

Développement de la géothermie à faible profondeur dans le canton de Genève via l'outil de visualisation

ESRI : Dashboards

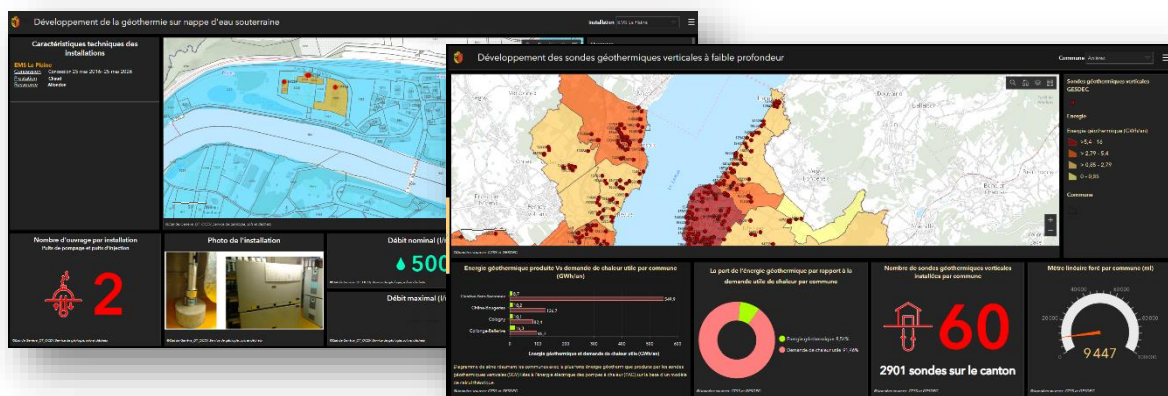


Lillia BOUKRIF

Faculté des Sciences de la Société
Université de Genève,

Office Cantonal de l'environnement
Service de géologie, sols et déchets

Rapport de stage pour l'obtention du Certificat Complémentaire en Géomatique



Responsable de l'encadrement : Dr. Stéphanie FAVRE

Enseignant du suivi académique CCG : Dr. Andréa DE BONO

Membre du Comité Scientifique du CCG : Prof. Anthony LEHMAN

Janvier 2022

Résumé

Depuis le lancement du programme de GEothermies2020, le développement de la géothermie dans le canton de Genève n'a cessé de croître. Par conséquent, le GESDEC dispose d'un grand nombre de données. C'est pour cette raison qu'il a mis en place un système d'information géographique afin de répondre aux besoins liés à la gestion des données du sous-sol et de ses ressources.

Cette étude représente un début de valorisation des données géothermiques relatives aux systèmes fermés et aux systèmes ouverts. Deux tableaux de bord ont été créés en traitant les données des serveurs internes de l'Etat et du Cadastre technique du sous-sol CTSS. Le premier est destiné au grand public, pour démontrer le développement des sondes géothermiques verticales à faible profondeur, et le second est destiné à l'usage interne (métier) et montre le développement de la géothermie sur nappe d'eaux souterraines dans le canton de Genève.

Le tableau de bord des systèmes fermés représente une première approche de l'estimation de l'énergie géothermique produite en GWh/an au moyen des sondes géothermiques verticales. Il est adapté au grand public afin de lui permettre de décortiquer les données géothermiques analysées et de s'informer de l'état d'avancement de la géothermie sur son territoire. Le tableau de bord « métier » des systèmes ouverts permet quant à lui aux hydrogéologues du GESDEC de faire le suivi des différentes installations géothermiques, d'analyser et de prendre des décisions. Cet outil permettra aux acteurs de la géothermie du GESDEC de renforcer et d'organiser stratégiquement les données des systèmes d'informations géographiques déjà en place tout en économisant un temps précieux pour l'analyse des données.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et mes remerciements à ma responsable de stage, Stéphanie Favre (Collaboratrice scientifique), pour m'avoir donné l'opportunité d'intégrer ce stage particulier et pour tous ses commentaires et critiques pertinents. Ses conseils pour m'orienter dans la bonne direction ont été précieux.

Je remercie également toute l'équipe de géothermie Nathalie Andenmatten Berthoud, Sabrina Serier, Laurent Gelezzi, Gabriel de Los Cobos, qui m'ont tant apporté par leur expérience en géothermie.

Je tiens également à adresser mes remerciements à l'équipe de la DIT Michel Terrond et Raphaël Bulle qui m'ont tant aidée pour toutes les astuces et résolutions de problèmes en géomatique, sans oublier Loic Quiquerez par son expertise dans les données d'énergies du Service OCEN et Gérald Fontaine du service de l'organisation et sécurité de l'information pour ses conseils sur l'illustration des Dashboard. Je remercie également Mathilde Guidini et Anouk Mentha pour leurs conseils sur la configuration des Dashboard.

Je souhaite remercier également mon responsable du suivi académique Andrea De Bono et Anthony Lehman, membre du comité scientifique, pour tous leurs conseils, idées et orientation avisée.

Finalement, je remercie tout particulièrement mon mari et ma famille pour leur soutien constant au cours de cette formation et mon amie Elodie Paillard pour son aide précieuse à la relecture de ce rapport.

Sommaire

Liste des figures

Liste des tables

Index

1	Introduction	7
1.1	Présentation du GESDEC	7
1.2	Contexte général	7
1.3	Objectifs du stage.....	8
1.4	Type de géothermie dans le canton de Genève	8
1.4.1	Sonde géothermique et champ de sondes (Système fermé).....	9
1.4.2	Installation géothermique en doublet (Système ouvert)	10
1.5	Outils de visualisation SIG « Dashboard »	11
2	Matériel et méthode.....	12
2.1	Workflow	12
2.1.1	Phase ϕ_0 : Recherche, identification et préparation des sets de données géothermiques.....	12
2.1.1.1	Organisation des données par catégories	15
2.1.1.2	Réflexion sur de nouveaux attributs pour les SGV	15
2.1.1.3	Modèle de calcul pour l'énergie géothermique au niveau des SGV	16
2.1.2	Phase ϕ_{II} : Geotraitement des données géothermiques (Système fermé) sur ArcGIS pro	18
2.1.2.1	Tri, sélection et création d'attribut des données utilisées	19
2.1.2.2	Evaluation des données de sondes géothermiques (SGV) CTSS et SOLSTISS	21
2.1.2.3	Révision du fichier de champs de sondes du CTSS	23
2.1.2.4	Saisie des données pour les systèmes Ouverts "doublet"	25
2.1.2.5	Utilisation du script Model-Builder	27
2.1.2.5.1	Système fermé « Sondes géothermiques verticales » (SGV).....	28
2.1.2.5.2	Système ouvert « Installations géothermiques » (doublet)	33
2.1.3	Phase ϕ_{III} : publication des couches sur le portail en ligne et utilisation de l'application Dashboards	34
2.1.3.1	Du projet ArcGIS pro vers la plateforme.....	34
2.1.3.2	Partage des images sur le portail cartographique	36
2.1.3.3	Création des cartes web	36
2.1.3.4	Création de Dashboard (type et éléments)	37
2.1.3.4.1	Système fermé (Dashboard public)	37
2.1.3.4.2	Système ouvert (Dashboard métier) (voir section 3.2)	37
2.2	Métadonnées	38
2.3	Création d'une Story Maps (Classic Story maps)	39
2.4	Mise à jour des données des Dashboard.....	40
3	Résultats	43
3.1	Dashboard public, développement des sondes géothermiques verticales à faible profondeur « système fermé »	47
3.2	Dashboard métier, Développement de la géothermie sur nappe d'eau souterraine « système ouvert ».....	48
3.3	Story Maps.....	51
4	Discussion.....	52
5	Conclusion.....	54

6 Perspectives et recommandations	55
Références	
Annexes	

Liste des figures

Figure 1. Classification de la géothermie selon la profondeur et le système d'exploitation. Modifié d'après (GEothermie 2020, 2017).	8
Figure 2. Sonde géothermique horizontale et verticale (Système fermé), modifié d'après (Cory A. Kramer, 2013).....	9
Figure 3. Champ de sondes (Système fermé), source : GEOTHERMIES.fr.....	9
Figure 4. Exemple d'une installation géothermique sur nappe d'eau souterraine (Système ouvert), adapté d'après (Cory A Kramer, 2013).....	10
Figure 5. Capture d'écran sur un Template de Dashboard créé pour montrer les éléments qui le composent.....	11
Figure 6. Workflow montrant les phases clés du projet d'étude.....	12
Figure 7. Données des différents sondages saisis au niveau du canton de Genève et à sa périphérie. A) Couche " GEOL.SS. SONDAGE" issu de la base de données Solstiss, représente différents sondages : géotechniques, hydrogéologiques et géothermiques. B) Couche "A_CTSS_CAD_CHAUFFAGE" de la base de données CTSS, représente les champs de sondes.....	13
Figure 8. Organisation des données géothermiques par catégorie et par thème.....	15
Figure 9. Attributs créés pour les sondes géothermiques verticales	15
Figure 10. Paramètres clés dont dépend la puissance thermique par mètre linéaire de sonde.....	16
Figure 11. Modèle théorique d'estimation de de l'énergie géothermique au niveau d'une sonde géothermique verticale.....	18
Figure 12. Étapes du géotraitement des couches de sondes géothermiques des sources CTSS et GESDEC.....	18
Figure 13. Tri et sélection des sondes géothermiques dans le canton de Genève à partir de la couche GEOL_SS_SONDAGE de la base de données SOLSTISS.....	19
Figure 14. Sélection des sondes géothermiques localisées uniquement dans le canton de Genève à partir du fichier A. CTSS_CAD_CHAUFFAGE de la base de données CTSS.....	19
Figure 15. Les cinq cas de figures obtenus à partir de la superposition des données de sondes géothermiques CTSS et GESDEC.....	21
Figure 16. Analyse statistique du fichier A. CTSS_CAD_CHAUFFAGE, nombre de champs de sondes avec et/ou sans sondes de références GESDEC.....	21
Figure 17. Histogramme de comparaison entre le nombre de sondes dans les deux sources de données CTSS et GESDEC (Base de données SOLSTISS et le fichier de suivi de dossier)	22
Figure 18. TopoForms de saisie de données utilisé pour éditer la couche GEOTH_SS_INSTAL. b) Carte des installations géothermiques de type doublet (Système ouvert) dans le canton de Genève.....	25
Figure 19. Schéma synthétisant les grandes étapes du script Model-Builder dans les systèmes fermés et ouverts.....	26
Figure 20. a).Valeurs arrondies du fichier raster ha_1 de la demande de chaleur utile en MWh/ha. b) valeurs de « Demande de chaleur utile » extraites selon les polygones de commune.....	30
Figure 21. Schémas synthétisant les différentes étapes du script Model-Builder, qui répondent à la problématique de l'estimation de l'énergie géothermique des systèmes fermés (SGV).....	31
Figure 22. Schémas illustrant les étapes du script Model-Builder pour les systèmes ouverts.....	32

Figure 23. Résumé des étapes du passage depuis ArcGIS pro vers la plateforme ArcGIS.....	33
Figure 24. Capture d'écran du volet de métadonnées de la couche d'entité.....	34
Figure 25. Capture d'écran de la page des métadonnées des deux Dashboard (Système fermé et système ouvert)	37
Figure 26. Une partie du Script FME qui servira à l'automatisation des données du Dashboard des systèmes fermés (voir annexe 9).....	39
Figure 27. Une partie du script FME qui servira à l'automatisation des données du Dashboard des systèmes ouverts (voir annexe 10).....	40
Figure 28. a). Carte de l'estimation de l'énergie géothermique produite à partir des sondes géothermiques verticales SGV valorisée par la puissance de la pompe à chaleur. b). Carte de la demande de chaleur utile dans le canton de Genève en GWh/an.....	41
Figure 29. Dashboard du développement de la géothermie à faible profondeur des SGV dans le canton de Genève "système fermé". B). Capture d'écran de la fenêtre contextuelle.....	43
Figure 30. 1). Aperçu du Dashboard du développement de la géothermie sur nappe d'eau souterraine "Système ouvert". 2) Détail de visualisation du Dashboard après zoom avant de la carte.....	
Figure 31. (En haut) le Dashboard montre une installation (EMS La Plaine) qui contient une photo. (En bas) Données manquantes au niveau d'une installation géothermique, exemple « AMAG ».....	45
Figure 32. Aperçu de l'organisation de la story Maps de type Série regroupant les résultats de Dashboard sous une même thématique. (En haut) onglet doublet « Dashboard des systèmes ouverts ». (En bas) onglet SVG « Dashboard des systèmes fermés).....	46
Figure 33. Dépendance d'un immeuble de plusieurs ressources d'énergie pour le chauffage : Sondes géothermiques verticales en champ de sondes (points en brun), Gaz (triangle en rouge), Huile lourde (triangle vert).....	50
Figure 34. Répartition des systèmes de géothermie au niveau de la commune de Meyrin (système fermé et système ouvert).....	51
Figure 35. Proposition l'ajout de la rubrique « développement de la géothermie à faible » profondeur dans le canton de Genève dans la story map de la fiche 9 « usage et potentiels de l'énergie géothermique ».....	56

LISTE DES TABLES

TAB 1: SYNTHÈSE DES DONNÉES UTILISÉES POUR LE PROJET.	14
TAB 2: ATTRIBUTS ORIGINELS DE LA COUCHE A. CTSS_CAD_CHAUFFAGE AVANT RÉVISION	24
TAB 3: ATTRIBUTS AJOUTÉS DANS LA COUCHE A. CTSS_CAD_CHAUFFAGE APRÈS RÉVISION	25
TAB 4: AJOUT DE NOUVEAUX ATTRIBUTS À CHAQUE COUCHE.	28
TAB 5: ATTRIBUTS SUR LESQUELS LES STATISTIQUES ONT ÉTÉ RÉALISÉS.	29
TAB 6. RÉSUMÉ DES COUCHES D'ENTITÉS (FEATURE LAYER) CONTENANT LES COUCHES EXPORTÉES SUR LE PORTAIL CARTOGRAPHIQUE DE L'ÉTAT.	35
TAB 7. TABLE DE LA COUCHE "ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE" EXPORTÉE SUR LE PORTAIL CARTOGRAPHIQUE DE L'ÉTAT QUI SYNTHÉTISE TOUS LES RÉSULTATS OBTENUS POUR LE DASHBOARD DES SYSTÈMES FERMÉS.	45

Index

CTSS	Cadastre Technique du Sous-Sol	PAC	Pompe à chaleur
DIT	Direction de l'information du Territoire	SGV	Sondes Géothermiques Verticales
DT	Département du Territoire	SOLSTISS	SOL-Système Territorial d'Information du Sous-Sol
GESDEC	Service de Géologie, Sols et déchets		
OCEV	Office Cantonal de L'Environnement		

1 Introduction

Ce projet de stage proposé par le GESDEC s'inscrit dans le cadre de l'obtention du certificat complémentaire en géomatique de la faculté des Sciences de la société de l'université de Genève. Il s'inscrit également dans le cadre de la gestion dynamique et évolutive des données du sous-sol au GESDEC plus précisément les données géothermiques.

