentés dans le rapport intermédiaire 2021 et les complète par la description des activités et des réalisations de l'année en cours. Les éléments nouveaux sont présentés dans les chapitres suivants, en tant que complément ou sous la forme d'un chapitre nouveau :

- 3.3 Recherche d'erreurs topologiques
- 3.4 Conditions de bord pour réseaux bouclés
- 3.5 Groupes pompes départ CAD
- 3.6 Digitalisation d'une sous-station
- 3.7 Digitalisation des cas particuliers
- 4.5 A4 – Mesure, filtrage et fiabilisation des données du cas d'étude 1 SATOM
- 4.6 A5 – Calibration des modèles physiques de simulation
- 4.7 A6 – Préparation des données pour l'apprentissage
- 4.8 A7 – Préparation du modèle statistique réseau de neurones profond
- 4.9 A8 – Modélisation du réseau de ALTIS à Verbier
- 4.10 A8 – Modélisation du réseau de OIKEN à Sion
- 4.11 A9 – Amélioration sur réseau de la SATOM
- 4.12 A13 – Développement de l'interface utilisateur
- 5. Evaluation des résultats obtenus
- 6. Suite des travaux
- 7. Coopération nationale et internationale



Table des matières

Abstract	3
Zusammenfassung	3
Résumé	4
Note au lecteur	5
Table des matières	6
Table des figures	7
Table des tableaux	8
Liste des abréviations	8
1 Introduction	9
1.1 Contexte et arrière-plan	9
1.2 Justification du projet	9
1.3 Objectifs du projet	9
2 Description des installations	10
2.1 Description des installations SATOM	10
2.2 Description des installations ALTIS	12
3 Procédure et méthode	13
3.1 Architecture logicielle	14
3.2 Digitalisation d'un réseau	15
3.3 Recherche d'erreurs topologiques	16
3.4 Conditions de bord pour réseaux bouclés	17
3.5 Groupe pompes départ CAD	17
3.6 Digitalisation d'une sous-station	18
3.7 Digitalisation des cas particuliers	19
4 Travaux effectués et résultats	20
4.1 A0 – Gestion de projet	21
4.2 A1 – Revue de littérature et des méthodes physiques de simulation	21
4.3 A2 – Base de données pour le cas d'étude 1 - SATOM	22
4.4 A3 – Import et export des données pour la simulation physique du réseau	22
4.5 A4 – Mesures, filtrage et fiabilisation des données du cas d'étude 1 - SATOM	23
4.6 A5 – Calibration des modèles physiques de simulation	24
4.7 A6 – Préparation des données pour l'apprentissage	26
4.8 A7 – Préparation du modèle statistique réseau de neurones profond	27
4.9 A9 – Améliorations sur le réseau de la SATOM	28
4.10 A10 – Modélisation du réseau ALTIS à Verbier	30
4.11 A10 – Modélisation du réseau OIKEN à Sion	31



4.12	A13 – Développement de l'interface utilisateur	31
5	Évaluation des résultats obtenus	36
6	Suite des travaux	36
7	Coopération nationale et internationale	37
8	Publications	37
9	Bibliographie	37
10	Annexes	38
10.1	Structure de la base de données d'un réseau de chaleur	38
10.2	Tableau des améliorations proposées par SATOM	40

Table des figures

Figure 1 : Vue du réseau actuellement en déploiement à Verbier avec les 3 centrales de chauffe actuelles.	12
Figure 2 : Représentation schématique de l'architecture logicielle.	14
Figure 3 : Représentation de la simplification utilisée dans la digitalisation du réseau.	15
Figure 4 : Représentation de la méthode de digitalisation semi-automatique du réseau.	16
Figure 5 : Sous-station standard avec un échangeur de chaleur.	18
Figure 6 : Sous-station type 2 avec deux échangeurs de chaleur.	19
Figure 7 : Sous-station type 3 avec trois échangeurs de chaleur.	19
Figure 8 : Schéma de principe des outils d'import et export basés sur la base de données A2.	23
Figure 9 : Visualisation QGIS des données d'entrée de la simulation physique (gauche), et des résultats de simulations (droite).	23
Figure 10 : Calibration de la demande d'une sous-station en fonction des données de consommation mesurées (gauche) et de la facturation (droite).	24
Figure 11 : Évolution temporelle et distribution des erreurs relatives comparant les résultats de simulation avec les données mesurées sur la température d'entrée de la centrale de chauffe à Broc.	25
Figure 12 : Évolution temporelle et distribution des erreurs relatives comparant les résultats de simulation avec les données mesurées sur la température d'entrée de la centrale des Trois Rocs en 2019.	25
Figure 13 : Représentation des résultats de prédictions pour le 21 mars à 7h (droite), et comparaison entre les solstices et équinoxes (gauche).	27
Figure 14 : Modélisation de la température de départ du CAD de la SATOM (gauche), représentation du débit simulé dans les conduites de la SATOM (droite).	27
Figure 15 : Implémentation de pyDHN avec les convergences hydrauliques et thermiques (gauche), modèle statistique pour la détermination des débits (hydrauliques) selon 3 approches.	28



Figure 16 : Modélisation du réseau de Verbier.	30
Figure 17 : Capture situation réseau projeté (en violet) et réseau exécuté (en rouge) à Sion.	31
Figure 18 : Ruban présentant les différents boutons permettant l'utilisation d'Eguzki.	32
Figure 19 : Fenêtre d'introduction et de visualisation des caractéristiques d'une sous-station.	32
Figure 20 : Fenêtre d'introduction et de visualisation de caractéristiques d'une conduite.	33
Figure 21 : Fenêtre d'introduction et de visualisation des points de départ et d'arrivée d'une conduite.	33
Figure 22 : Fenêtre d'introduction et de visualisation de caractéristiques d'une conduite.	34
Figure 23 : Fenêtre présentant différents paramètres essentiels à la définition d'un scénario de simulation.	35
Figure 24 : Paramètres complémentaires pour lancer une simulation.	36

Table des tableaux

Tableau 1 : Evolution du réseau depuis sa mise en service en 2011.	11
Tableau 2 : Grandeurs caractéristiques du réseau actuel.	11
Tableau 3 : Tableau représentant l'état du réseau.	17
Tableau 4 : Résumé des paramètres d'une pompe selon le nombre des pompes en parallèle.	18
Tableau 5 : Revue des différentes simplifications utilisées lors de la digitalisation des sous-stations.	20
Tableau 6 : Tableau des améliorations proposées par SATOM.	40

Liste des abréviations

CAD	Réseau de chauffage à distance
CoPil	Comité de pilotage de projet
DH	District heating
DirPro	Direction de projet
IA	Intelligence artificielle
IDIAP	Idiap Research Institute
MCR	Mesure, commande et régulation
KVS	Coefficient de perte de charge minimum lié à un ensemble hydraulique
SIT	Système d'information territoriale
UVTD	Usine de valorisation et de traitement des déchets



1 Introduction

1.1 Contexte et arrière-plan

Les réseaux de chaleur à distance ont un rôle prépondérant à jouer au niveau de l'efficacité énergétique puisqu'ils permettent la valorisation de chaleur habituellement perdue dans l'environnement.

Toutefois, afin d'assurer leur rentabilité par rapport aux productions de chaleur d'origine fossile (gaz, mazout), les exploitants de ces réseaux doivent être en mesure de réduire les pertes dans les conduites tout en assurant un approvisionnement stable toute l'année. Ils doivent aussi prévoir des possibilités d'extension pour utiliser la puissance qui ne manquera pas d'être libérée par les efforts d'efficacité énergétique demandés aux bâtiments. Concrètement, ils doivent pouvoir optimiser dynamiquement les paramètres de contrôle de leurs réseaux et en simuler les extensions comme fonction de la demande et de la production locale des bâtiments.

Le bureau d'ingénieurs RWB a conçu le logiciel Eguzki ramifié en 2017-2018 avec l'aide de l'école d'ingénieurs de Fribourg. Ce logiciel est utilisé avec très grande satisfaction par RWB pour ses nombreux clients exploitants et contracteurs. Basé sur une résolution algorithmique physique, il est adapté aux réseaux ramifiés avec un seul point d'injection. Les grands exploitants y ont trouvé une solution en pleine adéquation avec leurs besoins pour les petits réseaux.

En l'état, **le logiciel Eguzki n'est pas applicable pour les grands réseaux bouclés avec plusieurs points d'injection**. Or on s'attend à ce que, comme l'implique la stratégie énergétique 2050, les réseaux de chaleur se développent en nombre et en taille, au point que les grands réseaux de demain seront bouclés et auront plusieurs points d'injection. Dès lors, pour pouvoir les simuler de manière pratique, il est nécessaire de passer par un mode de résolution avec l'IA (Intelligence Artificielle) basé sur de la statistique.

1.2 Justification du projet

Le recours à l'intelligence artificielle (le cœur de cette démarche) devra permettre d'effectuer une simulation instantanée en remplacement de la simulation physique explicite des réseaux, laquelle s'avère généralement longue et gourmande en puissance de calcul. Il s'agit de développer un logiciel d'aide à la décision que les contracteurs pourront utiliser avant de procéder à de lourds investissements.

Dans les faits, Eguzki va permettre, d'une part, d'optimiser l'architecture des réseaux en diminuant les coûts d'investissement et, d'autre part, d'optimiser l'exploitation et de minimiser les pertes énergétiques du réseau.

1.3 Objectifs du projet

Le bureau d'ingénieurs RWB et les 3 exploitants de réseaux ALTIS, OIKEN et SATOM ont affiné l'expression de leurs besoins, afin de formuler le cahier des charges d'un logiciel adaptés aux réels enjeux du métier. Dans un premier temps, Eguzki sera développé et calibré sur le réseau de la SATOM. Dans un deuxième temps, le modèle sera transposé sur les réseaux ALTIS et OIKEN. Enfin, des tests



et mesures physiques seront effectuées avec l'objectif d'affiner les modèles de simulation au point que l'écart entre simulation et réalité reste inférieur à 10 %.

En outre, l'outil Eguzki doit aussi conduire à des améliorations concrètes au niveau de l'exploitation des réseaux existants : Pour ce qui est du réseau actuel de la SATOM, au moins 5 actions correctives issues de la simulation seront mises en place et suivies pendant une année afin de vérifier la pertinence des optimisations convenues. Comme actions correctives, on peut par exemple penser aux possibilités que voici :

- Optimisation de la température départ CAD en fonction des conditions météorologiques ;
- Optimisation de la pression départ CAD en fonction de la demande de chaleur ;
- Mise en place de régulateurs de pression actifs afin d'améliorer la répartition des pertes de charges sur le réseau ;
- Modification des sous-stations qui perturbent le plus le réseau au niveau de la température de départ CAD ;
- Modification des sous-stations dont la demande est oscillante ;
- Mise en place d'un surpresseur saisonnier (hiver) sur la branche où la pression est la plus faible ;
- Optimisation du dimensionnement d'une extension en projet ;
- Mise en place d'un bouclage complémentaire.

2 Description des installations

2.1 Description des installations SATOM

SATOM SA est une entreprise active dans le traitement des déchets. Sa vision est d'innover sans cesse pour valoriser les matières, produire de l'énergie propre et préserver l'environnement. Fondée en 1972, elle a d'abord développé son site d'incinération de Monthey où les déchets sont aujourd'hui valorisés sous forme d'énergie (couplage chaleur-force) ainsi que sous forme de matière (récupération des métaux).

SATOM produit donc, avec l'énergie contenue dans les déchets, de la vapeur d'eau qui permet d'entraîner une turbine et de produire de l'électricité. Une partie des rejets de chaleur est récupérée pour alimenter le chauffage à distance sur les communes de Monthey et de Collombey-Muraz, soit 450 abonnés, ce qui représente une puissance souscrite de 48 MW.