1.1 Présentation du GESDEC

Le Service de géologie sol et déchets (GESDEC) fait partie du département du Territoire (DT) et de l'OCEV (Office Cantonal de l'Environnement). Son rôle général est la protection de la population genevoise contre toutes pollutions environnementales. Depuis 2012 le service est en charge du programme GÉothermies (anciennement dans le programme GÉothermie2020) pour évaluer le potentiel géothermique de faible à grande profondeur. Cela fait du GESDEC un acteur majeur dans l'organisation et la gestion des données du sous-sol, et il a donc développé des bases de données (S. FAVRE, 2018) qui permettent de centraliser les informations du sous-sol en s'appuyant sur l'architecture d'un modèle relationnel. Par ailleurs, le GESDEC vise également à valoriser les données géologiques dans le cadre de la gestion dynamique et évolutive des données du sous-sol en mettant en place un système d'information de données appelé SOLSTISS (SOL – SYSTÈME TERRITORIAL D'INFORMATION DU SOUS-SOL).

À cela s'ajoutent d'importants projets différents de la géothermie dont le GESDEC est responsable, notamment dans la protection de l'environnement par la gestion du cadastre des sites pollués, gestion des déchets et sensibilisation au recyclage des matériaux, ainsi que la gestion et la protection des sols, à savoir la surveillance et la limitation des dommages aux sols, la protection des nappes souterraines et la prévision des risques naturels tels que les glissements de terrain.

1.2 Contexte général

Afin d'accélérer la transition énergétique du canton de Genève, l'Etat et les SIG ont mis en place une politique énergétique en adéquation avec la stratégie énergétique 2050 proposée par le Conseil Fédéral, qui vise à promouvoir les énergies renouvelables et à diminuer la consommation d'énergie¹. Cette stratégie a donné naissance au programme GÉothermies2020 de prospection et d'exploration du sous-sol. Au cours du programme, une grande quantité de données du sous-sol a été accumulée, qu'elles soient géologiques, hydrogéologiques ou encore géophysiques et géothermiques. Les données qui ont fait l'objet de notre étude sont les données géothermiques, qui sont stockées dans différentes bases de données localisées sur des serveurs internes de l'Etat sous forme de cartes et de tables reliées entre elles selon un modèle relationnel. La source du système d'information de données utilisées pour cette étude est celle de SOLSTISS, qui facilite l'accès aux données et permet l'organisation et le traitement des

¹QUESTIONS D'ENERGIE : <https://blog.romande-energie.ch/fr/economiser-l-energie/137-perspectives-energetiques-2050>

résultats de prospection, d'exploration et d'exploitation du sous-sol genevois. La question qui se pose est de savoir comment valoriser toutes ces données géothermiques de manière dynamique et visuelle, différente de l'utilisation des cartes et bases de données statiques.

1.3 Objectifs du stage

L'objectif principal de ce stage consiste en la valorisation des données géothermiques stockées au niveau des serveurs internes de l'Etat de Genève. Il s'agit de réfléchir à une méthode d'analyse et à une thématique pour les données relatives aux sondes géothermiques verticales et aux installations de type doublet. L'objectif est de représenter les données géothermiques en utilisant l'application Dashboards d'esri afin de représenter les données géothermiques de façon dynamique et spatiale sous forme d'un ArcGIS Dashboard en se focalisant sur les principaux points suivants :

1-Analyse des données géothermiques existantes dans la base de données SOLSTISS.

2-Création de cartes liées à la thématique du développement de la géothermie dans les systèmes fermés et au niveau des systèmes ouverts.

3-Création de tableaux de bords à partir des cartes réalisées en utilisant l'application Dashboards du portail cartographique de L'Etat.

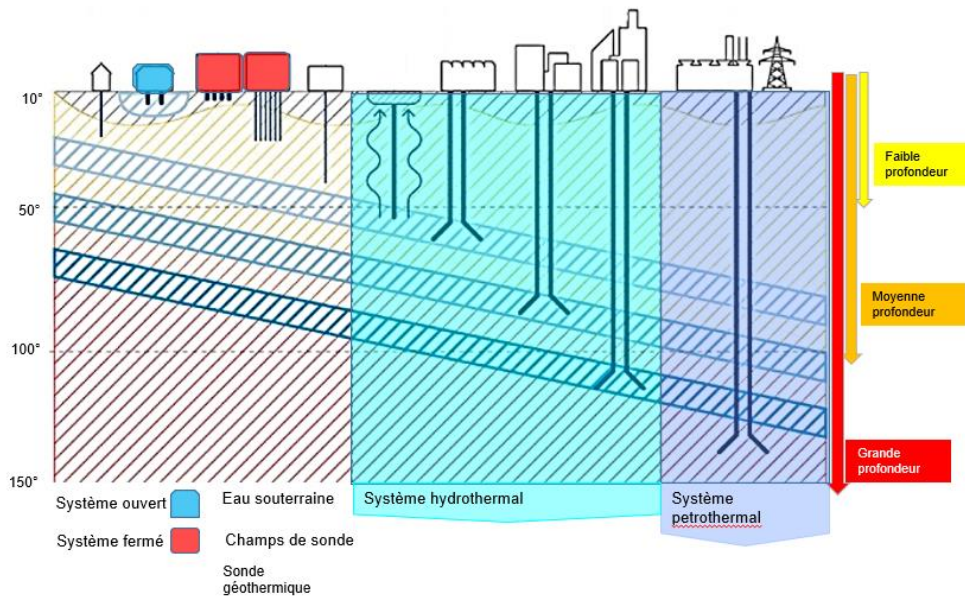
1.4 Type de géothermie dans le canton de Genève

La géothermie est l'exploitation de la chaleur du sous-sol, qui se caractérise par plusieurs paramètres importants tels que la conductivité thermique, la capacité thermique, la perméabilité et la profondeur de la source. Selon la profondeur, la géothermie peut être de faible, moyenne et grande profondeur, et selon les systèmes d'exploitation géothermique (géométrie de l'installation), on distingue une géothermie des systèmes ouverts et fermés² (Figure1). Dans le canton de Genève comme dans toute la Suisse, c'est une géothermie directe de faible (50 à 400m) à moyenne (400 à 3000m)³ profondeur issue en grande partie de sondes géothermiques verticales (*Pahud 2002*).

² Fiche 9: Usage et potentiels de l'énergie géothermique. Etat de Genève

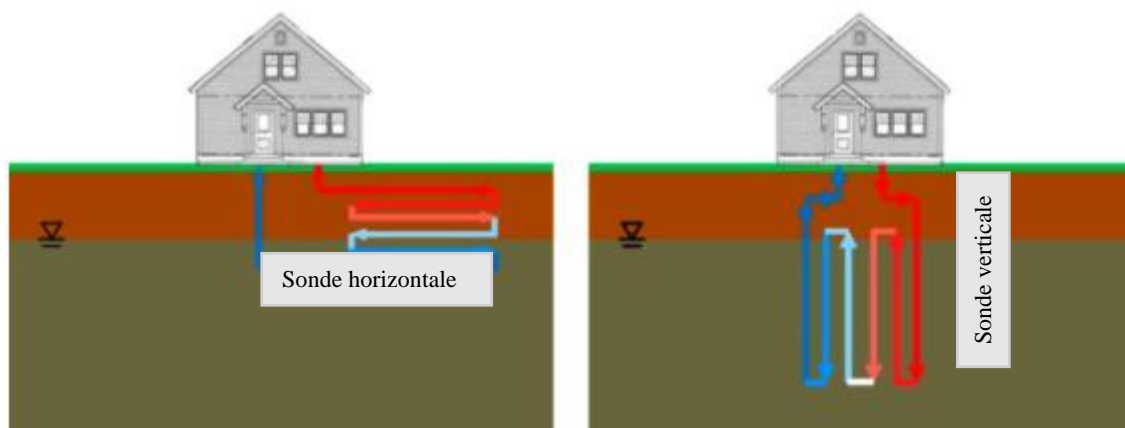
<https://app2.ge.ch/tergeportal/apps/MapJournal/index.html?appid=d7d278b2713d45d9a924b8c1020a3eb5#>

³ <https://www.ge.ch/dossier/transition-energetique-geneve/energies-renouvelables-potentiel-taille-proximite/geothermie>



1.4.1 Sonde géothermique et champ de sondes (Système fermé)

Une sonde géothermique (Figure 2) est souvent associée à une pompe à chaleur électrique en circuit fermé. La chaleur géothermique utilisée pour un usage domestique, par exemple, extrait la chaleur du sous-sol pendant un certain nombre d'heures par an, par le biais de tuyaux souterrains⁴, posés verticalement ou horizontalement dans le sol (Boennec, 2008). Elle est utilisée pour le froid ou pour le chaud.



⁴ DESIGNING BUILDINGS, Geothermal pile foundations
https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Geothermal_pile_foundations#Pile_foundations

Ces sondes géothermiques peuvent être plusieurs dizaines (Figure 3), voire mêmes centaines. Dans ce cas, elles forment un champ de sondes destinées aux grands besoins en chaleur ou en froid, par exemple pour les immeubles. La profondeur des sondes géothermiques peut atteindre un maximum de 250 m et le nombre de sondes par champ est calculé selon le besoin en chaleur ou en froid.

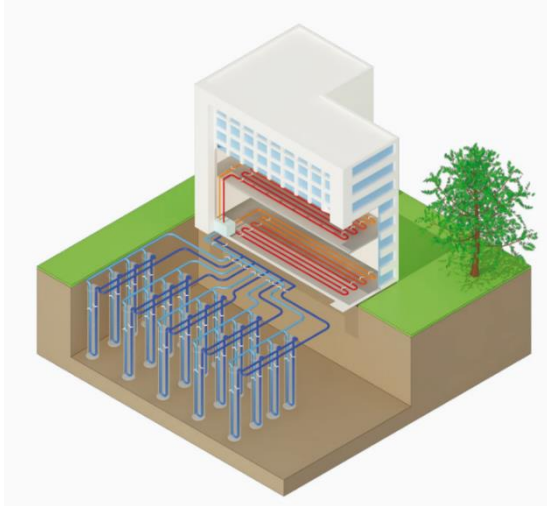


Figure 3. Champ de sondes (Système fermé), source : GEOTHERMIES.fr.

1.4.2 Installation géothermique en doublet (Système ouvert)

C'est un système qui valorise la chaleur de l'aquifère (nappe souterraine) à faible profondeur. Le type le plus commun est constitué de deux puits : un puits de pompage qui est associé à une pompe à chaleur (PAC) et un autre puits d'injection qui permet le retour ou la réinjection de l'eau dans l'aquifère d'origine (Figure 4). Ces ouvrages sont distants l'un de l'autre de sorte qu'ils ne s'impactent pas entre eux (Cory A Kramer, 2013).

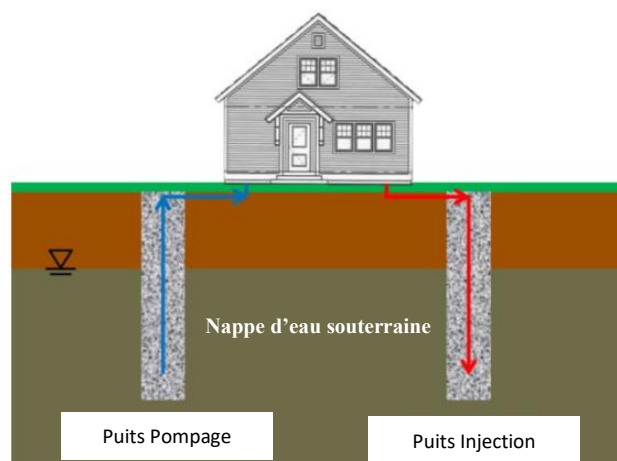
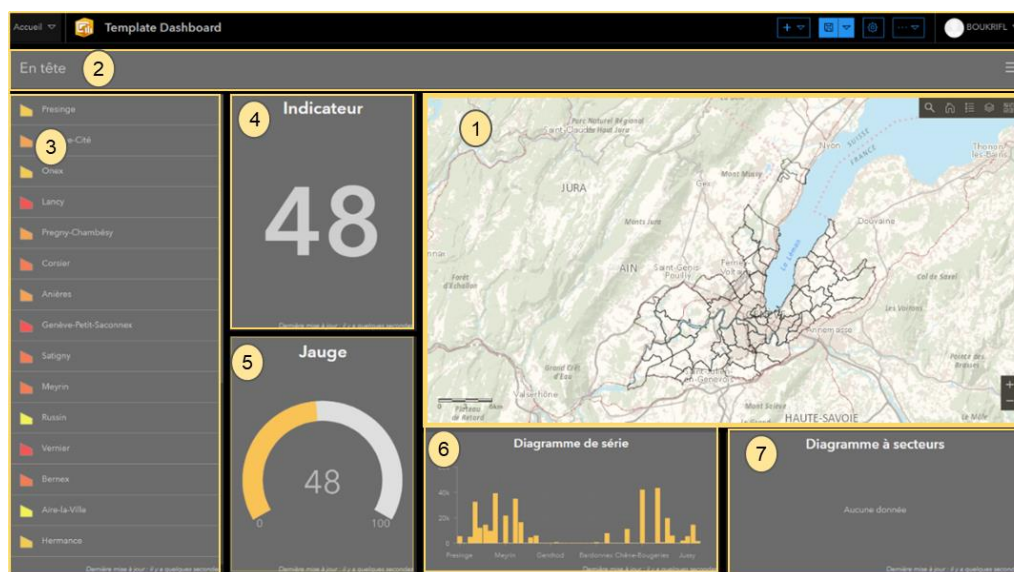


Figure 4. Exemple d'une installation géothermique sur nappe d'eau souterraine (Système ouvert) adapté d'après (Cory A Kramer, 2013).

1.5 Outils de visualisation SIG « Dashboard »

Un Dashboard est une application utilisée pour créer et partager des données géospatiales au sein d'une organisation et sur le web⁵. C'est un produit d'information essentiel, au même titre que les cartes et les applications⁶, et constitue une composante essentielle de l'infrastructure géospatiale. Il s'agit d'une représentation dynamique des données spatiales, permettant d'avoir l'information sur une seule interface. Il donne un aperçu rapide avec une large gamme d'information permettant aux utilisateurs un accès facile à différentes informations. Il est utilisé dans différent contexte que ce soit pour la surveillance des événements (ex. gestion d'urgence) ou pour prendre des décisions, analyser une situation ou même informer le grand public (*Pelletier 2020*). Il est créé sur la plateforme ArcGIS via l'application Dashboard à partir des cartes web selon un modèle et une configuration voulue.

Plusieurs éléments constituent un Dashboard, à partir desquels on peut représenter la donnée géographique de façon dynamique. Ces éléments sont les suivants : Interface cartographique (1), en-tête (2), liste (3), indicateur (4), jauge (5), diagramme de série (6), diagramme à secteur (7) (Figure 5). Ils sont rattachés à la carte web et à d'autres éléments du Dashboard selon une configuration souhaitée qui permet une utilisation simple et rapide du contenu pour les différents types de Dashboard destinés à une utilisation précise.



1. Interface cartographique
2. En-tête
3. Liste
4. Indicateur
5. Jauge
6. Diagramme de série
7. Diagramme à secteur

Figure 5. Capture d'écran d'un Template de Dashboard créé pour montrer les éléments qui le composent.

⁵ esri_ArcGIS Dashboards: <https://doc.arcgis.com/fr/dashboards/get-started/what-is-a-dashboard.htm>

⁶ esri_ArcGIS Dashboards: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-dashboards/overview#:~:text=ArcGIS%20Dashboards%20enables%20users%20to,visualizations%20on%20a%20single%20screen.&text=Tailor%20dashboards%20to%20your%20audiences.get%20the%20answers%20they%20need.>

2 Matériel et méthode

2.1 Workflow

Le projet de ce stage est structuré en quatre grandes phases (Figure 6). La phase 0 consiste en la recherche, l'identification, l'organisation et la préparation des sets de données relatives à la géothermie, suivies de la mise en place de l'environnement de travail dans ArcGIS pro (phase ϕI). La phase qui suit (phase ϕII) s'occupe du géotraitement de la donnée en utilisant deux logiciels du système d'information géographique ArcGIS pro version 2.8 et ArcMap accompagné d'un script de type Model-Builder pour automatiser les différentes étapes et outils exécutés. La dernière phase (phase ϕIII) est l'étape qui nous a permis de publier le projet cartographique sur le portail cartographique de l'Etat afin de pouvoir utiliser les applications telles que ArcGIS Dashboard et story map.

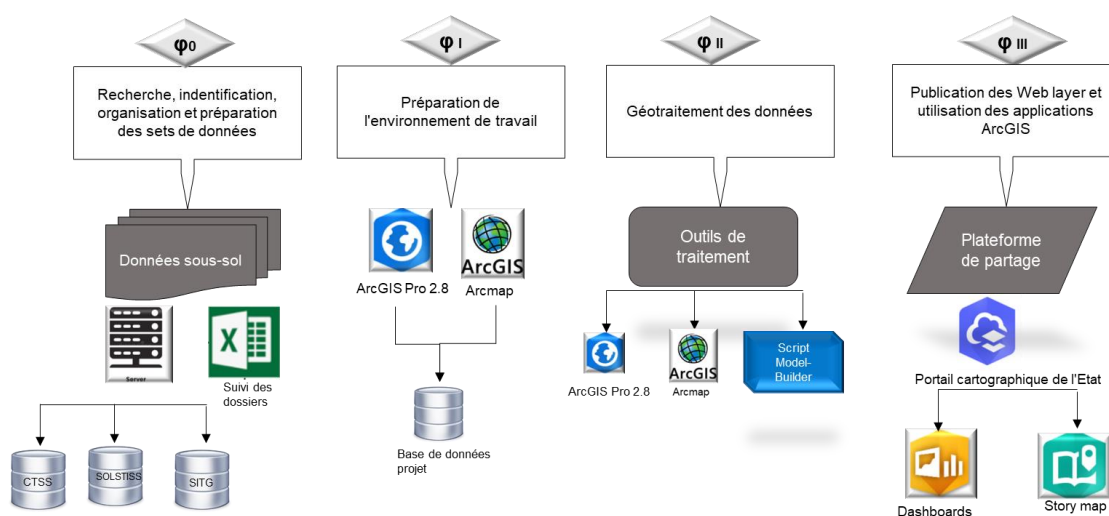


Figure 6. Workflow montrant les phases clés du projet d'étude.

2.1.1 Phase $\phi 0$: Recherche, identification et préparation des sets de données géothermiques

Les données du sous-sol relatives à la géothermie dont dispose l'Etat de Genève sont stockées dans des serveurs internes *sde "Oracle"* et dans différentes bases de données telles que le CTSS *Cadastre Technique du Sous-Sol*, SITG *Service de l'information territoriale Genevois* et SOLSTISS *SOL-Système Territorial* d'information du Sous-Sol (Figure 6). Cependant, toutes les données géothermiques que contiennent ces bases de données ne peuvent pas toutes répondre à notre problématique. De ce fait, plusieurs jeux de données ont été testés afin de choisir les données types qui répondent au besoin de notre projet.

Les géodonnées utilisées pour notre étude proviennent des trois bases de données : CTSS, SOLSTISS, et SITG (Figure 6). Ils sont du type Shapfile (Figure 7) représentant les sondes géothermiques verticales, des fichiers Raster ainsi que différentes tables liées entre elles selon un modèle relationnel (Tab.1). En parallèle, un fichier du suivi régulier des dossiers de sondages au niveau du GESDEC a été utilisé afin

de consulter certaines informations manquantes sur les sondes géothermiques saisies dans la base de données sur la base des rapports de forage transmis au GESDEC par les bureaux d'ingénieurs.

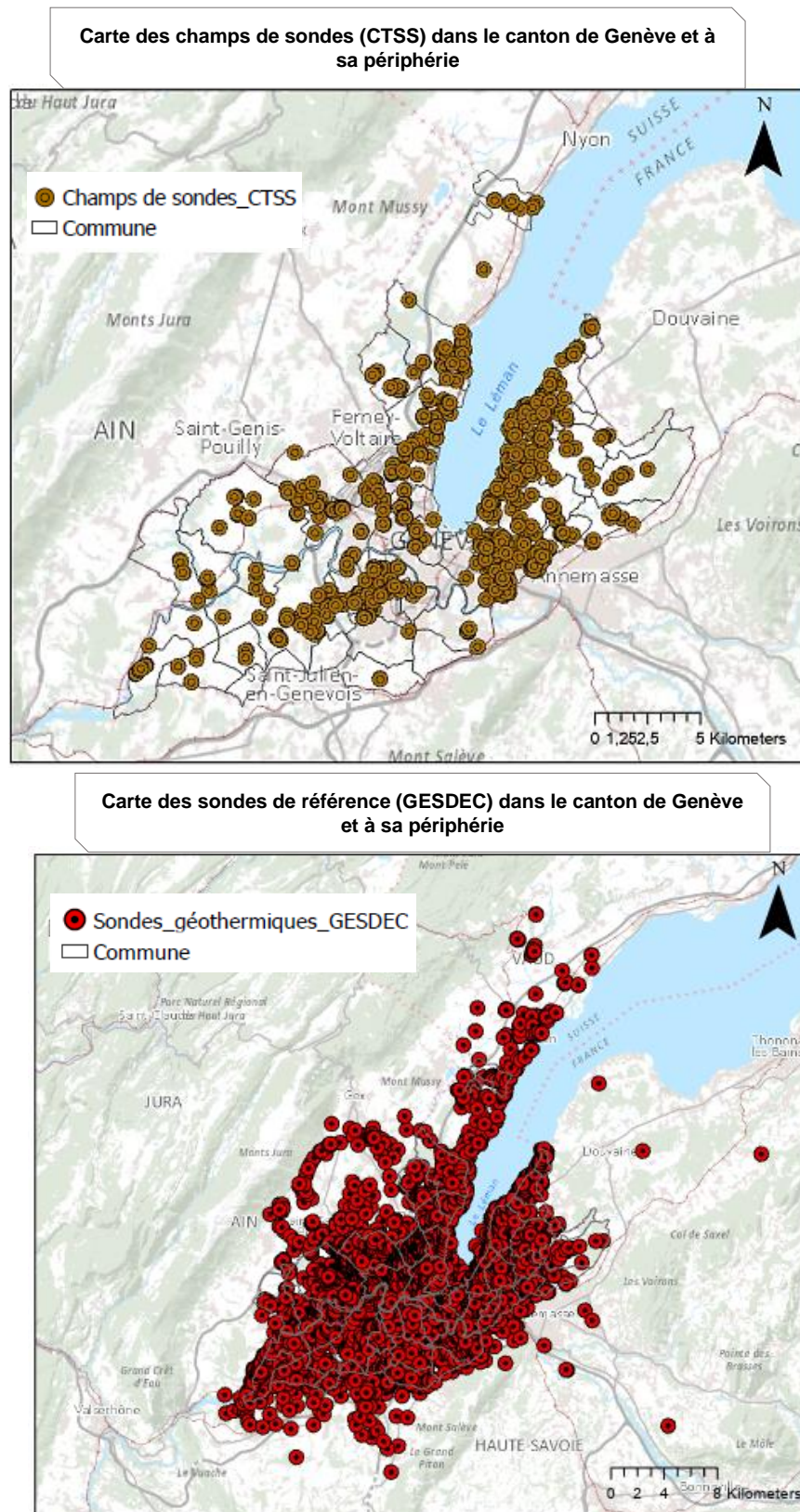


Figure 7. Données des différents sondages saisis au niveau du canton de Genève et à sa périphérie. A) Couche " GEOL.SS. SONDAGE" issu de la base de données Solstiss, représente différents sondages : géotechniques, hydrogéologiques et géothermiques. B) Couche "A_CTSS_CAD_CHAUFFAGE" de la base de données CTSS, représente les champs de sondes.

Tab 1: Synthèse des données utilisées pour le projet.

Base de données	Nom fichier	Type	Description	Mise à jour		
sde.Solstiss	GEOL_SS_SONDAGE	Vecteur	Cette couche points contient tous les sondages : géothermiques géotechniques, hydrogéologiques et géothermiques installées au niveau du canton de Genève et à sa périphérie.	Journalière		
		Tables liées				
		GEOL_SS_ADMIN	Table principale par laquelle de nombreuses tables sont liées par l'ID_ADMIN	Journalière		
		GEOL_SS_EQUIPEMENT	Table contenant les attributs relatifs au type d'équipement des sondages installés dans la table SS_SONADGE, liée à la table admin par ID_ADMIN	Journalière		
		GEOL_SS_UNITE GEOLOGIQUE	Contient les unités géologiques atteintes par les sondages.	Journalière		
		GEOL_SS_PARCELLE	Table avec le numéro, adresse de chaque parcelle pour chaque commune			
		GEOL_SS_PROJET	Table contenant le numéro OAC du projet, la date du début et de la fin des travaux	Journalière		
		sde.Solstiss	GEOL_SS_INSTAL_GEOTH	Vecteur	Couche polygone représentant les installations géothermiques "DOUBLET" avec les ouvrages mis en place.	Journalière
				Tables liées		
				GEOL_SS_GEOTH_ADMIN	Table contenant les identifiants ID_ADMIN de chaque installation éditée dans la couche GEOL_SS_INSTAL_GEOTH.	/
GEOL_SS_GEOTH_RESSOURCE	Contient la source de la nappe souterraine par laquelle s'effectue le pompage des eaux			/		
GEOL_SS_GEOTH_CONCESSION	Contient toutes les informations relatives au document de la concession (Numéro, date fin concession).			/		
GEOL_SS_GEOTH_OUVRAGE_ASS	Renseigne sur le nombre et le rôle de chaque ouvrage (pompage, injection).			/		
sde. CTSS	A_CTSS_CAD_CHAUFFAGE	Vecteur	GEOL_SS_PROJET	Renseigne sur le numéro OAC, le nom du projet.	/	
			GEOL_SS_GEOTH_INSTAL_PAC	Toutes les informations reliées à la pompe à chaleur (PAC) : Energie, etc.	/	
sde. SITG	ha_1	Raster	Représente les champs de sondes, recensées sur la base des autorisations de construire et ce qui est transmis ensuite au CTSS.	/		
sde. SITG	CAD_COMMUNE	Vecteur	Couche de travail provenant du programme GEothermie, représentant la demande de chaleur utile en MWh/ha.			
sde. SITG	CAD_COMMUNE	Vecteur	Couche polygone avec les périmètres des 45 communes genevoise, y compris les quatre sections de la commune de Genève : -Cité-Eaux-Vives-Petit-Saconnex-Plainpalais.	Quotidienne		
sde. SITG	GEOL_LAC	Vecteur	Couche représentant le lac Léman, le Rhône et l'Arve pour production de cartes devant comporter un élément hydrographique sous forme de surface. Constituée à partir des données de la mensuration (couverture du sol) des cantons de Genève, de Vaud et du Valais, et des données françaises de l'IGN (surface eau).	/		

2.1.1.1 Organisation des données par catégories

L'organisation des données géothermiques s'est faite sur la base de deux catégories : Système fermé ou sondes géothermiques verticales et système ouvert ou installations géothermiques de type doublet. Pour chaque catégorie un sous-thème lui a été attribué sur la base des données existantes, ce qui permet de répondre au besoin de chaque catégorie (Figure 8).