L'énergie issue de la combustion est d'environ 600 GWh/an. Cette énergie permet une valorisation électrique d'environ 140 GWh_{élec}/an et une valorisation thermique de plus 80 GWh_{th}/an pour les besoins du thermoréseau.

L'UVTD SATOM possède deux fours d'incinération avec un régime de production de vapeur de 42 t/h chacune, ce qui donne une production annuelle brute de vapeur d'environ 630'000 t/an (pression nominale de 49 bar_{abs} et une température de service de 410 °C).

Le thermoréseau actuel récupère en premier lieu l'énergie en ruban contenue dans les rejets gazeux. Pour les pointes de demande, un soutirage de la vapeur à 3 et 6.5 bar_{abs} est effectué. Le système de chaleur urbain déployé à Monthey et à Collombey est un réseau bouclé avec de faibles contraintes gravitationnelles, dont la pression nominale est PN16 et la température de service nominale de 120 °C (la température de fonction se situe plutôt entre 70 et 95 °C en fonction de la température extérieure). Le caloporteur (eau chaude) est acheminé dans des tubes rigides pré-isolés en métal (acier) avec une isolation thermique qui est constituée de mousse dure en polyuréthane. La chaleur livrée par le thermoréseau à ses clients remplace la production de chaleur décentralisée (principalement gaz naturel et mazout) pour le chauffage des bâtiments et la préparation d'eau chaude sanitaire. Cette revalorisation énergétique d'une usine d'incinération des déchets est considérée comme n'émettant pas de CO₂ donc neutre en émissions sachant que les déchets sont de provenance indigène.

Le tableau 1 ci-dessous présente l'évolution des caractéristiques générales du réseau depuis sa mise en service en 2011. Le tableau 2 résume des grandeurs particulières telles que températures aller et retour, pression, volume d'eau et débit.

	Unités	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Energie totale injectée dans le réseau	MWh	1821	6072	19590	32100	49073	63251	74131	72432	79702	81360
Energie livrée aux clients	MWh	1336	5599	15648	26035	38564	54576	64873	62390	69970	71101
Différence	MWh	485	473	3942	6065	10509	8675	9258	10042	9732	10259
Pertes de réseau	%	26.6	7.8	20.1	18.9	21.4	13.7	12.5	13.9	12.2	12.6
Puissance souscrite	kW	1400	6023	15021	24659	31535	37349	40793	43693	45166	47134
Nbre de clients		17	47	105	174	242	296	333	368	389	419
Degrés-jours Aigle		2936	2936	2936	2936	2936	2936	2936	2700	2919	2799
Réductions CO2 obtenues	t d'éq.-CO2	146	669	2802	5136	8007	11544	13790	16785	15439	15241
Nombre de clients		17	30	58	69	68	54	37	35	21	30
Longueur	m'	6000	12000	15000	20000	26000	28000	30000	31000	33000	35000
Densité énergétique	MWh/m'	0.22	0.47	1.04	1.30	1.48	1.95	2.16	2.01	2.12	2.03

Tableau 1 : Evolution du réseau depuis sa mise en service en 2011.

Grandeur	Valeur	Unités
Température aller (hiver / été)	89 / 73	°C
Température retour (hiver / été)	58 / 64	°C
Pression minimale requise	0.8	bar _u
Volume d'eau du réseau	1500	m ³
Débit maximal	880	m ³ /h
Valeur max. des pertes de charges	300	Pa/m
Dénivellation entre le point haut et le point bas	44.5	m

Tableau 2 : Grandeurs caractéristiques du réseau actuel.



2.2 Description des installations ALTIS

La société ALTIS est active dans la commune de Val de Bagnes et développe depuis 2012 plusieurs réseaux de chauffage à distance dont notamment un important dans la station de Verbier, haut lieu touristique de l'Entremont.

La particularité du réseau de Verbier est celle d'être un réseau bouclé complexe qui sera, à terme, alimenté par quatre chaufferies localisées à différents endroits de la station. Ce développement complexe, mais contrôlé, est influencé par l'incitation à se raccorder plutôt que par la contrainte, ce qui implique de profiter des opportunités et de suivre la demande. Toutefois, une planification du réseau à 30 ans a été réalisée (plan directeur) afin d'en maîtriser les investissements.

La zone de desserte de plus de 115 ha se situe dans la zone dense de la station et comprend un dénivelé important de l'ordre de 200 m. Le bâti est principalement composé d'immeubles de logements, d'hôtels, d'habitations individuelles (chalets) et d'un centre sportif (au total 150 bâtiments), reliés par 25 km de conduites aller-retour. La demande en chaleur est fluctuante et guidée par les activités touristiques et l'occupation des résidences secondaires.

Trois chaufferies sont actuellement en fonction dont les deux principales fonctionnant au bois (pellets) et une d'appoint alimentée au mazout. Elles sont toutes intégrées dans le bâti existant. Localisées à l'ouest, à l'est et au centre de la station, elles sont interconnectées par un réseau principal. Afin d'assurer une sécurité d'approvisionnement en énergie, ce réseau principal est dédoublé et des vannes de sectionnement sont installées aux endroits stratégiques du réseau. Des ramifications complètent ces réseaux et alimentent les quartiers à forte densité de constructions de Verbier. La figure 1 présente l'emplacement des 3 centrales de chauffe ainsi que la structure générale du réseau. Une quatrième centrale de chauffe est prévue pour 2028.

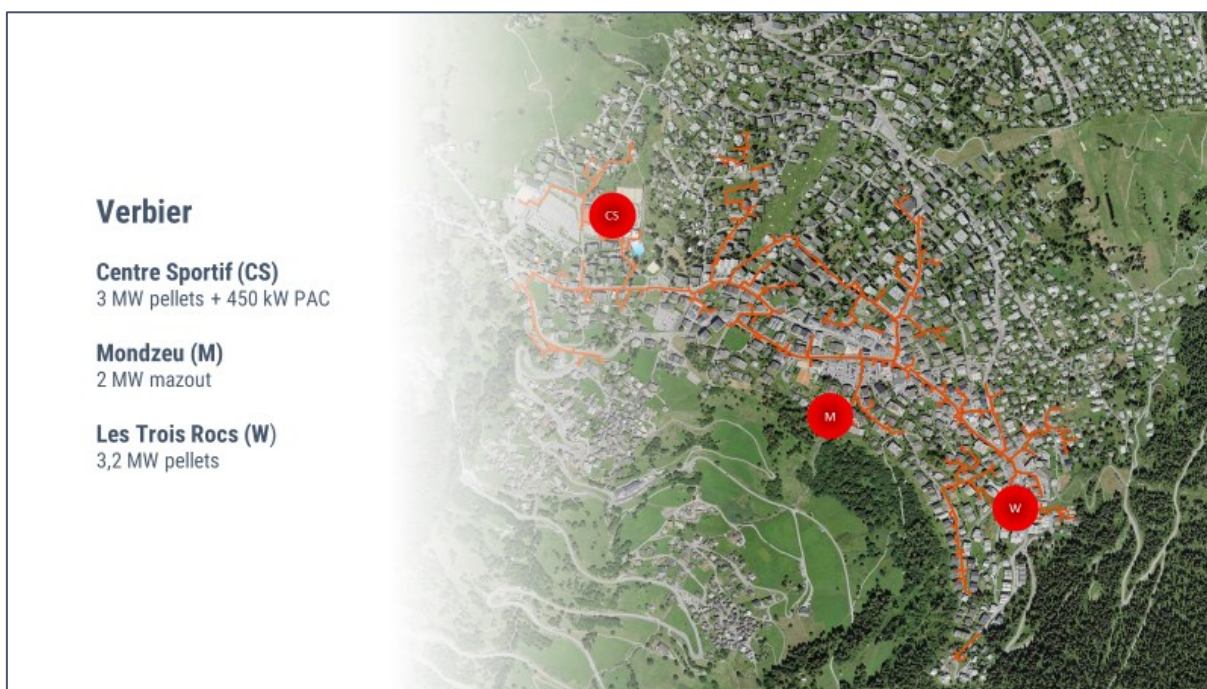


Figure 1 : Vue du réseau actuellement en déploiement à Verbier avec les 3 centrales de chauffe actuelles.



La structure globale complexe du réseau, multi-chaufferies et en boucles, ainsi que le développement intensif des raccordements demandent d'avoir un outil performant d'aide à la décision et adaptatif pour le calcul dimensionnel de base des conduites mais également pour simuler dynamiquement toutes les caractéristiques d'un réseau CAD.

ALTIS investit fortement dans le monitoring des installations (chaufferies, réseaux et sous-stations) et dispose déjà aujourd'hui d'un nombre très important de données pour le pilotage de ses installations. Compte tenu du fort développement du réseau (2-3 km/an) et de l'incertitude de la localisation des raccordements (pas d'obligation de raccordement), l'outil Eguzki est attendu, entre autres, comme :

- Aide à la décision par la simulation de nouveaux tronçons et de nouveaux raccordements ;
- Instrument de visualisation graphique des résultats de simulation au travers d'outils SIT ;
- Instrument de comparaison des différents scénarios d'alimentation du réseau (un, deux ou trois points d'injection) ;
- Outil d'optimisation permettant juger de l'amélioration entre l'état actuel du réseau et l'état projeté, pour ce qui est du rendement, de la pression, de la température, etc.

3 Procédure et méthode

La réalisation du projet Eguzki repose sur la synergie de 3 groupes d'acteurs aux besoins, profils et compétences distinctes :

- Trois exploitants de réseaux de chaleur à distance aux profils très différents. La SATOM exploite depuis plusieurs décennies dans une région de plaine (Monthey-Collombey) un important réseau qui a des besoins d'optimisation quant à son fonctionnement et qui présente encore de bonnes possibilités d'extension. ALTIS exploite déjà un noyau de réseau, situé en montagne (Verbier) et qui se trouve actuellement dans une phase d'expansion rapide. OIKEN a tout juste démarré dans la région de Sion la construction d'un réseau urbain dont le déploiement va se réaliser dans la décennie qui vient. Les exploitants expriment des besoins concrets en provenance du terrain ;
- Un bureau d'ingénieurs, RWB, actif, entre autres, dans la planification de thermoréseaux, et dont les souhaits sont clairement de pouvoir disposer d'un outil de calcul flexible et fiable ;
- Un centre de recherche universitaire de haut niveau, l'IDIAP, qui met ses outils et ses compétences à disposition pour développer les algorithmes nécessaires au calcul des réseaux.

Il est ainsi évident qu'un des éléments essentiels à la réussite d'un tel projet est la constitution d'une équipe de projet soudée, dans laquelle tous les éléments travaillent main dans la main. C'est ainsi que le bureau RWB devient l'élément essentiel de cohésion, responsable à la fois de la collecte et de la formulation des besoins des exploitants et du pilotage fin des travaux de recherche et développement pris en charge par l'IDIAP. L'organisation du projet Eguzki a été pensée et mise en place avec le souci que les différents acteurs puissent œuvrer les uns avec les autres avec toute la cohésion nécessaire.

Concrètement, le logiciel vise plusieurs objectifs soit :

- Conception et digitalisation de réseaux CAD ;



- Optimisation de l'exploitation ;
- Optimisation du fonctionnement des sous-stations ;
- Gestion des centrales de chauffe ;
- Suivi de l'évolution du réseau dans le temps.

L'architecture flexible retenue s'appuie donc sur les SIT (logiciel QGIS) largement utilisés par les collectivités publiques et les exploitants de réseaux (eau potable, électricité, eaux usées ou autres).

3.1 Architecture logicielle

Les éléments entrants nécessaires à un calcul Eguzki sont les suivants (figure 2) :

- Les conditions météorologiques extérieures ;
- Le réseau à simuler qui doit être digitalisé (Digitalisation of DH) ;
- Les consommateurs qui interviennent au niveau des sous-stations (Heating stations) ;
- Les éléments producteurs de chaleur (Heating stations).

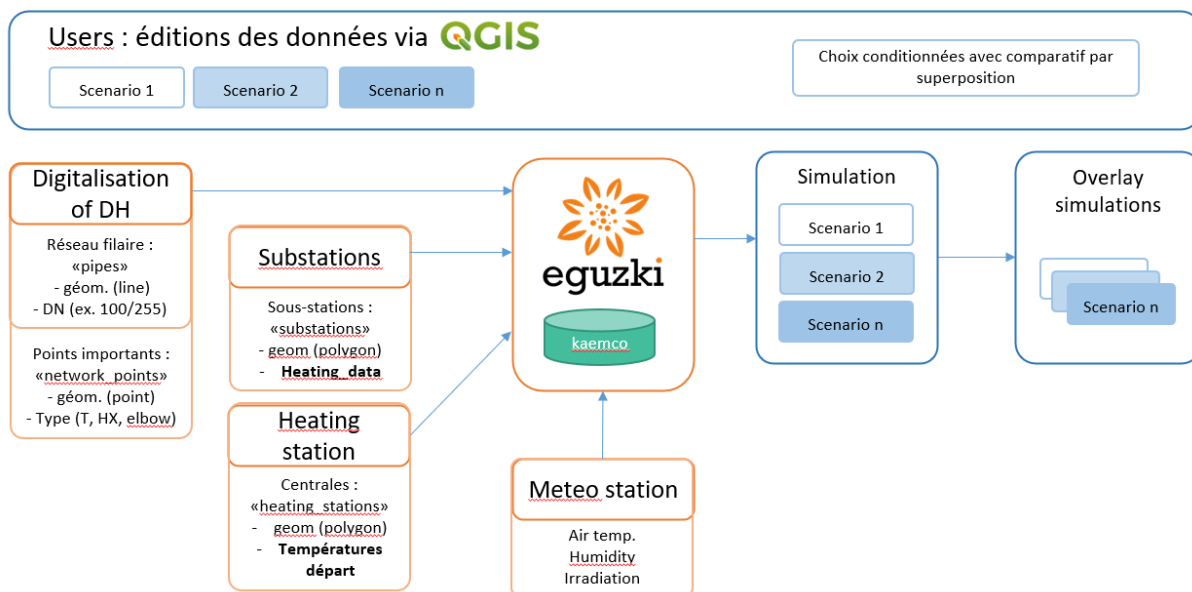


Figure 2 : Représentation schématique de l'architecture logicielle.

Il est ainsi possible de modifier chacun des paramètres et d'analyser les effets de ces modifications sur le réseau. L'exploitant peut agir sur des leviers différents, par exemple :

- La température de départ CAD pour rechercher l'optimum entre les pertes thermiques et la consommation d'électricité des pompes de circulation ;
- Les données météo, ce qui rend possible la simulation de conditions extrêmes telles que température extérieure de -20 °C pendant 3 jours consécutifs ;



- Adaptation de l'architecture du réseau en rajoutant, par exemple, des sous-stations, un bouclage supplémentaire, un producteur, un surpresseur, des vannes de régulation, etc. ;
- Adaptation du fonctionnement du réseau par la modification de la demande d'une sous-station qui perturbe le réseau ;

En sortie, Eguzki va livrer des images des différents scénarios qu'il sera possible de superposer avec un outil de superposition appelé « Overlay simulations ». Par la comparaison de scénarios, les choix qui conviennent le mieux aux objectifs sont ainsi facilités. En résumé, Eguzki est un outil d'aide à la décision.

3.2 Digitalisation d'un réseau

Deux méthodes de digitalisation ont été testées. La première consistait à modéliser la réalité du réseau avec tous ses détails. Mais, face à la multiplicité des éléments et au temps nécessaire à la création du modèle, une méthode simplifiée a été développée. L'idée en est d'abord de dessiner à la main, en s'appuyant sur les points GPS, les lignes (PIPES) d'un réseau unifilaire. Ensuite, le doublement (unifilaire en bifilaire) est réalisé automatiquement, avec reprise de l'altitude. En procédant de la sorte et en introduisant quelques corrections pour les éléments particuliers (par exemple les éléments en T), on s'attend à ce que l'erreur en pertes de charge reste inférieure à 0.5 %. La figure 3 schématise la démarche.



Figure 3 : Représentation de la simplification utilisée dans la digitalisation du réseau.

La digitalisation est ensuite faite de manière semi-automatique. L'utilisateur doit veiller à intégrer (figure 4) :

- Les producteurs de chaleur « heating stations » ;
- Les conduites « pipes » ;
- Les nœuds de calculs « networks points » ;
- Les sous-stations « substations » ;
- Les propriétés des éléments de distribution « pipes properties ».

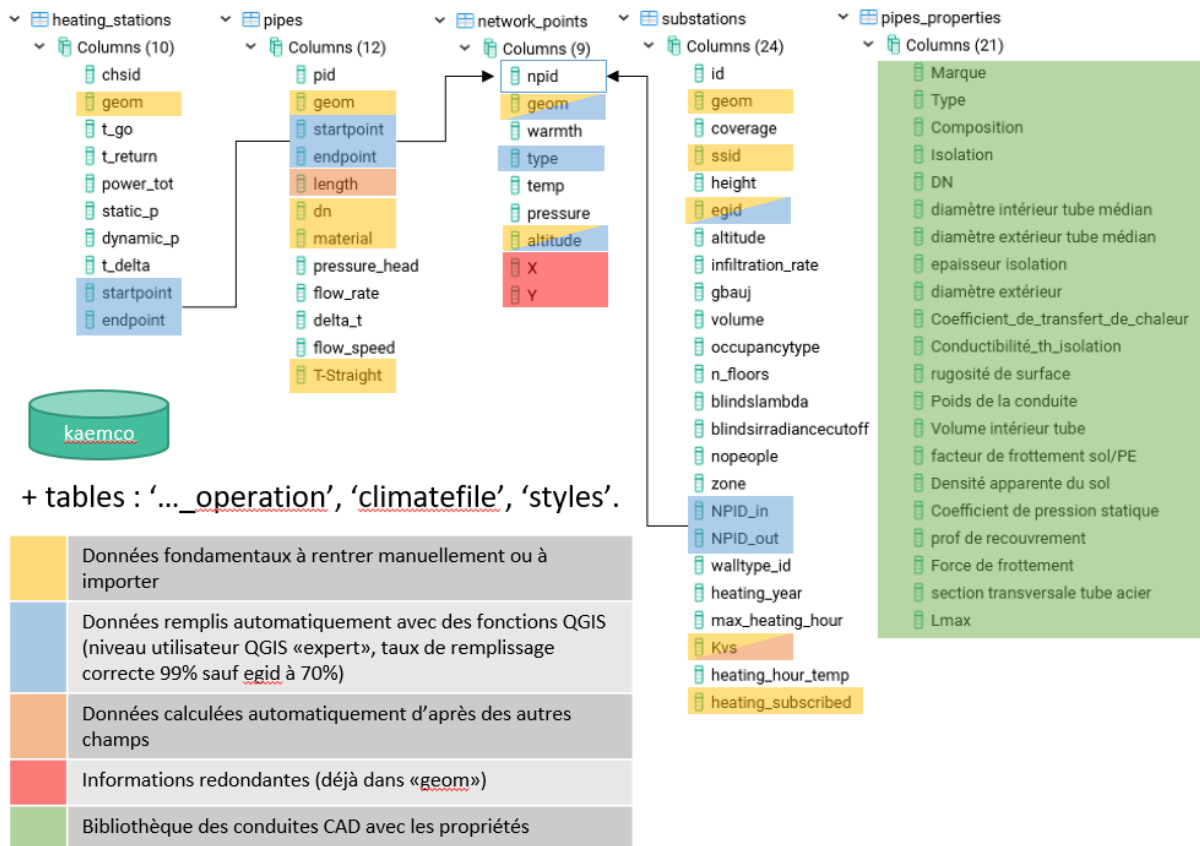


Figure 4 : Représentation de la méthode de digitalisation semi-automatique du réseau.

3.3 Recherche d'erreurs topologiques

Sur les grands réseaux à modéliser comme ceux de SATOM, ALTIS ou OIKEN, des erreurs dans les bases de données lors de la modélisation apparaissent fréquemment. Un outil de recherche d'erreurs a été réalisé en 2 phases. Développé d'abord pour les réseaux ramifiés, celui-ci a été adapté en 2022 pour la recherche d'erreurs sur les réseaux bouclés. Cet outil est une nécessité pour de tels réseaux, car sans lui, il peut être laborieux ou même impossible de mettre en évidence les erreurs dans la connectique du maillage.

Le tableau 3 représente l'état du réseau. Les problèmes sont affichés avec le message « true » ainsi que l'emplacement de l'erreur éventuelle.



Messages:	
is_disconnected:	False
disconnected_nodes:	[]
disconnected_edges:	[]
over_degree:	False
under_degree:	False
converging:	False
diverging:	False
over_degree_nodes:	[]
under_degree_nodes:	[]
converging_nodes:	[]
diverging_nodes:	[]
not_isomorphic:	None
reversed_producers:	True
same_line_producers:	False
reversed_producers_edges:	[('A.2400', 'R.2400')]
same_line_producers_edges:	[]
reversed_consumers:	False
same_line_consumers:	False
reversed_consumers_edges:	[]
same_line_consumers_edges:	[]
WARNING: the results assume that the first heating station gives the correct direction!	

Tableau 3 : Tableau représentant l'état du réseau.

3.4 Conditions de bord pour réseaux bouclés

Les conditions de bord sont essentielles à la convergence des algorithmes de simulation. La démarche retenue pour déterminer les conditions de bord est la suivante :

- Fixer un différentiel de température de 30 K ;
- Vérifier que le débit correspondant au différentiel de température décidé produise une puissance de chauffage supérieure à la somme des puissances de l'ensemble des sous-stations ;
- Puisque les conduites ne peuvent résister qu'à une pression maximale de 25 bar, vérifier qu'avec la perte de charge moyenne de prédimensionnement du réseau, la distance la plus longue multipliée par la perte de charge moyenne ne dépasse pas les 25 bar ;
- Définir une centrale « Master » avec des pompes à débit variable allant jusqu'à 25 bar et placer les autres centrales en mode « Slave » avec des débits fixes à puissance constante.

3.5 Groupe pompes départ CAD

Le groupe de départ d'une centrale comprend généralement plusieurs pompes identiques en parallèle. Pour simplifier la modélisation du groupe de départ, plusieurs pompes sont regroupées et représentées par une courbe caractéristique résultante. Le tableau ci-dessous présente les paramètres de la pompe résultante installée à la SATOM.

Les valeurs caractéristiques a_1 et a_2 du tableau 4 sont calculées par rapport au moteur de la pompe, sur trois points de fonctionnement à la même fréquence. Le domaine de validité de la courbe



caractéristique, pour ne pas rentrer dans une zone de cavitation, peut être simplifié avec un débit minimal et un débit maximal en fonction de la vitesse de rotation :

$$\Delta p_{pump} = a_0 \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + a_1 \frac{\omega}{\omega_0} \dot{m} + a_2 \dot{m}^2$$

$$\dot{m}_{min} = \dot{m}_{nominal} \cdot \frac{\omega}{\omega_0} \cdot 15\%$$

$$\dot{m}_{max} = \dot{m}_{nominal} \cdot \frac{\omega}{\omega_0}$$

nr de pompes en parallèle	1	2	3	4	Unités
ω_0	2'982	2'982	2'982	2'982	1/min
a_0	1'500'000	1'500'000	1'500'000	1'500'000	Pa
a_1	4'460	2'230	1'487	1'115	Pa·s/kg
a_2	-105	-26	-12	-7	Pa·s ² /kg ²

Tableau 4 : Résumé des paramètres d'une pompe selon le nombre des pompes en parallèle.