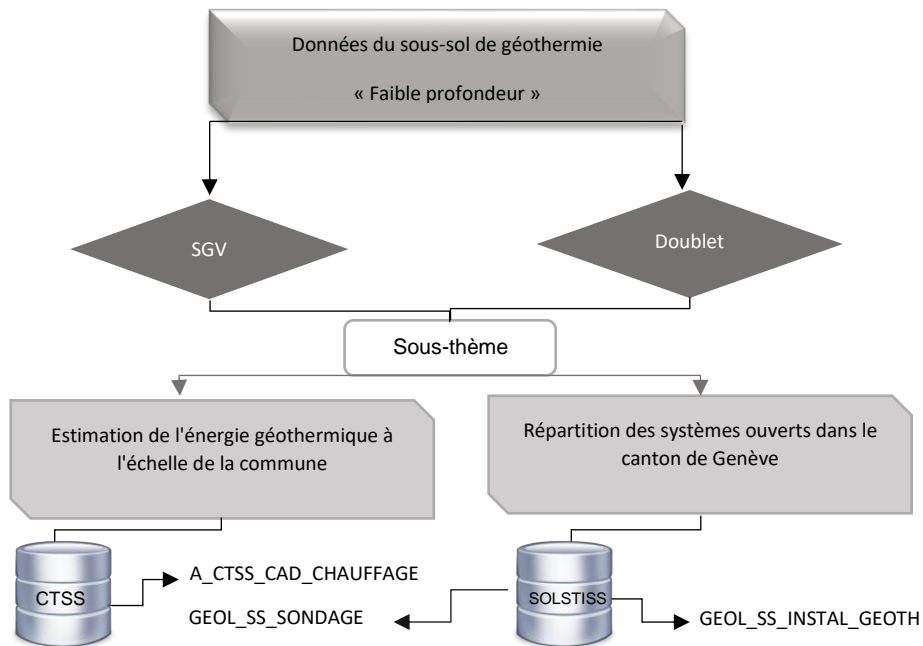



Figure 8. Organisation des données géothermiques par catégorie et par thème.

2.1.1.2 Réflexion sur de nouveaux attributs pour les SGV

L'estimation de l'énergie géothermique au niveau des sondes géothermiques verticales des systèmes fermés a nécessité une réflexion sur l'ajout d'autres attributs utiles aux calculs de l'énergie géothermique au niveau de chaque sonde. Ces nouveaux attributs représentent les futurs indicateurs qui seront utilisés pour créer les Dashboards (Figure 9).



Nom Attribut	Description
Total_Nbr_Sondes	Totale nombre de sondes au sein de la commune
Total mètre linéaire foré	Total profondeurs atteintes par les SGV
COP_PAC	Coefficient de performance de la pompe à chaleur
Puissance PAC	Puissance de la pompe à chaleur en kW
Mètre linéaire foré	Puissance géothermique en kW
Puiss_Geoth_GWh_an	Puissance géothermique en GWh/an
Energie_Geoth_GWh_an	Energie géothermique estimée en GWh/an

Figure 9. Attributs créés pour les sondes géothermiques verticales.

2.1.1.3 Modèle de calcul pour l'énergie géothermique au niveau des SGV

L'estimation réelle de l'énergie géothermique nécessite des calculs et simulations sur des logiciels qui permettent de voir en détail le comportement des sondes géothermiques, tels que EED, le plus communément utilisé, EWS, et PILESIM, le logiciel qui calcule les énergies transférées au niveau des sondes géothermiques ou pieux énergétiques entre les différents composants des systèmes sur une base mensuelle ou annuelle (Pahud., 1999).

Les données disponibles ne permettent pas de réaliser des modèles de simulation thermiques, mais il existe une méthode plus simple appelée la méthode du **pouce** qui est utilisée pour les petites installations (>10 kW). Elle consiste à dimensionner les sondes géothermiques verticales en double U sur une puissance maximum soutirable en fonction de la nature de la roche, de la géométrie de l'installation et des caractéristiques de la sonde⁷ (Figure 10).

⁷ Rapport du Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel Sondes géothermiques verticales : « Guide d'aide au dimensionnement des ouvrages de petite dimension et procédures d'autorisation dans le Canton de Neuchâtel ». Groupement PDGN, Marc Affolter, Bernard Matthey Ingénieurs_Conseils S.A.
https://www.ne.ch/autorites/DDTE/SENE/energie/Documents/ChauffagesInstallationsTechniques/Guide_dimensionnement.pdf

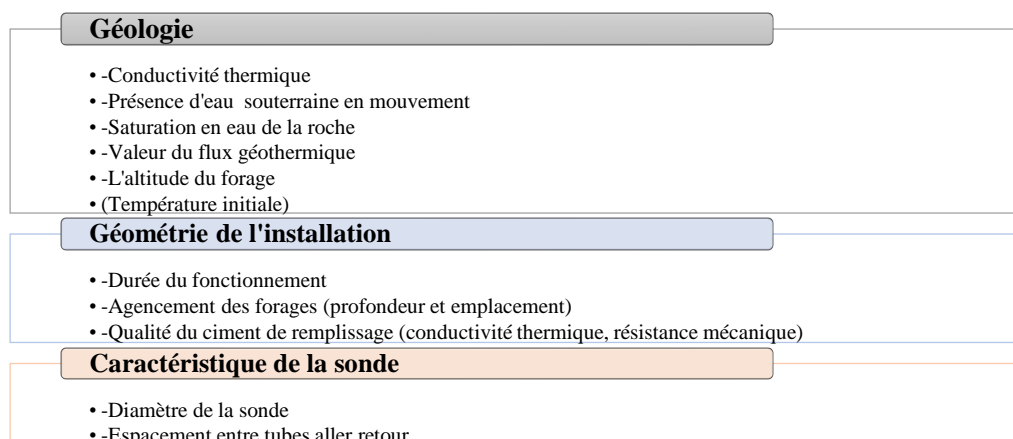


Figure 10. Paramètres clés dont dépend la puissance thermique par mètre linéaire de sonde.

La puissance géothermique produite au niveau d'une sonde se traduit par la chaleur du sous-sol (Puissance du sous-sol) associée à une pompe à chaleur PAC qui valorise cette énergie. Afin d'appliquer la règle du pouce, on a suggéré un modèle théorique (Figure 11) qui admet deux conditions : la première est que toutes les sondes géothermiques verticales qui ont été saisies dans la base de données au niveau du canton de Genève, que ce soit par le CTSS ou par le GESDEC, produisent de l'eau chaude sanitaire et fonctionnent sous un régime de **2400 h par an**. La seconde condition est que la moyenne de la puissance de la pompe à chaleur (PAC) pour chaque sonde soit de l'ordre de 10 kW et que la puissance maximal soutirable du sous-sol est de **50kW**.

Ainsi, la formule de puissance maximum par mètre linéaire de sonde, appelée aussi puissance du Sous-sol, peut s'exprimer ainsi :

$$P_{sous_{sol}} = Prof * Puiss \quad (1)$$

Et la puissance de la pompe à chaleur est égale à : $P_{pac} = 10kW$ (2)

$P_{sous_{sol}}$ = puissance géothermique du sous-sol (Watt)

$Prof$ = Profondeur de la sonde (ml)

$Puiss$ = Puissance soutirable maximum du sous-sol (W/m), calculée selon le modèle de calcul EED (*B Sanner, D-35390 Giessen*).

P_{pac} = la valeur moyenne d'une pompe à chaleur pour les sondes géothermique à faible profondeur.

Par l'équation (1) et (2) la puissance produite au niveau d'une sonde géothermique verticale s'exprime selon la formule (3) suivante :

$$P_{geo} = P_{sous_{sol}} + P_{pac} \quad (3)$$

Afin de convertir la puissance géothermique (P_{geo}) de l'équation (3) en énergie géothermique (E_{geo}), une deuxième approximation du premier ordre consiste à utiliser le nombre d'heures équivalent à pleine puissance d'une courbe de charge typique pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. Ainsi on obtient une énergie géothermique du sous-sol par la formule (4) suivante :

$$E_{geo} = Prof * P_{geo} * 2400 \left(\frac{h}{an} \right) \quad (4)$$

E_{geo} =Energie géothermique du sous-sol (Wh/an)

$Prof$ =Profondeur de la sonde (m)

P_{geo} = Puissance max soutirable par mètre de sonde+ puissance PAC (W/m)

2400 h/an = Nombre d'heures équivalent à pleine puissance d'une courbe de charge typique pour le chauffage + ECS.

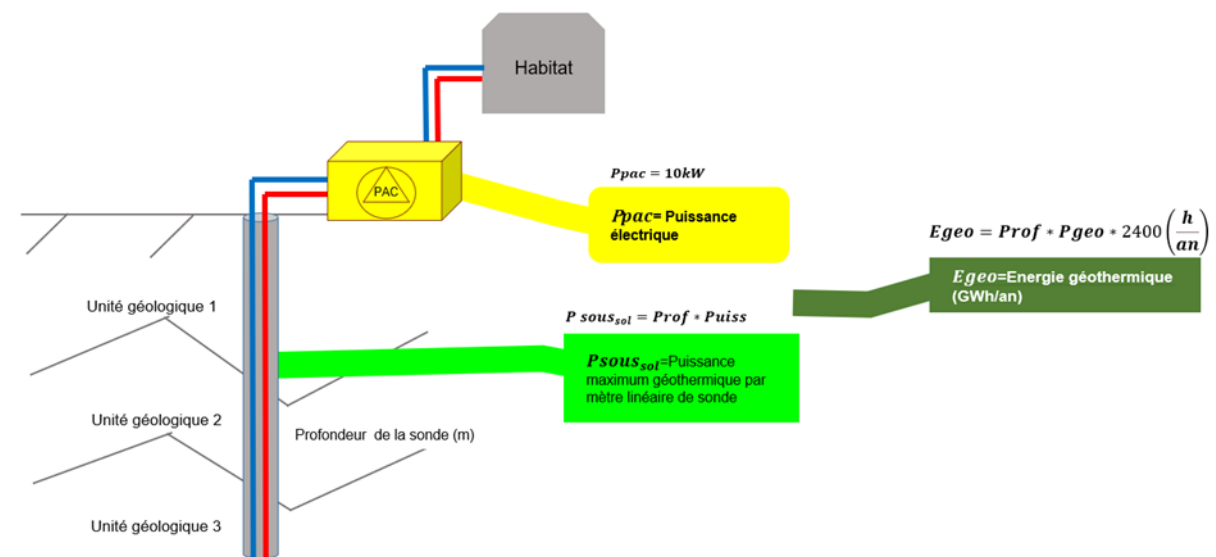


Figure 11. Modèle théorique d'estimation de l'énergie géothermique au niveau d'une sonde géothermique verticale.

2.1.2 Phase ϕ II : Geotraitement des données géothermiques (Système fermé) sur ArcGIS pro

Les données concernant les sondes et champs de sondes géothermiques utilisées pour le projet proviennent des bases de données respectivement du CTSS et du GESDEC. Avant le géotraitement il a été nécessaire de les nettoyer et de les trier en fonction des besoins du projet. Chaque fichier a été traité en fonction des attributs qui existent et sont nécessaires pour la suite du traitement des données géothermiques. Le schéma ci-dessous (Figure 12) synthétise les opérations portées sur chaque couche des différentes sources CTSS et GESDEC.