3.6 Digitalisation d'une sous-station

Les sous-stations sont simplifiées avec un point d'entrée et un point de sortie 'HX'. Les vannes de type BALLOMAX n'ont pas d'influence sur la perte de charge (diamètre passage intégral). Dès lors, on travaille sur une perte de charge globale qui est directement influencée par l'ouverture de la vanne 2 voies motorisée. A pleine demande, la vanne est entièrement ouverte.

Sur le réseau CAD de la SATOM, la totalité des sous-stations installées sont de type standard et la représentation schématique de fonctionnement est présentée à la figure **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ci-dessous. Chaque compteur de chaleur est lié à un numéro client qui permet d'associer les données historiques d'énergie et de température sur le modèle digitalisé.

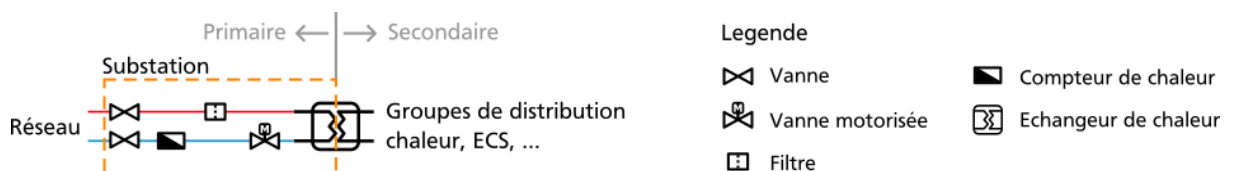


Figure 5 : Sous-station standard avec un échangeur de chaleur.

Le réseau CAD ALTIS comprend plusieurs types de sous-stations :

- **type standard**



- **type double** avec deux échangeurs (un pour le chauffage et un pour l'eau chaude sanitaire). Vu qu'un seul compteur de chaleur est installé, cette sous-station est simplifiée pour être assimilée à une sous-station de type standard.



Figure 6 : Sous-station type 2 avec deux échangeurs de chaleur.

- **Type triple** : les bâtiments équipés de rampes chauffantes pour le déneigement sont équipés d'un échangeur complémentaire dédié à cette fonction. La figure 7 ci-dessous représente un bâtiment avec trois échangeurs de chaleur. Cette typologie de type 3 est simplifiée pour être réduite à deux sous-stations standard.

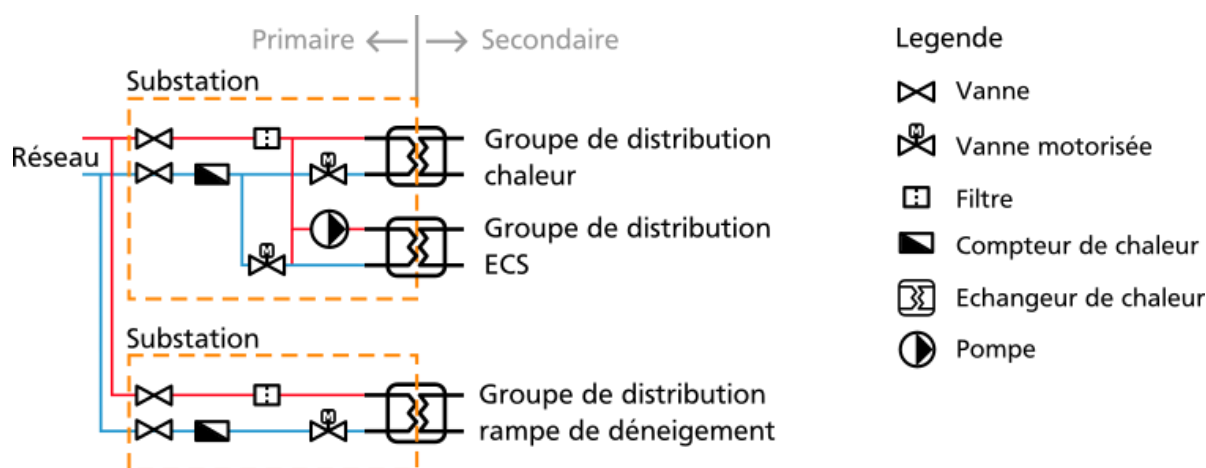


Figure 7 : Sous-station type 3 avec trois échangeurs de chaleur.

3.7 Digitalisation des cas particuliers

Dans le cas d'étude de la SATOM mais aussi pour ALTIS, la représentation d'une sous-station sous forme de multi-polygone n'est plus suffisante. En effet, il est possible de rencontrer des empreintes au sol du plan officiel cadastral qui sont superposées, ou un bâtiment à plusieurs sous-stations, ou même plusieurs bâtiments chauffés à partir d'une seule sous-station. Dans la table suivante, on présente un résumé des différents cas spéciaux.



	Base	Simplification 1	Simplification 2	Description
1				Un bâtiment avec une seule introduction de conduites et deux sous-stations, est simplifié et réduit à une seule surface « bâtiment/sous-station » ou à une surface bâtiment et deux objets ponctuels de type sous-station.
2				Un bâtiment avec deux introductions de conduites distinctes, avec deux sous-stations, est simplifié et réduit à deux surfaces « bâtiment/sous-station » ou à une surface bâtiment et deux objets ponctuels sous-stations.
3				Trois bâtiments distincts chauffés par une seule sous-station
4				Sous station Type 3 ALTIS avec rampe chauffante

Legende

Conduite	Point type "HX"	Bâtiment	Sous-station
Point type "T"	Point type coude, vanne, réduction de diamètre	Rampe de déneigement	

Tableau 5 : Revue des différentes simplifications utilisées lors de la digitalisation des sous-stations.

4 Travaux effectués et résultats

Lors de la formulation du projet, un découpage de l'ensemble en 13 paquets d'activités (A0 à A12) a été proposé. Dans le cadre de ce rapport annuel, seuls sont mentionnés ci-dessous les paquets



d'activités dans lesquels des travaux conséquents ont été déployés jusqu'ici, c'est-à-dire A0 à A7, A9, A10 et A13. On se souviendra que les paquets d'activités A0 à A6 ont été largement travaillés en 2021.

4.1 A0 – Gestion de projet

Le projet a été organisé pour favoriser dans toute la mesure du possible l'atteinte des objectifs exprimés par les exploitants de réseaux de chaleur (disposer d'un outil d'optimisation de leur réseau et d'aide à la décision pour extensions à venir) ainsi que ceux exprimés par le bureau d'ingénieurs (disposer d'un outil de calcul flexible et fiable). Elle s'appuie sur 3 éléments :

- Le règlement d'organisation de projet. Il précise l'organigramme du projet, les tâches et responsabilités du comité de pilotage, celles de la direction de projet et celles des partenaires du projet. Il fixe les règles de transparence entre les différents partenaires et précise les différents niveaux de compétences financières.
- Le comité de pilotage de projet (CoPil). Il est composé d'un membre de chacun des 3 exploitants de réseaux, d'un membre du bureau d'ingénieurs et du chef de projet. Il est présidé par un représentant des exploitants et veille à ce que le projet poursuive les objectifs approuvés par l'ensemble des partenaires. Il se réunit trimestriellement et l'a fait à 3 reprises en 2022. Les décisions prises à chaque séance font l'objet d'un procès-verbal.
- Le comité de direction de projet (DirPro), responsable de la réalisation de tous les aspects du projet. Il est présidé par un représentant d'un exploitant de réseau, et est composé d'un représentant des exploitants, d'un représentant du bureau d'ingénieurs et d'un représentant de l'institut de recherche. Il se réunit mensuellement et l'a fait à 9 reprises en 2022. Chaque séance est documentée par un procès-verbal ainsi que deux rapports d'avancement technique, l'un relatant les activités du bureau d'ingénieurs, l'autre celles de l'institut de recherche.

4.2 A1 – Revue de littérature et des méthodes physiques de simulation

Une revue de la littérature au sujet des méthodes et outils de simulation a été réalisée dans les 3 premiers mois du projet. Les systèmes de chauffage urbain sont décomposés en 3 éléments souvent étudiés séparément : les centrales de chauffe, les échangeurs de chaleur liés aux consommateurs et finalement le réseau de distribution. Comme Eguzki se concentre sur la simulation des réseaux de distribution de chaleur (ou chauffage à distance), l'étude de l'état de l'art en la matière s'est concentrée sur les méthodes de modélisation et simulation physiques. L'objectif de ces méthodes est de déterminer pression, débit et température dans les conduites en prenant en compte des conditions de bord fixées. Ces conditions de bord imposées aux limites du réseau de CAD sont données par la (ou les) centrale(s) de chauffe et les échangeurs de chaleur aux consommateurs. Les avantages et inconvénients des outils suivants ont été analysés : CitySim, DESSim, DHNx, ESP-r, Open Modelica, Pandapipes Thermos, outils divers en Matlab et Excel. Les outils ne permettant pas de simuler la pression (DESSim, THERMOS), les outils ne permettant pas de simuler des boucles (DHNx), les outils non-modulaires (Excel) ainsi que requérant une licence (Matlab, Open Modelica) ont été écartés. Le choix final s'est porté sur deux candidats : CitySim et Pandapipes, tous deux open-source et dont les auteurs sont réactifs aux sollicitations. En adaptant les fichiers d'entrée des deux logiciels, il est possible d'imposer les consommations mesurées aux sous-stations, et de simuler un contrôle simple des centrales de chauffe. Les deux logiciels peuvent calculer de façon horaire l'état du réseau en termes de pression, température et débit. Comme escompté, le temps de simulation physique est plutôt long et ne permet pas un ajustement des paramètres de la simulation en temps réel.



4.3 A2 – Base de données pour le cas d'étude 1 - SATOM

Avant de simuler le réseau, toutes les données ont dû être digitalisées dans une base de données SIT (Système d'Information du Territoire). La méthode suivante a été utilisée pour le réseau 1 SATOM :

- Attribution d'un numéro EGID unique pour chaque sous-station (preneur de chaleur) ;
- Attribution des données techniques de chaque sous-station (puissance, KVS) ;
- Digitalisation du réseau avec les coordonnées spatiales ;
- Attribution des caractéristiques des composants du réseau (diamètre hydraulique, isolation, rugosité) ;
- Assemblage de tous les éléments bout à bout, pièces du réseau et sous-stations afin que tous les composants puissent interagir de manière correcte en vue d'une simulation.

La digitalisation est terminée et le modèle prêt pour son utilisation en simulation.

Caractéristiques du modèle digital :

- Nombre de sous-stations : 421 ;
- Longueurs de conduites : 43'050 m ;
- Nombre d'éléments interconnectées : 1'386.

Pour standardiser la demande des données nécessaires à la digitalisation d'un réseau CAD, un document a été réalisé pour résumer les différents échanges avec SATOM (voir annexe 10.1). Ce cahier des charges pour l'acquisition des données sera utilisé pour finaliser l'acquisition des données sur les cas d'étude 2 et 3.

Enfin, nous avons procédé à la spécification et à la commande d'une station météo pour l'enregistrement sur site des données météorologiques.

4.4 A3 – Import et export des données pour la simulation physique du réseau

En nous basant sur la structure de la base de données définie en A2 (annexe 10.1) et les outils de simulation physique identifiés en A1, des programmes informatiques de liaison ont été réalisés pour pouvoir simuler les différents cas d'études qui seront étudiés. La **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** représente graphiquement ces liaisons.

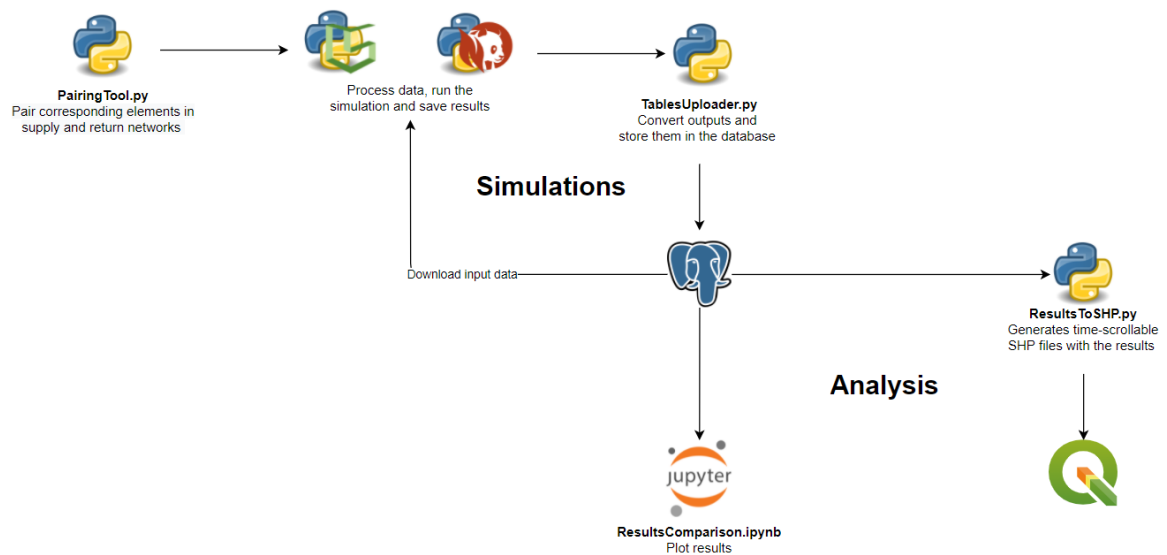


Figure 8 : Schéma de principe des outils d'import et export basés sur la base de données A2.

Un « PairingTool » s'occupe de télécharger les informations nécessaires à la simulation par CitySim et Pandapipes dans la base de données PostgreSQL, et de lancer les simulations. Les résultats des simulations sont ensuite insérés dans la base de données par l'outil « TablesUploader », qui permet ensuite une analyse des résultats dans un notebook jupyter, ou directement une visualisation dans l'outil GIS open-source QGIS (figure 9).

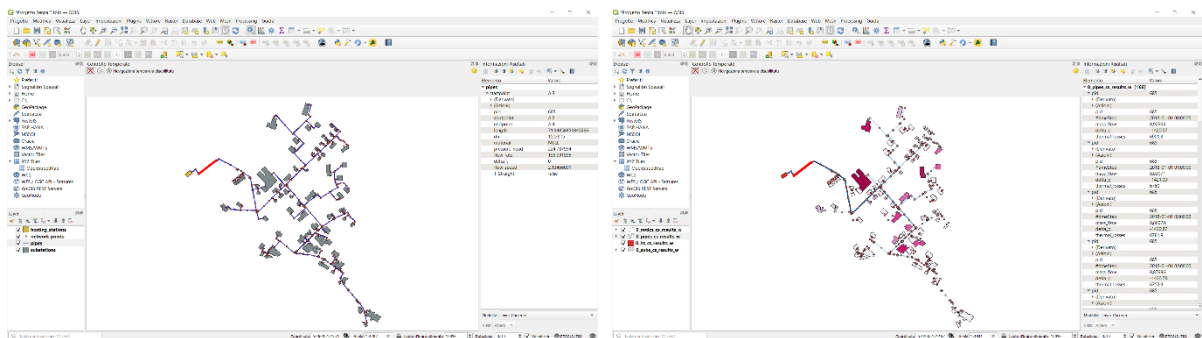


Figure 9 : Visualisation QGIS des données d'entrée de la simulation physique (gauche), et des résultats de simulations (droite).

Les résultats insérés dans la base de données concernent autant les nœuds entre les conduites que les conduites elles-mêmes pour des valeurs de température, débit et pression. Comme chaque outil a ses conventions, les résultats sont uniformisés de façon à pouvoir les comparer.

4.5 A4 – Mesures, filtrage et fiabilisation des données du cas d'étude 1 - SATOM

Après avoir signé un accord de confidentialité avec SATOM, nous avons obtenu un accès VPN au serveur MySQL de l'entreprise qui permet la facturation aux clients. Le schéma des classes ainsi que



des informations détaillées sur la structure de la base de données nous ont été fournis par SATOM. Nous avons ainsi pu récupérer près de deux années de consommations aux sous-stations, avec des pas temporels variables entre 5 minutes et 3 heures.

Dans un deuxième temps, nous avons pu récupérer les informations de la centrale de chauffe à-travers une demande spécifique au spécialiste SATOM, car ces dernières sont sur un autre système d'acquisition. Les données de consommation récoltées au niveau de la chaleur distribuée sont par pas de 100 kWh, ce qui rend les valeurs difficilement interprétables particulièrement en été. En effet, avec de faibles consommations renseignées toutes les 3 heures, il est difficile d'établir un profil horaire pour nourrir les simulations numériques réalisées au moyen des outils identifiés en A1. Pour cette raison, une étape de pré-traitement a été effectuée dans le but d'augmenter la résolution des données de consommation d'énergie disponibles.

Cette étape a notamment été réalisée en calibrant une simulation physique des besoins en chauffage des locaux et d'eau chaude sanitaire de chaque bâtiment à l'aide du logiciel CitySim. La calibration a été effectuée en modifiant certains paramètres clés de la simulation comme le taux d'infiltration et de vitrage des bâtiments à l'aide de la méthode de la bissectrice pour converger progressivement vers un résultat proche de la courbe mesurée. La comparaison entre les simulations et les mesures a été faite en cumulant les données simulées ou facturées puis en mesurant la différence en fin de période entre les deux courbes (voir **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.0**).

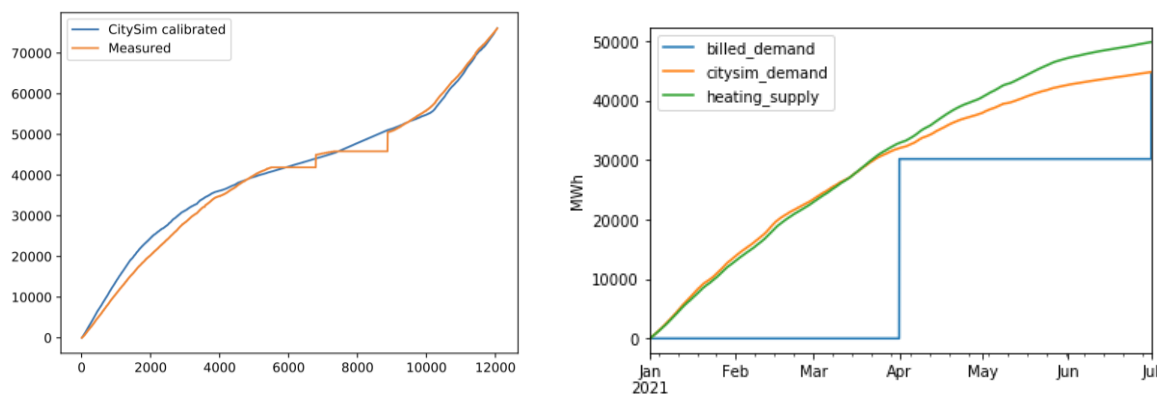


Figure 10 : Calibration de la demande d'une sous-station en fonction des données de consommation mesurées (gauche) et de la facturation (droite).

4.6 A5 – Calibration des modèles physiques de simulation

Pour pouvoir faire confiance aux modèles de simulation physique sélectionnés au point A1, c'est-à-dire CitySim et Pandapipes, ces derniers doivent être validés. Toutefois, les données mesurées pour les cas d'études ne contiennent aucune information à l'intérieur du réseau, mais uniquement à ses bords (centrales et sous-stations). Nous devons donc dans un premier temps nous assurer que les pertes thermiques et de pression font du sens dans les résultats des simulations. Pour ce faire nous avons réalisé deux études avec l'outil CitySim :

- 1) Cas d'étude de Broc. Dans ce cas d'étude nous avons considéré comme hypothèse de fonctionnement pour les sous-stations une différence de température fixe de 30°C. Nous avons adapté plusieurs hypothèses pour calculer les pertes thermiques dans le sol. Les résultats sur



une période de mesure fiabilisée montrent que les résultats de CitySim sont dans les 20% d'erreurs relatives admises par rapport à un intervalle de confiance de 95% sur la température de retour à la centrale de chauffe (voir **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). La température de retour a été choisie comme critère car son calcul est basé sur l'évaluation de tous les débits et températures du réseau. Par conséquent, l'erreur sur cette variable cumule les erreurs effectuées sur tout le réseau. Elle permet donc d'avoir une évaluation globale de la performance de l'outil de simulation.

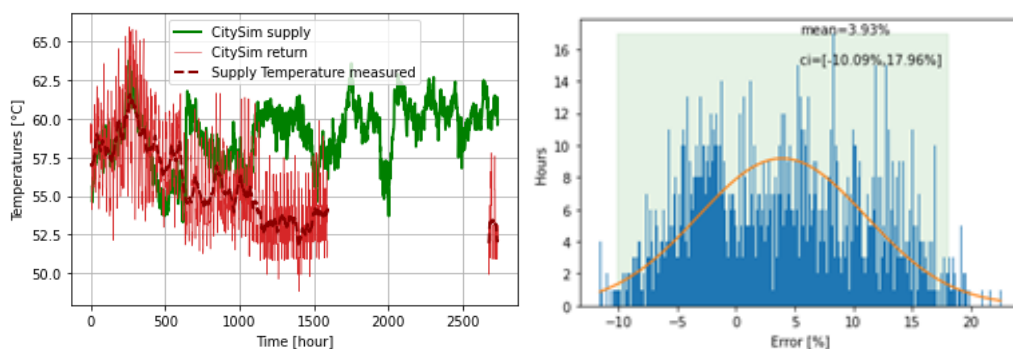


Figure 11 : Évolution temporelle et distribution des erreurs relatives comparant les résultats de simulation avec les données mesurées sur la température d'entrée de la centrale de chauffe à Broc.

- 2) Cas d'étude de Verbier. Dans ce cas d'étude, nous avons modélisé uniquement le réseau aller de distribution de CAD de Verbier pour le simuler avec CitySim. Nous avons conservé l'hypothèse d'une différence de 30°C aux sous-stations, et modélisé les pertes de charges spécifiques dans le réseau. Les résultats sur 2019 nous montrent la validité de l'outil CitySim. Encore une fois, le critère est basé sur la température de retour à la centrale des Trois Rocs. Les résultats sont dans les 20% d'erreurs relatives admises par rapport à un intervalle de confiance de 95% sur la température de retour comme illustré dans la **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

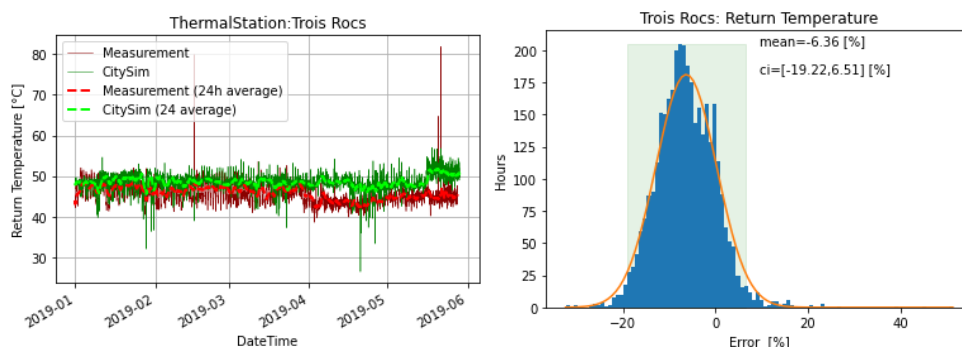


Figure 12 : Évolution temporelle et distribution des erreurs relatives comparant les résultats de simulation avec les données mesurées sur la température d'entrée de la centrale des Trois Rocs en 2019.