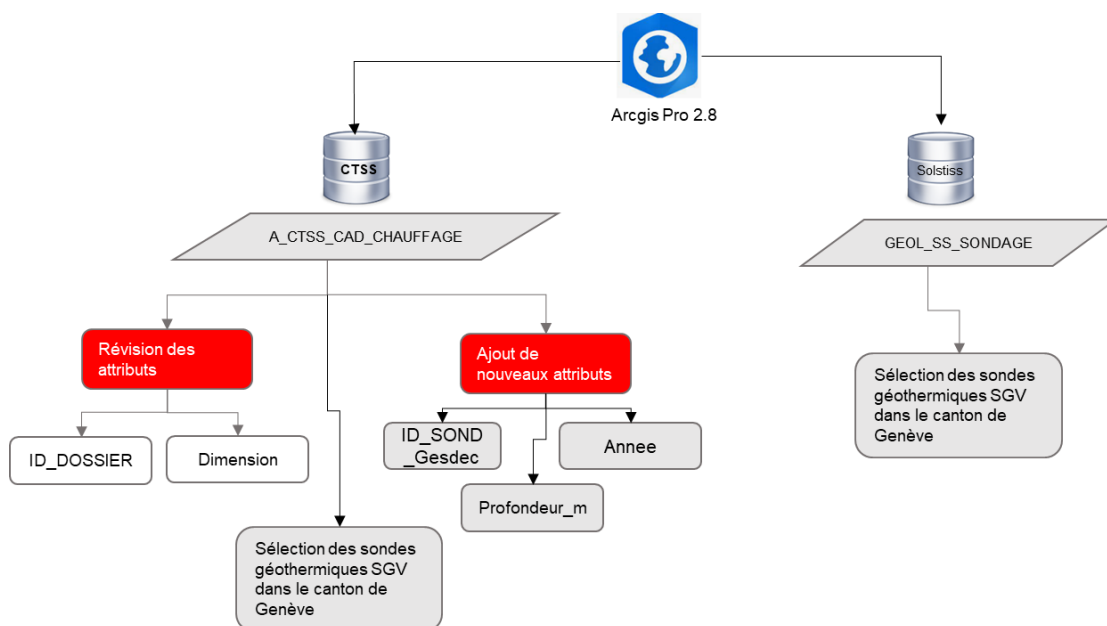


Figure 12. Étapes du géotraitement des couches de sondes géothermiques des sources CTSS et GESDEC.

2.1.2.1 Tri, sélection et création d'attribut des données utilisées

La couche « GEOL_SS_SONDAGE » contient tous types de sondage (Géotechniques, hydrogéologiques et géothermiques). De ce fait, un tri a été réalisé, par une sélection d’attributs afin d’en sélectionner uniquement les sondes géothermiques verticales qui sont à l’intérieur des limites administratives du canton de Genève. Par conséquent, il a fallu éliminer toutes celles localisées dans le canton de Vaud et celles en France voisine (Figure 13).

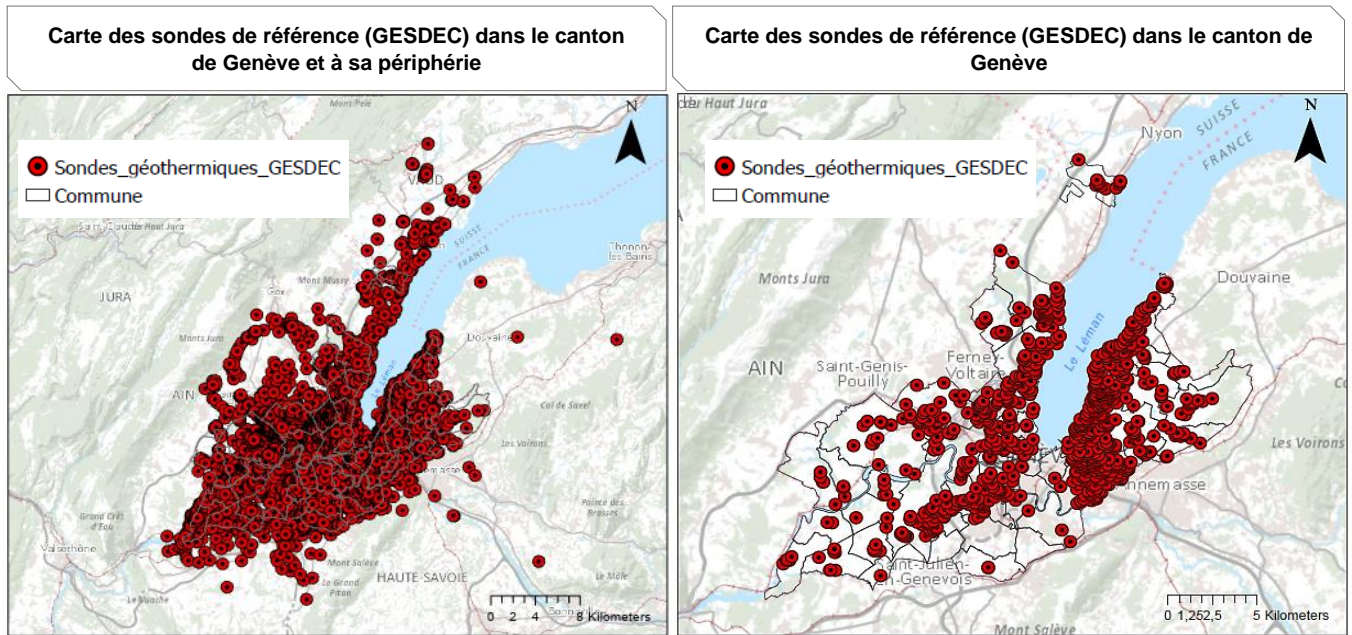


Figure 13. Tri et sélection des sondes géothermiques dans le canton de Genève à partir de la couche GEOL_SS_SONDAGE de la base de données SOLSTISS.

Le même géotraitement effectué sur la couche précitée, est également effectué sur la couche « A_CTSS_CAD_CHAUFFAGE » des champs de sondes géothermiques verticales (Figure 14).

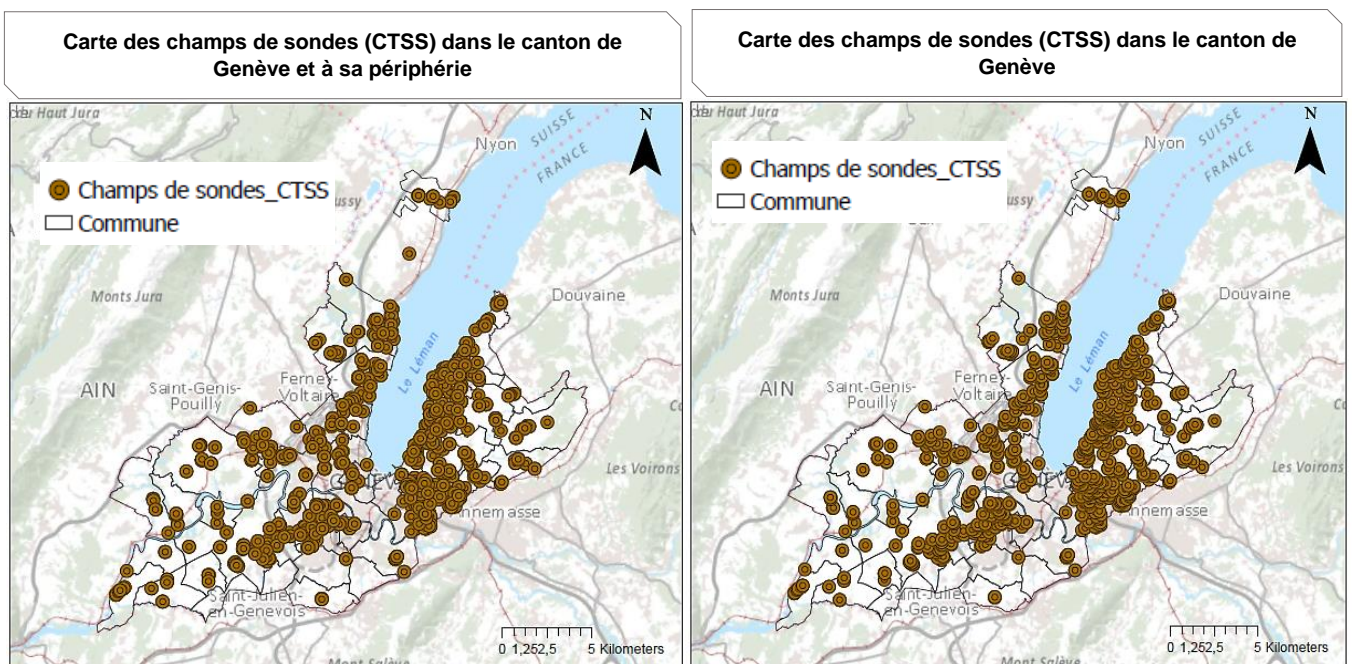


Figure 14. Sélection des sondes géothermiques localisées uniquement dans le canton de Genève à partir de la couche « A_CTSS_CAD_CHAUFFAGE » de la base de données CTSS.

2.1.2.2 Evaluation des données de sondes géothermiques (SGV) CTSS et SOLSTISS

L'analyse et le traitement des données de sondes géothermiques verticales sont basés uniquement sur le nombre de sondes recensées dans les deux fichiers : A. *CTSS_CAD_CHAUFFAGE* et *GEOL_SS_SONDAGE*, issus respectivement des bases de données CTSS et SOLSTISS. Les champs de sondes saisis par le CTSS peuvent représenter le nombre exact de sondes installées au niveau d'une parcelle, comme ils peuvent représenter un nombre inférieur. Cela est probablement dû au fait que plusieurs données n'ont pas été transmises au CTSS.

Les sondes géothermiques saisies au niveau de la base de données du GESDEC (SOLSTISS) localisées uniquement dans le canton de Genève sont des sondes de références pour chaque champ de sonde. Elles peuvent être soit au nombre de 1, 2 ou même 3. Cependant, il existe des cas où il peut s'agir d'une sonde unique. Dans ce cas-là elle ne représente pas un champ de sonde, mais une seule sonde existant au niveau d'une installation.

Etant donné le manque de sondes géothermiques recensées dans les fichiers du Cadastre Technique du Sous-sol, et afin de récupérer le maximum d'information, les données des deux fichiers respectivement CTSS et GESDEC ont été croisées.

Cependant, la superposition des deux couches révèle les cinq cas de figures suivants (Figure 15) :

Cas1 : Sonde de référence sans champ de sondes

Cas2 : Plusieurs sondes de référence sans champs de sondes

Cas3 : Champs de sondes sans sonde de référence

Cas4&5 : Champ de sondes avec sondes de référence ayant une position différente.

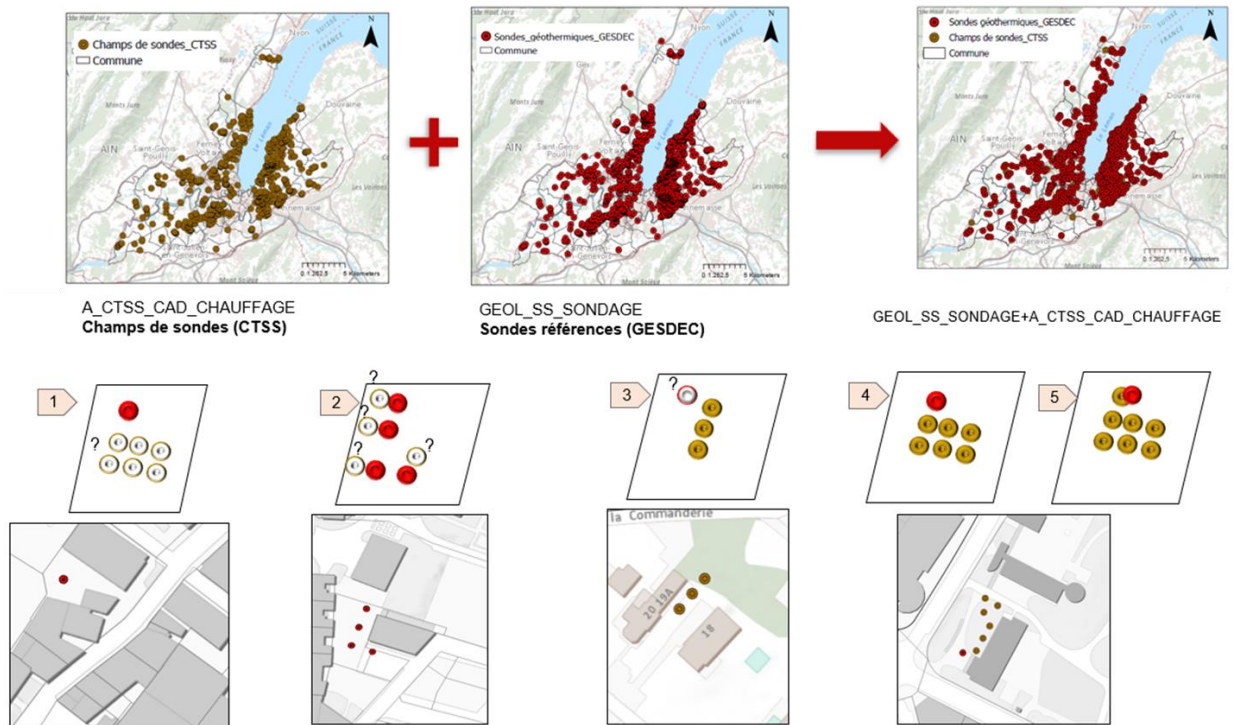


Figure 15. Les cinq cas de figures obtenus à partir de la superposition des données de sondes géothermiques CTSS et GESDEC.

L'analyse qualitative du fichier CTSS (Figure 16) montre qu'il existe 2033 sondes regroupées en 482 champs de sondes dont 437 champs de sondes possédant des sondes de références et seulement 45 champs ne possédant pas de sondes de référence du GESDEC.