Ces études ont permis de calibrer les résultats de simulation de CitySim au plus près des mesures disponibles. En ce qui concerne le logiciel Pandapipes, nous l'avons fait évoluer vers une version améliorée basée sur les développements réalisés dans CitySim mais dans un langage Python plus propice aux développements de l'équipe de recherche. Le nouveau logiciel du nom de pyDHN est :



- En train d'être vérifié de la même façon que CitySim l'a été sur le cas d'étude bien renseigné de Verbier, toutefois avec plusieurs centrales de chauffages,
- En train d'être validé sur le DESTEST¹, une procédure de test de la simulation énergétique des réseaux de chauffage à distance qui a été publiée en octobre 2022,

D'autre part, la méthodologie de simulation ainsi que les résultats des vérifications et des validations seront publiés dans une revue scientifique et le code mis à disposition en open-source.

4.7 A6 – Préparation des données pour l'apprentissage

Dans l'attente de la numérisation du cas d'étude de la SATOM, la préparation des données pour l'apprentissage a été réalisée pour les simulations CitySim pour les cas d'études Broc et Verbier simplifié (avec une seule conduite – la conduite d'aller qui a été dédoublée). Toutes les données de simulation de température, pression et débit dans chaque conduite ont été remises dans la base de données à l'aide des outils d'import / export réalisés en A3. Ces résultats heure par heure pour les périodes de calibration dans l'A5 peuvent être représentés dans une structure de graphe dépendante de la structure géométrique et physique du réseau qui servira aux modèles d'apprentissage. Des discussions ont été menées pour définir un « benchmarking » des algorithmes de « machine learning » par rapport aux résultats des simulations physiques. Ce benchmark, basé sur l'erreur admissible d'énergie fournie aux sous-stations, définit une précision acceptable dans la simulation par « machine learning » et permettra de sélectionner et d'améliorer les algorithmes.

A la suite de la fiabilisation des données de la SATOM (Activité A4), nous nous sommes basés sur les résultats horaires des besoins thermiques des bâtiments simulés par CitySim et calibrés, pour créer un modèle de régression Random Forest. Ce dernier a été initialement développé par des étudiants de l'EPFL² pour permettre la mise en place d'une API REST afin d'obtenir les consommations horaires de bâtiments (voir **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**3) en fonction de quelques paramètres statistiques disponibles dans les données libres du RegBL. Ce travail préliminaire est en cours de renforcement par l'équipe du projet pour en faire une publication scientifique révisée par des pairs ainsi qu'une API web publique que l'on peut visualiser sur QGIS.

¹ <https://github.com/ibpsa/project1-destest>

² <https://actu.epfl.ch/news/17-design-project-sie-2022/>

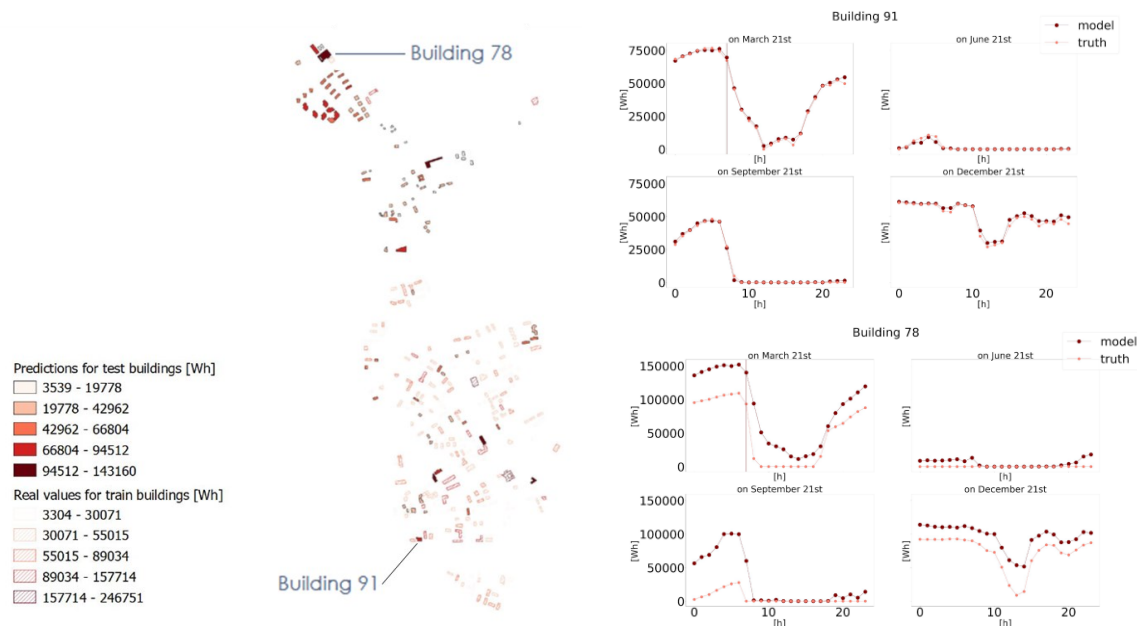


Figure 13 : Représentation des résultats de prédictions pour le 21 mars à 7h (droite), et comparaison entre les solstices et équinoxes (gauche).

Une fois la numérisation du réseau thermique de la SATOM achevée (Activité A2) et grâce aux besoins thermiques des bâtiments simulés par CitySim, (Activité A4), nous avons pu simuler avec CitySim l'ensemble du réseau de la SATOM en reproduisant la température mesurée au départ de la centrale pour une période d'une année (voir **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.4**). Ces données serviront de benchmark pour les algorithmes statistiques préparés dans l'activité suivante A7.

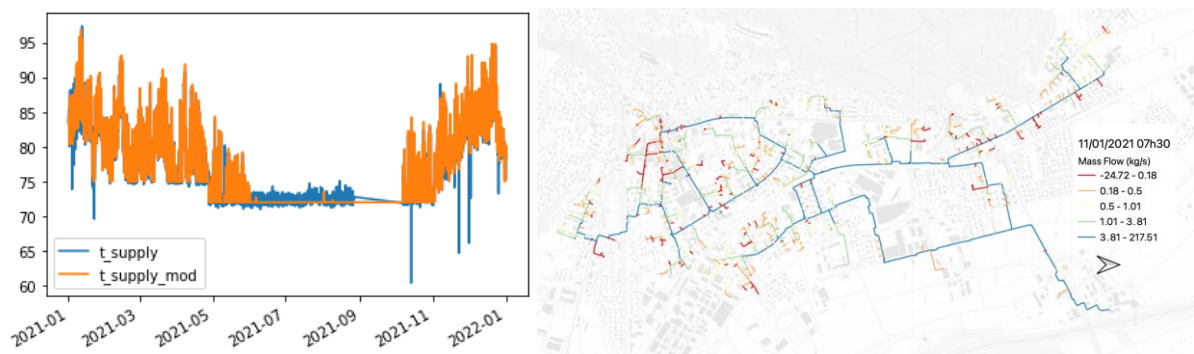


Figure 14 : Modélisation de la température de départ du CAD de la SATOM (gauche), représentation du débit simulé dans les conduites de la SATOM (droite).

4.8 A7 – Préparation du modèle statistique réseau de neurones profond

La préparation du modèle statistique profond a débuté par la préparation d'une plateforme Python afin de permettre le remplacement progressif des modèles physiques de pyDHN (calibré en Activité A4) par des modèles statistiques (voir **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.5**). Le choix s'est porté sur pyDHN pour une intégration optimale dans QGIS par l'intermédiaire de plug-in Python



(voir Activité A13 sur l'interface graphique). Le modèle de convergence hydrodynamique a fait l'objet d'un premier développement de modèle statistique basé sur les résultats de simulations physiques, les équations des contraintes physiques de l'hydrodynamique et un mélange des deux approches. Ces trois approches sont illustrées dans la **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.5** par 3 équations de contraintes \mathcal{L}_i qui correspondent à une minimisation : 1) des différences carrées entre le débit simulé physiquement et évalué par le modèle statistique, 2) des différentiels de pression dans les boucles du réseau et 3) un mélange linéaire de \mathcal{L}_1 et \mathcal{L}_2 .

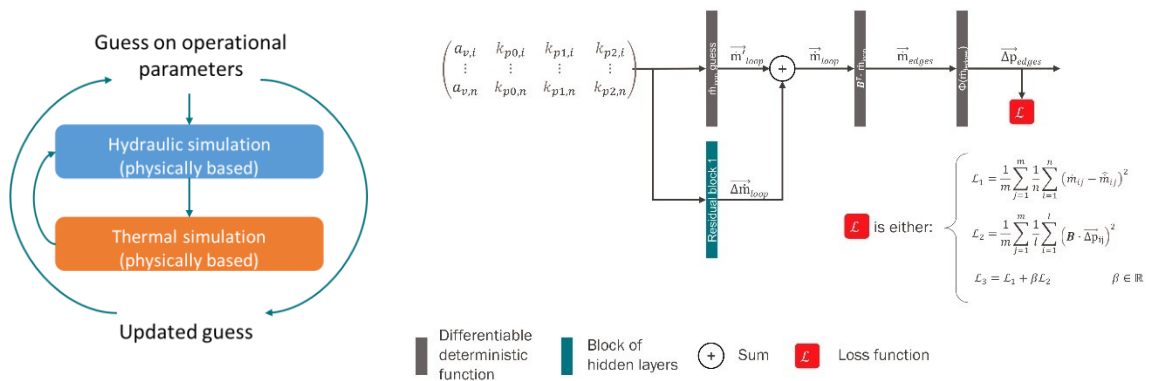


Figure 15 : Implémentation de pyDHN avec les convergences hydrauliques et thermiques (gauche), modèle statistique pour la détermination des débits (hydrauliques) selon 3 approches.

Cette approche permet de réduire significativement le temps de calcul des simulations, et va faire l'objet d'une attention particulière lorsque le logiciel de simulation physique pyDHN sera complètement validé (Activité A5).

4.9 A9 – Améliorations sur le réseau de la SATOM

Sitôt que le logiciel Eguzki sera opérationnel, le réseau de la SATOM pourra être analysé et optimisé par touches successives grâce à Eguzki, mieux qu'il ne pourrait l'être avec des logiciels à temps de calcul élevé. Parmi les multiples analyses qu'il sera possible de faire dans la phase de test du logiciel et qui amèneront des améliorations dans la conduite du thermoréseau, nous en avons retenu 5. Les mesures retenues dans un contexte de validation du logiciel et d'analyse et d'optimisation du thermoréseau possèdent chacune les trois caractéristiques suivantes :

- Elles ont toutes une dynamique telle qu'il n'aurait pas été possible de les simuler à l'aide d'autres logiciels, tant les temps de calculs (et avec eux les coûts de simulation) auraient été importants et dissuasifs ;
- Elles peuvent toutes être analysées et optimisées dans le cadre de dépenses modérées pour ce qui est de la nécessité de modifications ou d'extensions des infrastructures existantes ;



- Elles peuvent toutes être analysées et optimisées entre juillet 2023 et juin 2024³.

Le tableau présenté en annexe 10.2 présente l'évaluation faite à ce jour de 11 possibilités de tests et d'améliorations du réseau de la SATOM. Dans le cadre de ce projet de recherche, nous en avons retenu 5, favorables pour entrer dans les cadres à la fois financier et temporel de ce projet. Ce sont les mesures 1, 2, 4, 5 et 10.

1. Optimisation des températures, débits et pressions du réseau en fonction de paramètres tels que le positionnement dans le réseau, le moment (dans journée, dans la semaine ou dans la saison), les conditions météorologiques. L'idée est ici d'utiliser Eguzki comme indicateur de pistes possibles pour améliorer la rentabilité du réseau et de vérifier quantitativement que les indications produites amènent effectivement des améliorations telles que diminution des pertes thermiques ou diminution de l'énergie d'entraînement des pompes. On s'attend dans cette mesure d'optimisation que c'est la flexibilité attendue de la part d'Eguzki qui sera à la base d'une optimisation du réseau.
2. Utilisation du réseau comme accumulateur de chaleur pour les pics de demande. Le rôle d'accumulateur du réseau pourra aussi être évalué dans le contexte d'une production flexible de chaleur et d'énergie électrique. Eguzki sera utilisé comme indicateur du moment optimal pour commencer à charger le réseau et comme indicateur de la température de départ optimale, du débit de départ optimal.
4. Modification d'une sous-station qui perturbe le réseau par des exigences de températures de départ et/ou de retour momentanément excessives. Le logiciel Eguzki permettra ici de tester rapidement les incidences qu'auront sur l'ensemble du réseau différentes modifications apportées localement sur une sous-station problématique.
5. Modification d'une sous-station de puissance importante et dont la demande est oscillante. L'idée est d'adapter la sous-station (p. ex. en y incorporant une cuve de stockage) et/ou le réseau proche pour que les oscillations locales exercent une influence aussi faible que possible sur les paramètres de l'ensemble du thermoréseau.
10. Exploitation des pompes de départ. Le pompage au départ de la centrale de chauffe de la SATOM est effectué à l'aide de 4 pompes à vitesse variable montées en parallèle, auxquelles est associée une 5^e pompe de réserve et de secours. Eguzki sera utilisé pour déterminer, à partir des caractéristiques des pompes, la configuration d'utilisation de cet ensemble de pompes qui, quelles que soient les conditions d'exploitation, minimise leur consommation électrique.

Le fichier Excel de l'Annexe 10.2 détaille toutes ces mesures : description, planning temporel, budget.

³ Nous rappelons que l'incendie du local de la turbine en novembre 2022 a produit des dégâts considérables. La remise en état est encore en cours actuellement au point qu'un retour à la normale pour ce qui est de l'exploitation du réseau de la SATOM n'est pas attendu avant l'été 2023.



4.10 A10 – Modélisation du réseau ALTIS à Verbier

Les données réceptionnées comprennent une liste de bâtiments (état de raccordement au printemps 2022). Les conduites en géométrie polyligne 2D avec les points GPS existent en format SHAPE.

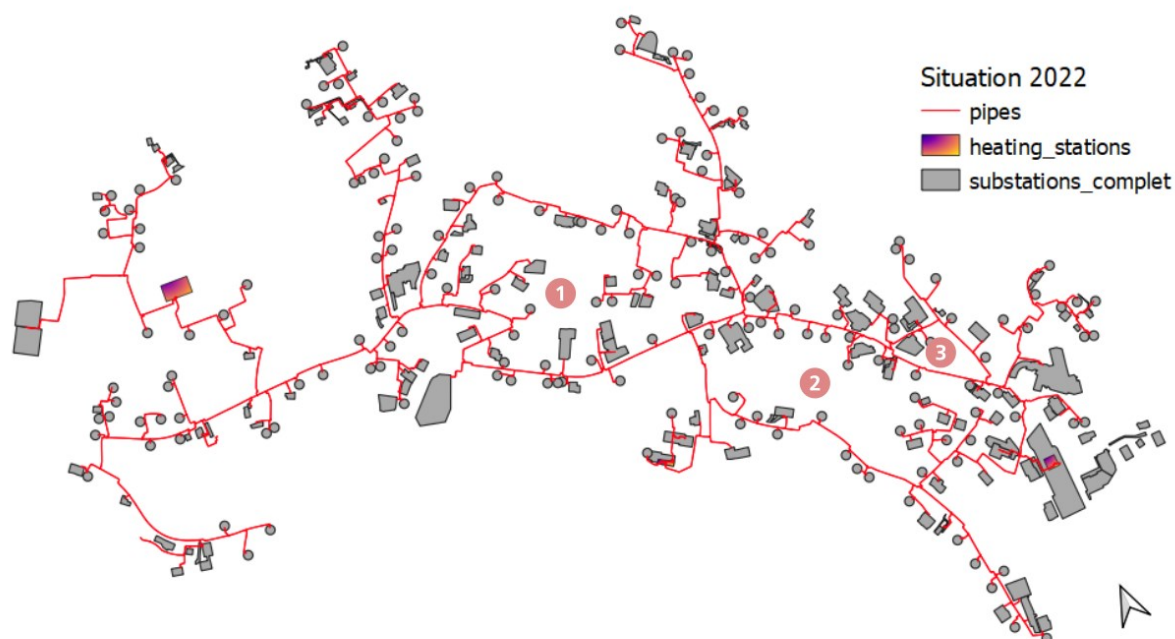


Figure 16 : Modélisation du réseau de Verbier.

Spécificités du projet digitalisé :

- Altitude minimale 1'428 m et altitude maximale 1'555 m ;
- Multiples boucles ;
- Nombre de sous-stations : 131 objets existants plus 172 objets en attente sur les branches aveugles, aucun by-pass n'est présent sur le réseau ;
- Longueur des conduites 24'780 ml ;
- Les centrales d'ALTIS sont bidirectionnelles. Elles peuvent fournir et reprendre de la chaleur. En effet, toutes les centrales alimentent aussi en direct les bâtiments attenants. Cela implique un **nouveau type de centrale bidirectionnel**.

De plus la boucle numéro deux a été fermée en 2022. Dès lors, une fonction d'activation ou désactivation d'une boucle a été implémentée.



Centrales bidirectionnelles en cascade :

- Master : Centre sportif (CS) avec trois pompes en parallèle. Puissance installée : chaudière à pellets de 3 MW et pompes à chaleur de 450 kW, accumulateur de chaleur disponible ;
- Slave 1 : Les trois Rocs (W) avec deux pompes en parallèle, chaudière à pellets de 3.2 MW ;
- Slave 2 : Mondzeu (M) avec deux pompes en parallèle, chaudière à mazout de 2 MW.

Réseau enterré et réseau dans sous-sol de bâtiment : En ce qui concerne les pertes thermiques, le réseau d'ALTIS est particulier. En effet, un réseau enterré n'a que peu de différence de pertes thermiques entre l'été et l'hiver, car le mètre de terre recouvrant celui-ci fait déjà une bonne partie de l'isolation. Pour les réseaux aériens, ceux-ci peuvent être confrontés à une température au droit de l'isolation allant de +30 °C à -10°C. Nous avons deux portions de conduites de ce type dans le projet d'ALTIS qu'il faudra intégrer dans le modèle.

4.11 A10 – Modélisation du réseau OIKEN à Sion

La modélisation du réseau à Sion comporte la récolte des informations en cours de modification. En effet, il s'agit d'un réseau qui est en cours de planification et de réalisation. Aussi, la simulation va prendre en compte non seulement des bâtiments raccordés, mais aussi de toutes les conduites et de tous les raccordements actuellement en étude.

La récolte des informations et la fusion des différents tracés est illustré dans la Figure 17. Plus précisément le tracé en violet représente les conduites projetées, et en rouge les conduites exécutées.

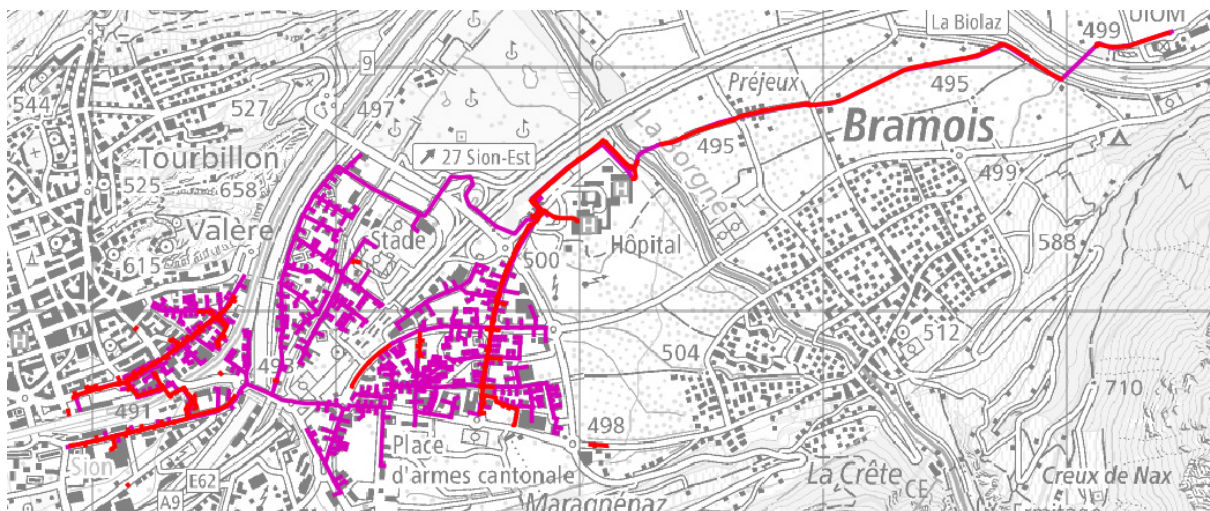


Figure 17 : Capture situation réseau projeté (en violet) et réseau exécuté (en rouge) à Sion.

4.12 A13 – Développement de l'interface utilisateur

À la suite des différentes rencontres avec les exploitants et de la demande de ces derniers, une étude pour l'amélioration de l'interface a été réalisée avec l'appui de NEWIS, société active dans le développement logiciel. Le but est de rendre l'interface utilisateur plus « User-Friendly ». Bien entendu,



il s'agit d'un projet financé exclusivement par les 3 exploitants et qui va pouvoir appuyer les opérations suivantes :

- Modification du réseau ;
- Ajout de sous-station ;
- Création d'alternatives ;
- Comparaison de scénarios.



Figure 18 : Ruban présentant les différents boutons permettant l'utilisation d'Eguzki.

Nom client: BCA001

Sous-station | Connectique | Bâtiments

Propriétés d'identification

ID	17	Area	246,5
Nom	1509777	Volume	2465

Propriétés techniques

Altitude	717	Type de mur	
Hauteur	16	Chauffage heure max	1325
Année de chauffage	2400	Taux d'infiltration	1
Zone			
Remarque			

Figure 1919 : Fenêtre d'introduction et de visualisation des caractéristiques d'une sous-station.



CONDUITE - Attributs d'entités

Nom 305 ID 1432

Informations Connectique

Type (pas de sélection)
(pas de sélection)
Etat I 100/250
Précision I 125/280
Pression I 150/315
Remarque I 20/125
I 25/125
I 32/140
I 40/140
I 50/160
I 65/180

Longueur 3D 10,9916 (m)
Débit NULL
Vitesse NULL
Différence de température (°C) NULL
☐ T droit

OK Annuler

Figure 200 : Fenêtre d'introduction et de visualisation de caractéristiques d'une conduite.

CONDUITE - Attributs d'entités

Nom 1485 ID 902

Informations Connectique

Nœud départ

Nom R.72.3
ID 890

Nœud arrivé

Nom R.72.2
ID 891

=====>

OK Annuler

Figure 211 : Fenêtre d'introduction et de visualisation des points de départ et d'arrivée d'une conduite.



CONDUITE - Attributs d'entités

Nom 305 ID 1432

Informations Connectique

Type	(pas de sélection)	Longueur 3D	10,9916 (m)
Etat	(pas de sélection)	Débit	NULL
Précision	(pas de sélection)	Vitesse	NULL
Pression	20	Différence de température (°C)	NULL
Remarque	NULL		<input type="checkbox"/> T droit

OK Annuler

Figure 222 : Fenêtre d'introduction et de visualisation de caractéristiques d'une conduite.