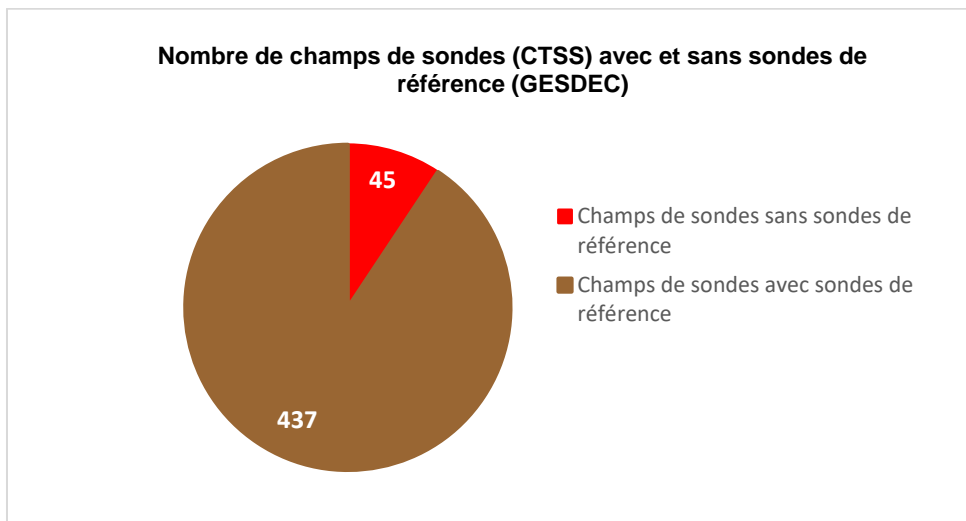


Figure 16. Analyse statistique du fichier A. CTSS_CAD_CHAUFFAGE, nombre de champs de sondes avec ou sans sondes de références GESDEC.

L'histogramme de comparaison (Figure 17) montre la différence entre le nombre de sondes répertoriées dans les deux sources (CTSS et GESDEC) avec **2300 et 971** sondes respectivement. Cependant, on ne peut pas se baser sur le nombre de sondes recensées au niveau de SOLSTISS car ce sont des sondes de référence. Actuellement, le nombre de sondes géothermiques recensées au niveau du GESDEC dans le fichier de suivi de dossier interne du GESDEC est de 3896 sondes entre 1986 et 2021.

À ce jour, il est difficile de recenser le nombre exact des sondes géothermiques verticales au niveau du canton de Genève, car beaucoup de données n'ont pas été transmises par les bureaux d'ingénieur de forage au GESDEC. Le fichier GEOL_SS_SONDAGE est régulièrement mis à jour au niveau de SOLSTISS, mais également dans toutes les bases de données internes de l'Etat de Genève.

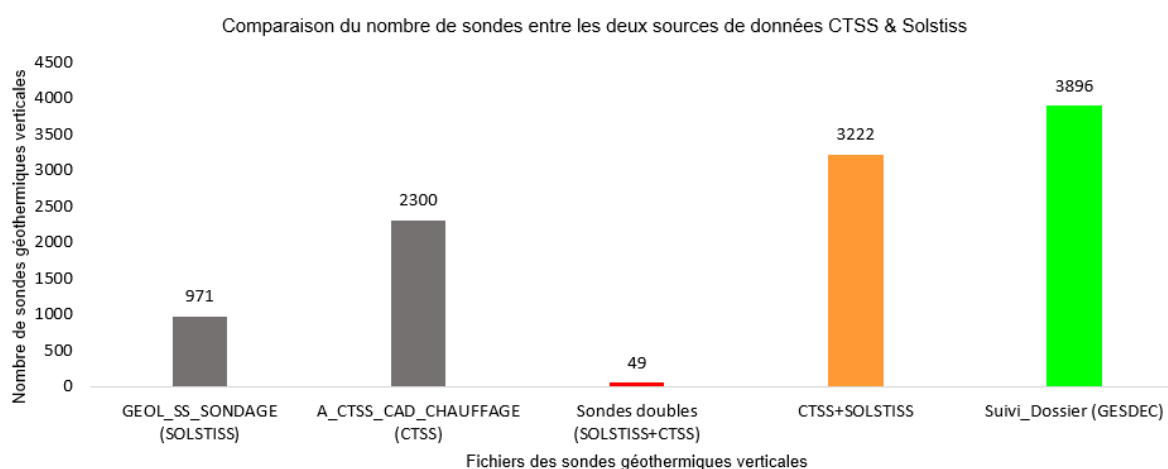


Figure 17. Histogramme de comparaison entre le nombre de sondes dans les deux sources de données CTSS et GESDEC (Base de données SOLSTISS et le fichier de suivi de dossier).

2.1.2.3 Révision du fichier de champs de sondes du CTSS

La couche A_CTSS_CAD_CHAUFFAGE à l'état brut (Tab.2) ne peut être utilisée pour croiser les données avec la couche précédente du GESDEC (GEOL_SS_SONDAGE). Afin de pouvoir réaliser cette combinaison de données, il a été nécessaire de réviser certains attributs de la couche CTSS tels que "ID_DOSSIER" et l'attribut "Dimension" où certaines anomalies ont été observées :

- Sondes appartenant à un même champ, mais pas au même ID-DOSSIER
- Sondes ayant un ID_DOSSIER de valeur 0
- Sondes n'ayant pas d'ID_DOSSIER (valeur nul)
- Certains numéros de "ID_DOSSIER" attribués aux sondes géothermiques ne sont pas corrects et d'autres ne correspondent pas à la référence structurelle d'un numéro OAC.

-Valeurs de profondeur inexistante et parfois ne correspondent pas à la profondeur de la sonde, informations parfois confondues avec la taille de la sonde ou diamètre du trou.

L'attribut dimension contient du texte décrivant la profondeur et la dimension de la sonde, il a été nécessaire de créer un attribut seulement pour la profondeur (Profondeur_m) afin d'en extraire les valeurs décrites. Cependant, il manquait encore des valeurs de profondeurs qui ont été complétées à partir du fichier de suivi de dossier du GESDEC.

Quant à l'attribut "ID_DOSSIER", chaque numéro de chaque champ de sondes a été vérifié selon les sources suivantes :

-Le site SAD Consultation⁸.

-Le fichier du suivi de dossiers du GESDEC issu des rapports transmis par les bureaux de forage.

-La couche SIT_AUTOR_DOSSIER et par les sondes de référence GESDEC en utilisant l'attribut "OAC_DOSSIER" de la couche GEOL_SS_SONDAGE.

Une fois que les corrections de l'attribut "ID_DOSSIER" et l'ajout de l'attribut Profondeur_m ont été faits, d'autres attributs ont été rajoutés tels que ID-SOND_Gesdec, Profondeur_m et ANNEE et UNITE_GEOLOGIQUE (Tab.3) afin de trouver une possibilité de faire une jointure par attribut avec la couche « GEOL_SS_SONDAGE ».

Tab 2: Attributs originels de la couche A. CTSS_CAD_CHAUFFAGE avant révision.

Attribut de base	Description
ID_DOSSIER	Identifiant du dossier
FLUIDE	Fluide transporté : - Gaz - Eau surchauffée - Autre - Inconnu
ETAT	Etat de la conduite : - En service - Hors service - Planifié - Abandonné - Inconnu
REMARQUES	Renseignements complémentaires sur l'objet
SHAPE	Champ binaire automatique contenant la géométrie des objets
ID_SONDE	Identifiant de la sonde
ALTITUDE_MIN	Altitude minimum
DETERMINATION_PLANIMETRIQUE	Précision de la représentation planimétrique : - Précis <20 cm - Imprécis >20 cm - Inconnu
ALTITUDE_MAX	Altitude maximum
OBJECTID	Champ automatique avec l'identifiant de la base de chaque objet (Attention, ne pas l'utiliser comme identifiant unique permanent)
DIMENSION	Information sur la taille de l'objet

⁸ <http://etat.geneve.ch/sadconsult/sadconsult.asp?WCI=frmConnectionHandler>

Tab 3: Attributs ajoutés dans la couche A. CTSS_CAD_CHAUFFAGE après révision.

Nouvel attribut	Description
ID_SOND_Gesdec	Numéro de sondage de la sonde de référence GESDEC
Profondeur_m	Mètre linéaire de sonde
UNITE_GEOLOGIQUE	Correspond à l'unité géologique atteinte par le forage.
ANNEE	Correspond à l'année de fin travaux

2.1.2.4 Saisie des données pour les systèmes Ouverts "doublet"

Les données récoltées à partir des différents rapports transmis au GESDEC des installations géothermiques (systèmes ouverts), ont été saisies via un TopoForms qui par définition est un formulaire de saisie ou de consultation des solutions géographiques ne nécessitant pas de longs et coûteux développements. Il permet d'intégrer des modèles de géodatabase (domaines de valeurs, sous-types, relations, etc...) et offre un large éventail de fonctionnalités allant de la manipulation et d'analyse d'objet géoréférencé jusqu'à la gestion de table d'attribut. Ce Topoforms (Figure 18A) inséré dans Arcmap est relié à la couche d'entité « GEO2020_GEOL_SS_INSTAL_GEOTH » (Figure 18B) dans laquelle sont édités des polygones correspondant à la limite de la parcelle englobant ainsi les ouvrages installés et parfois au périmètre d'utilisation de l'installation géothermique (Ex. CAD Concorde). Certains attributs tels que le "STATUT", le TYPE_OUVRAGE (Pompage ou injection) et autres, ne possèdent pas d'information, ils seront complétés par la suite, lors de la transmission des données au GESDEC.

A

Information de mise à jour

Auteur saisie Auteur MAJ ID_Admin

Date saisie Date MAJ

Installation Géoth.

Nom projet Type de géothermie

Número autorisation (OAC) Type d'installation

Autorisation / Concession Nombre d'ouvrages

Fin des travaux Nom ressource (syst. ouvert)

Propriétaire Profondeur max (m) (syst. fermé)

Etat

ADMIN PROJET CONTACT TECHNIQUE ENERGIE MESURES CONCESSION DOC

ID Admin ID Projet Type de géothermie

But Statut Etat

Code autorité Concession Propriétaire donnée

Utilisation

Début travaux Fin travaux Réception donnée

Confidentialité Fin confidentialité

Remarque

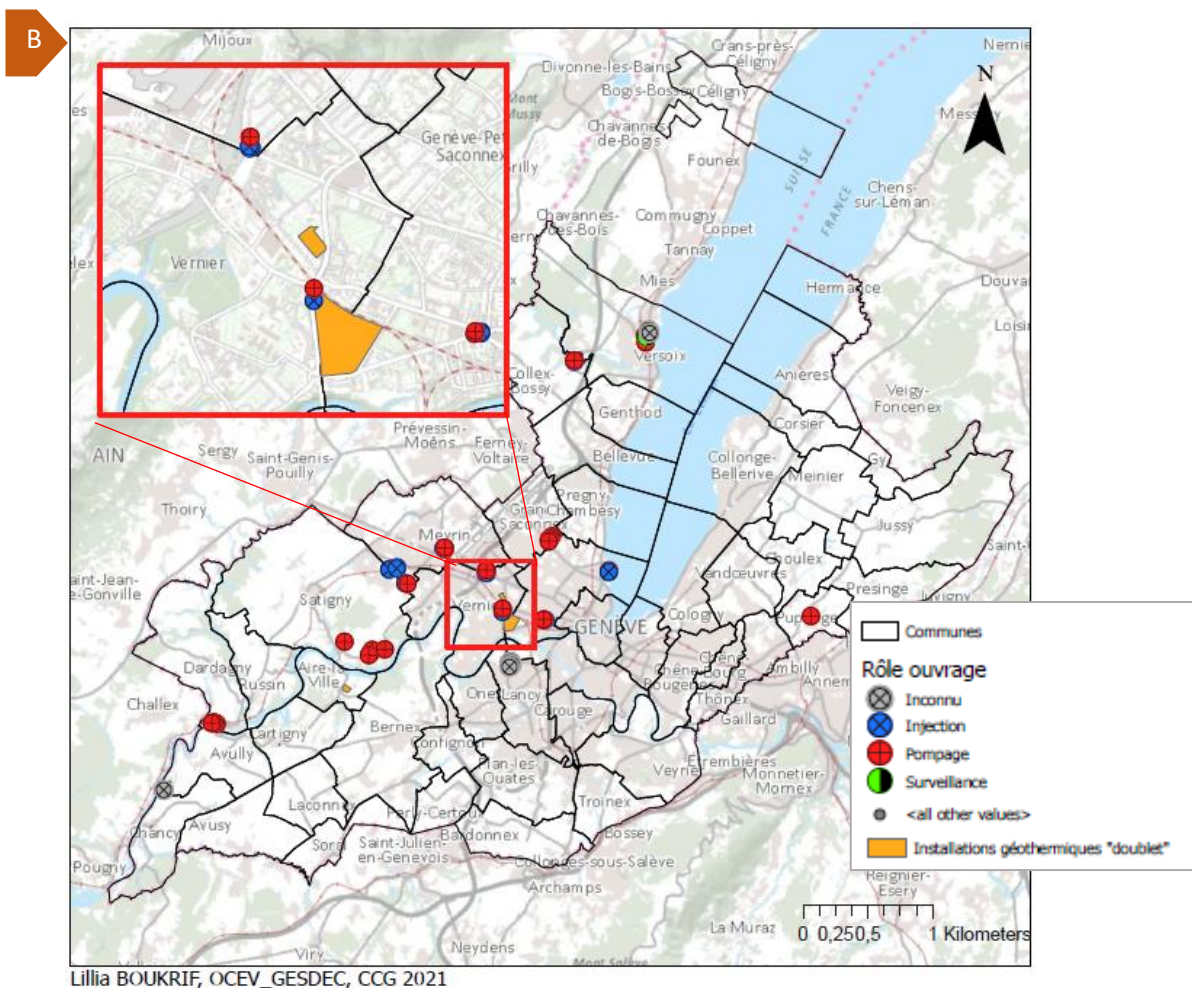


Figure 18. TopoForms de saisie de données utilisé pour éditer la couche GEOTH_SS_INSTAL. b) Carte des installations géothermiques de type doublet (Système ouvert) dans le canton de Genève.

2.1.2.5 Utilisation du script Model-Builder

L’automatisation des étapes de géotraitement des données géothermiques s’est faite via le script Model-Builder, une méthode efficace pour traiter différentes couches dans ArcGIS pro. Il permet de synthétiser de multiples outils et de les exécuter sous forme de processus permettant ainsi d’économiser du temps lors de la conversion de plusieurs jeux de données en même temps⁹. Le script réalisé pour les systèmes fermés a été subdivisé en plusieurs modèles (Figure 19) car Model-Builder admet certaines limites telles que la difficulté à exécuter un long modèle et la perte du chemin d'accès à la couche de traitement.

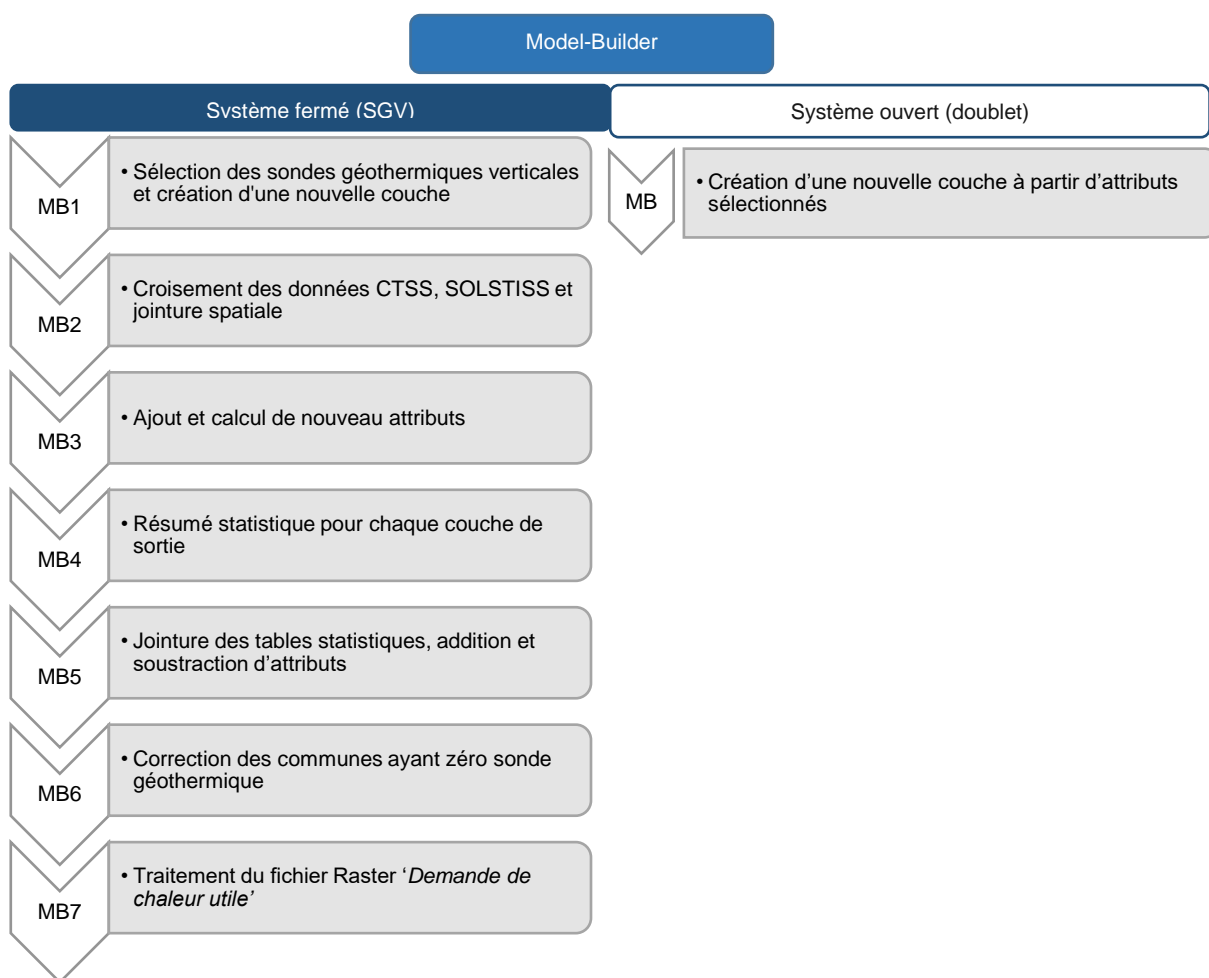


Figure 19. Schéma synthétisant les grandes étapes du script Model-Builder dans les systèmes fermés et ouverts.

⁹ Version 3.0 du cours fait par Esri Suisse 2017.

2.1.2.5.1 Système fermé « Sondes géothermiques verticales » (SGV)

➤ *MB1 : Sélection des sondes géothermiques verticales et création d'une nouvelle couche*

Cette étape consiste en la sélection des sondes géothermiques à partir de la couche de sondages « GEOL_SS_SONDAGE » de la base de données SOLSTISS, puis en la création d'une copie de la sélection sur laquelle sont rajoutés des attributs utiles pour les besoins du projet. Ces derniers ont été sélectionnés à partir des trois tables ADMIN, EQUIPEMENT et PROJET reliées à la table GEOL_SS_SONDAGE. Par la suite, le tout est joint à la copie précédente qui représente la nouvelle couche créée appelée « Sondes_géothermiques_GESDEC » (Figure 21).

➤ *MB2 : Croisement des données CTSS, SOLSTISS et jointure spatiale*

Les données de sondages géothermiques (CTSS et GESDEC) ont été croisées avec la couche CAD_COMMUNE afin d'avoir l'attribut "COMMUNE" dans les couches points (Sonde_géothermiques_GESDEC et Champs de sondes_CTSS) (Figure 20). La superposition des couches de ces couches (Après révision) montre qu'il existe des sondes doubles. Afin de les éliminer, une intersection spatiale a été réalisé sur les sondes ayant les mêmes références spatiales. Le fichier obtenu est appelé EvEG_doublons contenant 49 sondes doubles.

Par la suite, une jointure spatiale a été réalisé entre les couches précitées et la couche polygone CAD_COMMUNE afin de représenter la donnée au niveau des polygones (Communes) et non pas au niveau des points (Sondes) (Figure 21).

➤ *MB3 : Ajout et calcul de nouveaux attributs*

Pour chaque couche jointe spatialement du script MB2, plusieurs attributs ont été ajoutés à leurs tables afin de pouvoir calculer l'énergie géothermiques au niveau de chaque sonde géothermique verticale (Figure 21). Les attributs ajoutés sont représentés dans le Tab.4 : COP_PAC et Puiss_max_UnitéGeol, ce sont des valeurs fixes, par contre les autres attributs (Puiss_Geoth, Energie_Geoth_GWh_an) sont calculés selon les formules de la section 2.1.1.3.

Tab 4: Ajout de nouveaux attributs à chaque couche.

Nom nouvel attribut	Type	Description
Puiss_max_UnitéGeol	Double	Représente la puissance maximale soutirable par mètre linéaire de sonde en double U
COP_PAC	Double	Coefficient de la pompe à chaleur
Puiss_PAC_Kw	Double	Puissance électrique de la pompe à chaleur PAC (kW)

Puiss_Geoth	Double	Puissance géothermique de la sonde géothermique verticale SGV (kW)
Energie_Geoth_Gwh_an	Double	Energie géothermique SGV +PAC (GWh/an)

➤ *MB4 : Résumé statistique pour chaque couche de sortie*

Etant donné que les couches de sortie « Sondes_géothermiques_GESDEC et Champs de sondes_CTSS » proviennent de deux sources différentes, et bien que le fichier CTSS ait été révisé, il ne peut pas y avoir une jointure par attribut, car le nombre de lignes n'est pas égal (Figure 21). Afin de combiner ces deux sources de données, une jointure spatiale avec les polygones de commune a été réalisée dans le précédent modèle MB3 et a permis ainsi de générer un résumé statistique des attributs ci-dessous (Tab.5).

Tab. 5: Attributs sur lesquels les statistiques ont été réalisés.

Attribut Statistique	Type de statistique
Puiss_Geoth_kW	SUM
Energie_Geoth	SUM
ID_SONDAGE	COUNT
ID_DOSSIER	COUNT
PROFONDEUR_MD	SUM
Profondeur_m	SUM

➤ *MB5 : Jointure des tables statistiques, addition et soustraction des attributs*

Une fois que le résumé statistique a été réalisé, trois tables en résultent (*Stat_Cadastre, Stat_Intersect et Stat_Gesdec*), et une jointure par l'attribut "COMMUNE" a été réalisé afin d'additionner et de soustraire les attributs du fichier des sondes doubles.

Le résultat de la jointure montre des valeurs 'nul'. Ces dernières signifient qu'il n'existe pas de sondes doubles au niveau de certaine commune. De ce fait, soit les valeurs de la sonde du CTSS soit celle du GESDEC ont été attribuées selon les cas suivants (Figure 21) :

-Si le champ de sondes ne possède pas de sondes de référence, les valeurs 'nul' représentent celle du champ de sonde.

-Si la sonde est unique (sonde de référence), les valeurs 'nul' représentent celles du GESDEC.

➤ *MB6 : Correction des communes ayant 0 sondes géothermiques*

Les communes qui affichent la somme du nombre de sondes nul telle que Sorale et Genève_Eaux_vive ont été corrigées par les valeurs 1 qui représente la sonde de référence, car elle n'a pas été prise en compte lors du calcul en raison de la valeur 'nul' dans le fichier CTSS (Figure 21).

➤ *MB7 : Traitement du fichier raster (Demande utile de chaleur ha_1)*

L'objectif de ce géotraitement est d'extraire les valeurs du raster « Demande de chaleur utile en MWh/ha » selon les polygones des communes. Pour ce faire, les valeurs du raster ont été arrondies par l'ajout de la valeur 0.5 dans le but d'éviter les erreurs de calcul de l'algorithme du logiciel ArcGIS pro (Figure 20). Puis, toutes les valeurs supérieures à 0 ont été extraites afin de calculer spatialement la demande de chaleur utile. En utilisant l'outil **zonal statistics** as table, on obtient les valeurs de demande de chaleur utile par polygone de Commune.

Afin d'avoir une seule couche d'entités contenant toutes les informations utiles pour la construction du tableau de bord (Dashboard), une jointure a été établie entre les couches polygones « Demande de chaleur utile », « Energie géothermique » et « CAD_COMMUNE » (Figure 21).

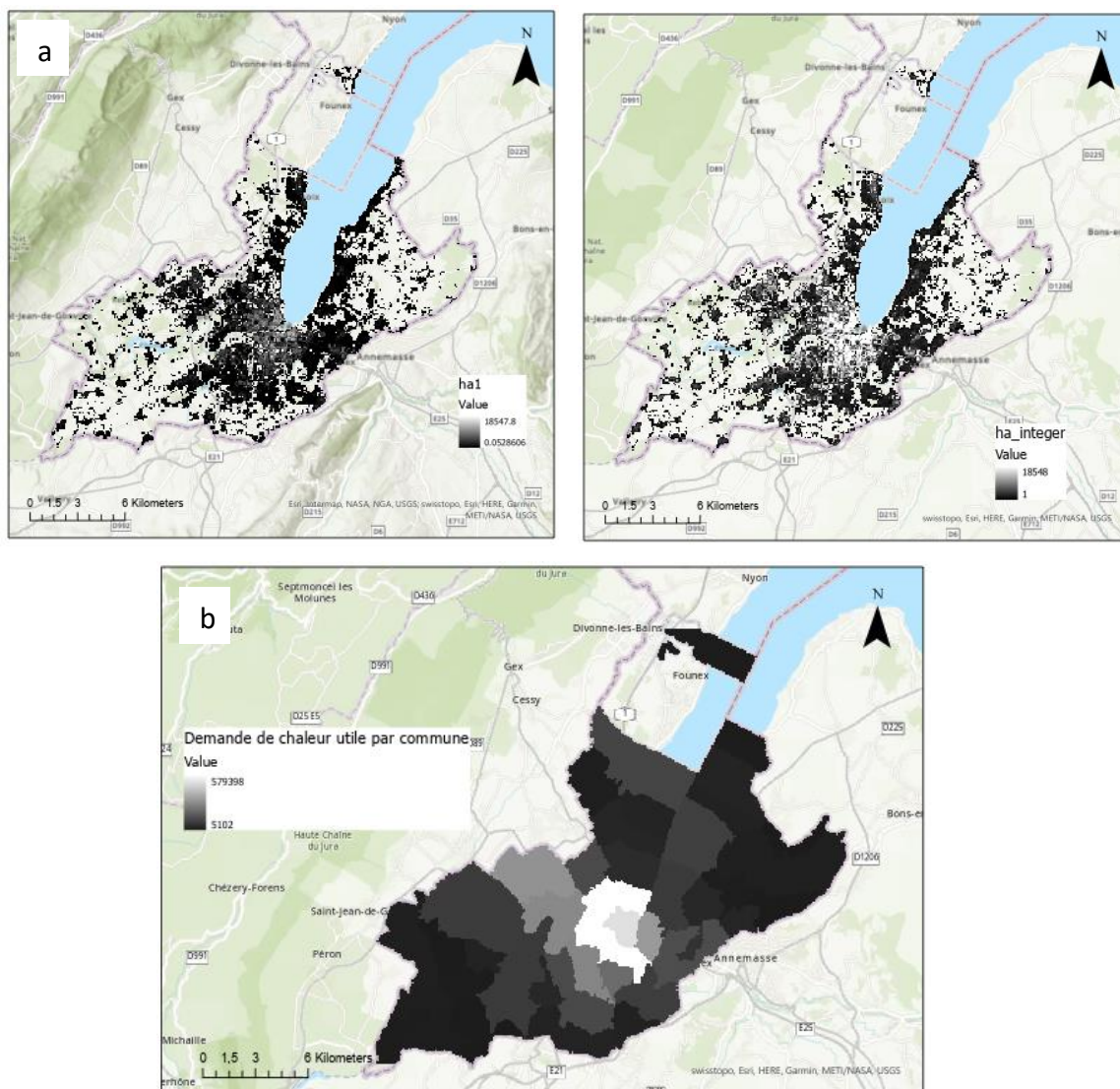


Figure 20. a) Valeurs arrondies du fichier raster ha_1 de la demande de chaleur utile en MWh/ha. b) valeurs de « Demande de chaleur utile » extraites selon les polygones de commune.