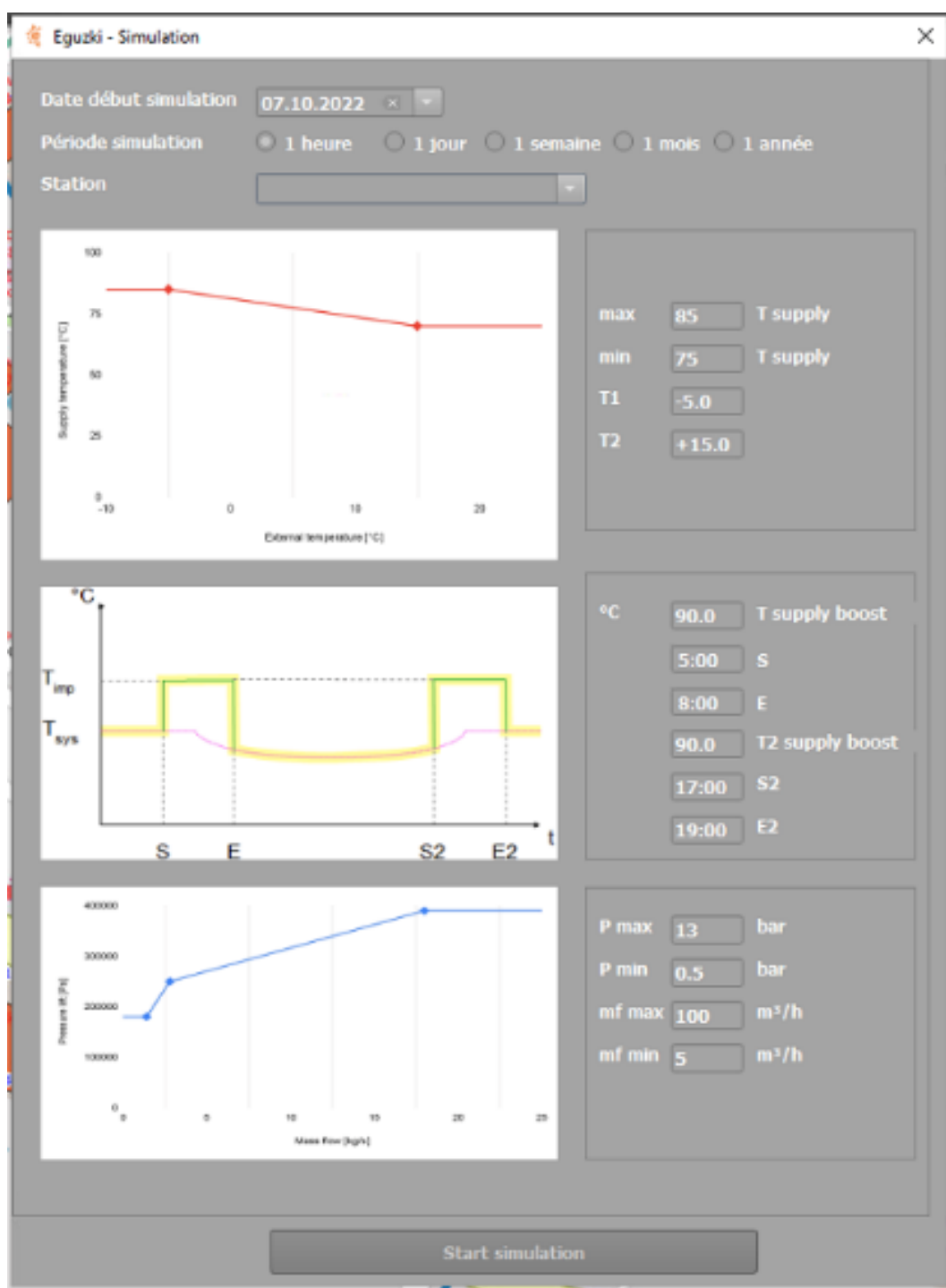


Figure 233 : Fenêtre présentant différents paramètres essentiels à la définition d'un scénario de simulation.

Pour permettre le test de l'algorithme de calcul depuis l'interface QGIS, le plugin Eguzki version 2019 a été adapté par l'Idiap. La version modifiée permet d'accepter des nouveaux inputs, notamment ceux nécessaires à décrire plusieurs centrales avec des caractéristiques différentes.



Figure 244 : Paramètres complémentaires pour lancer une simulation.

5 Évaluation des résultats obtenus

Les activités se sont déroulées conformément au planning, à l'exception de la numérisation du cas d'étude de la SATOM qui s'est avérée plus compliquée que prévue (Activité A2). En effet, l'obtention des informations détaillées sur le tracé et les propriétés physiques des conduites a demandé des efforts importants de coordination et de communication avec le bureau d'ingénieurs conseils qui a planifié l'ouvrage. En l'absence des données géométriques et physiques sur l'ensemble du tracé du CAD de la SATOM, une numérisation des cas d'études de Broc et de Verbier a été réalisée pour avancer dans les autres activités. Une transposition des méthodes développées (Activités A3, A5 et A6) au cas d'étude de la SATOM a été initiée rapidement et va faire l'objet d'une analyse de scénarios pour l'activité A9.

Les simulations physiques des cas d'études de Broc et de Verbier donnent des résultats satisfaisants, toutefois une validation plus approfondie avec la présence de plusieurs centrales de chauffe sur Verbier est nécessaire avant d'aller plus en avant avec le « machine learning ». D'autre part la possibilité de valider le logiciel de simulation avec une procédure de test standard définie internationalement (DESTEST) doit permettre de faire totalement confiance aux différents éléments de calculs hydrauliques et thermiques. On arrive ainsi à une étape charnière, avec un premier solveur physique qui donne des résultats satisfaisants sur des réseaux complexes maillés avec une centrale de chauffe, et qui peut servir à tester des scénarios pour le cas d'étude de la SATOM.

6 Suite des travaux

Les axes de travail prévus pour l'année à venir, et qui ne diffèrent que peu de ceux qui ont été annoncés dans la planification initiale du projet, sont les suivants :

- A8 – Vérification et adaptation du modèle statistique réseau de neurones profond ;



- Validation des logiciels de simulation CitySim et pyDHN avec le DESTEST et les données mesurées de Verbier sur plusieurs centrales de chauffes ;
- Evaluation de l'impact chiffré des mesures d'amélioration de la SATOM à l'aide des outils de simulation développés (Activité A9) ;
- Génération des données pour l'apprentissage, et mise en place d'algorithmes de machine learning pour l'évaluation hydraulique (à finaliser), thermique, et de l'optimisation de l'ouverture des vannes des sous-stations et de la vitesse de rotation des pompes des centrales ;
- Vérification des prédictions des modèles avec les données mesurées en continu sur le réseau de Verbier ;
- A9 – Mesures d'amélioration SATOM (voir chapitre 4.9 ci-dessus) ;
- A10 – Finalisation de la digitalisation OIKEN
- A12 – Reporting

7 Coopération nationale et internationale

Une coopération internationale a été établie avec le Prof. Behzad Najafi du Politecnico di Milano (Italie). L'étudiant-doctorant Marco Tognoli en fin de thèse a passé 3 mois à l'IDIAP pour partager son expérience dans le « machine learning » appliqué à 3 éléments : les centrales de chauffes, les pertes du réseau et les besoins des bâtiments. La caractéristique de l'approche italienne est qu'elle est basée uniquement sur des mesures dans le cas d'étude du campus « Leonardo » à Milan. Bien que la portée de généralisation de leur modèle soit particulièrement limitée, les approches utilisées restent intéressantes. Ces approches ont été approfondies par une évolution du modèle prédicteur des besoins des bâtiments (décrit dans l'Activité A6) par des méthodes de « machine learning en pipelines », et vont faire prochainement à une publication de revue scientifique conjointe avec le Politecnico di Milano.

8 Publications

Aucune publication à ce stade.

9 Bibliographie

Aucune référence à ce stade.



10 Annexes

10.1 Structure de la base de données d'un réseau de chaleur

- Contracteur : Lieu :
- Nom du réseau : Personne de référence :

Données de niveau 1

Indispensables pour lancer une simulation de base

- **Format** : DXF/DWG/SHAPE/CSV
- Points GPS (géométrie de type point, relevés X ; Y du géomètre) ;
- Conduites avec informations (géométrie de type ligne, DN hydraulique et diamètre externe isolation ou type d'isolation, constructeur, rigide ou flexible) ;
- Sous-stations à jour (géométrie de type polygone "empreinte au sol" des bâtiments raccordés, liste avec nr. identifiant du contracteur lié à un/plusieurs nr. EGID ou l'adresse, puissance souscrite) ;
- Centrale/-s de chauffe (géométrie de type polygone "empreinte au sol", nr. EGID ou l'adresse).

Données de niveau 2

Pour améliorer la compréhension du réseau, faciliter la digitalisation, améliorer la précision des résultats simulés

- Points GPS (relevés Z du géomètre) -> DXF/DWG/SHAPE/CSV ;
- Positions des réductions de DN -> DXF/DWG/SHAPE/CSV ;
- Cadastre à jour -> DXF/DWG/SHAPE ;
- Sous-stations (position X ; Y de l'EGID) -> DXF/DWG/SHAPE/CSV.
- En absence de la valeur KVS des sous-stations, une fonction permettra de l'estimer en fonction de la puissance souscrite et de la perte de charge liée à la sous-station ;
- Longueur linéaire conduites primaires au sein du bâtiment (après introduction jusqu'à l'échangeur) ;
- Sous-stations : date mise en service, puissance installée, énergie consommée annuellement ;
- Filtres installés ;
- Pompes installées.



Données de niveau 3

- Centrale : installations (nr. chaudières/combustible, puissance installée, accumulateur avec volume) ;
- Delta T aux sous-stations ;
- Asservissement des vannes ;
- Type de capteurs de pression et points de prise de mesure sur le réseau/sous-stations/centrale ;
- Sondes de température sur le réseau, terrain ;
- Valeurs historiques du compteur de chaleur réinitialisé périodiquement ;
- Fonctionnement MCR sous-stations et à la centrale.



10.2 Tableau des améliorations proposées par SATOM

SATOM - Liste des objectifs

Liste des objectifs pour les mesures correctives qui pourraient être mise en place suite à la simulation EGUZKI - Version 2 sur le réseau SATOM SA

No	Améliorations possibles	Risque	Coût de la mise en place *	Durée d'implémentation	Perturbation du réseau	Durée du test
1	Optimisation des températures, débits et pressions du réseau	faible	faible	1-5 jours	faible	1 an
2	Utilisation du réseau comme accumulateur pour les pics de demandes	faible	faible	1-5 jours	faible	1 an
3	Mise en place de régulateur de pression actifs afin d'améliorer la répartition des pertes de charges sur le réseau	moyen	30-60 kCHF	1-2 mois	importance (arrêt du réseau et vidange partielle)	6 mois
4	Modification des sous-stations qui perturbent le plus le réseau au niveau de la température départ/retour CAD	faible	25-50 kCHF	1-3 mois	moyenne	1 an
5	Modification des sous-stations dont la demande est oscillent	faible	25-50 kCHF	1-3 mois	moyenne	1 an
6	Mise en place d'un surpresseur saisonnier (hiver) sur la branche où la pression est la plus faible	grand	75-150 kCHF	4-6 mois	importance (arrêt du réseau et vidange partielle)	6 mois
7	Optimisation du dimensionnement d'une extension en projet	faible	5-10 kCHF	1-2 mois	aucune	aucun
8	Mise en place d'un bouclage complémentaire	faible	100-500 kCHF	3-9 mois	importance (arrêt du réseau et	1 an
9	Remplacement pompes départ CAD	faible	XXX	3-9 mois	Faible	1 an
10	Meilleur étapage des pompes / ajustement hystérèse	faible	faible	3-9 mois	Faible	1 an
11	Simulation accumulateur départ CAD SATOM	faible	faible	1-3 mois	Faible	6 mois

La liste ci-dessus est susceptible d'évoluer pendant le développement du projet. SATOM SA garantit de mettre au mois 5 mesures d'amélioration en place et de publier les résultats issus des actions correctives. La liste des actions qui seront mises en place sera présentée à l'OFEN en temps voulu.

Tableau 6 : Tableau des améliorations proposées par SATOM.