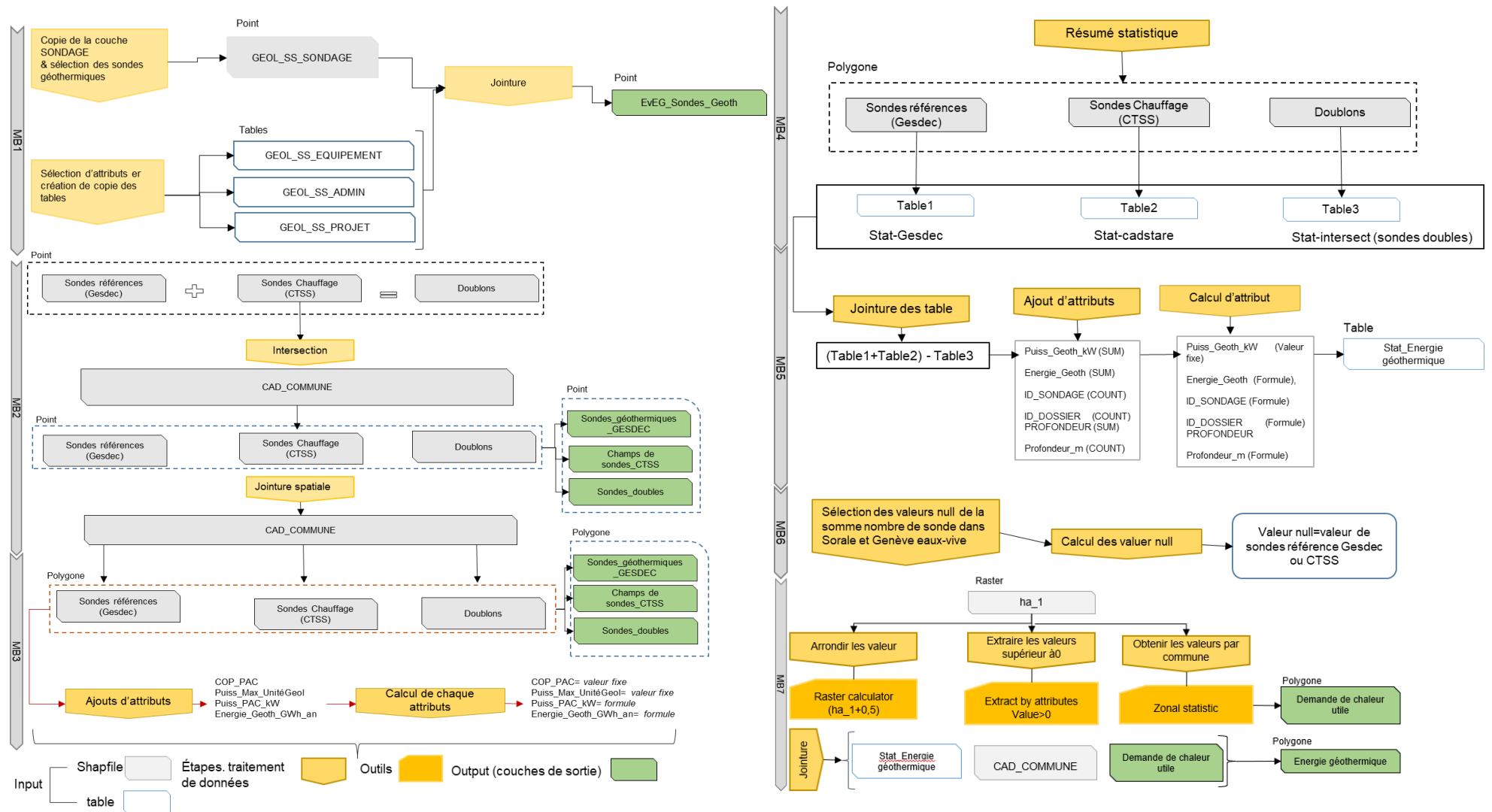


Figure 21. Schémas synthétisant les différentes étapes du script Model-Builder, qui répondent à la problématique de l'estimation de l'énergie géothermique des systèmes fermés (SGV).

2.1.2.5.2 Système ouvert « Installations géothermiques » (doublet)

La réalisation d'un script Model-Builder pour les systèmes ouverts a été plus simple comparé aux systèmes fermés, car il n'y a pas eu besoin d'ajouter d'autres attributs pour réaliser le Dashboard autres que ceux déjà présent dans la base de données SOLSTISS.

L'objectif consistait à créer une nouvelle couche qui contient tous les attributs nécessaires pour la mise en œuvre du Dashboard. C'est à partir de la couche « GEO2020_GEOL_SS_INSTAL_GEOTH » reliée à d'autres tables que des attributs ont été sélectionnés, en utilisant un script Model-Builder qui permet de sélectionner les installations géothermiques éditées (polygones), puis par la création d'une nouvelle couche obtenue à partir de la jointure entre la copie de la sélection sur la couche « GEO2020_GEOL_SS_INSTAL_GEOTH » et la sélection d'attributs à partir des tables relationnelles (Figure 22).

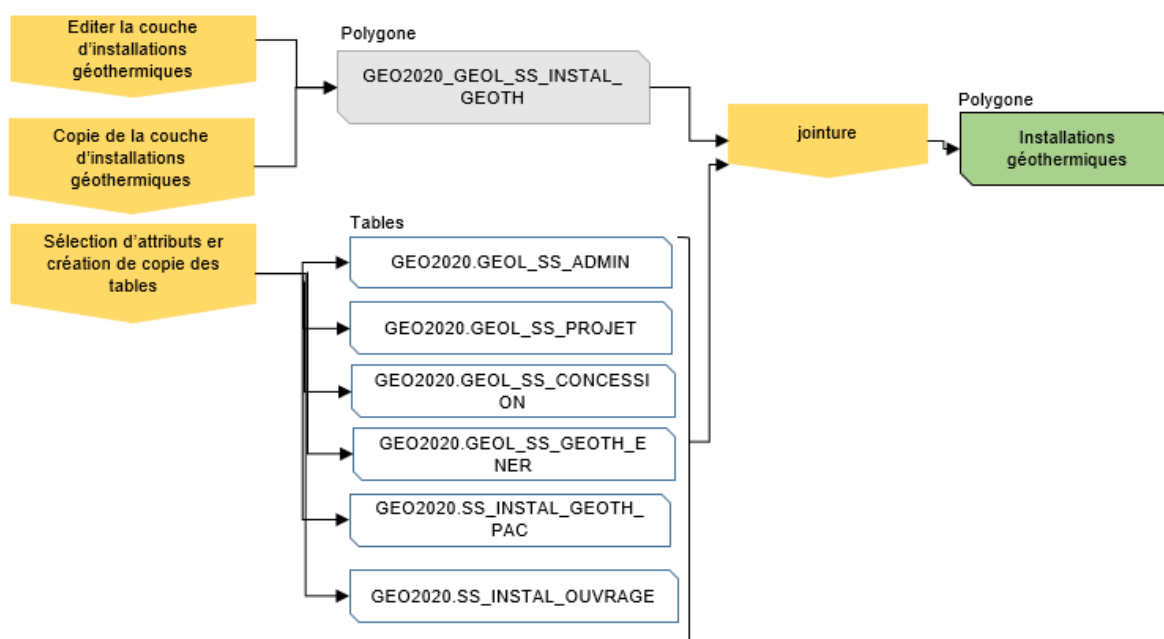


Figure 22. Schémas illustrant les étapes du script Model-Builder pour les systèmes ouverts.

2.1.3 Phase φIII : publication des couches sur le portail en ligne et utilisation de l'application Dashboards

2.1.3.1 Du projet ArcGIS pro vers la plateforme

Cette dernière partie du projet représente l'étape du passage depuis ArcGIS pro vers le portail ArcGIS et l'utilisation de l'application Dashboards (Figure 23). Dans notre cas c'est le portail cartographique de l'Etat (<https://app2.ge.ch/tergeoportal>) utilisé pour partager les données (cartes). Une fois connecté depuis ArcGIS pro avec l'identifiant personnel (BOUKRIFL), le partage des cartes et des couches web est possible avec l'outil « partagé et publié en tant que couche d'entités » (Share as web layer).

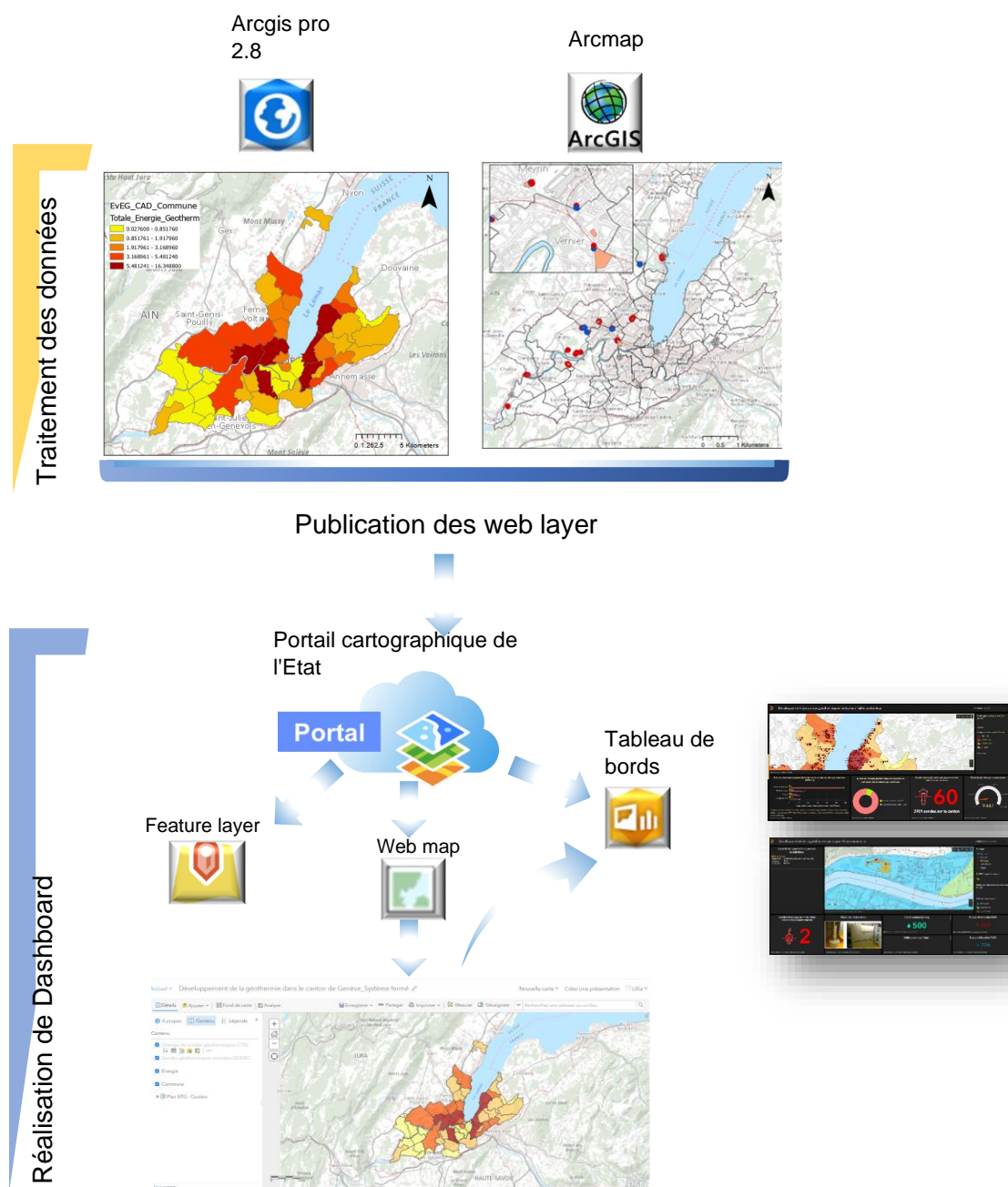


Figure 23. Résumé des étapes du passage depuis ArcGIS pro vers la plateforme ArcGIS.

Cette option permet d'importer toutes les couches du projet (Tab.6) utiles pour la construction des tableaux de bords mais également l'utilisation de la Story Maps.

Tab. 6. Résumé des couches d'entités (feature layer) contenant les couches exportées sur le portail cartographique de l'Etat.

Couches d'entités	Couches	Description
Estimation de l'énergie à partir des sondes géothermiques verticales_canton de Genève	Sondes géothermiques_GESDEC.shp	Ce projet contient tous les sondages géothermiques que ce soit les sondes de références GESDEC ou les champs de sondes du CTSS. Il contient aussi la carte des énergies géothermiques produites à partir des sondes géothermiques verticales calculées selon un modèle théorique.
	Champs de sondes_CTSS.shp	
	Energie géothermique.shp	
	Commune.shp	
Répartition des installations géothermiques_canton de Genève.	Ouvrage.shp	Ce projet contient toutes les installations géothermiques de types doublet et les ouvrages (puits) recensées dans le canton de Genève.
	Installations géothermiques « Doublet »	
	Communes.shp	
	Parcelle	

L'outil de partage affiche un volet qui remplit les métadonnées de la carte : nom, résumé et balises (Figure 24). Ces paramètres sont nécessaires sinon la carte ne pourra pas s'exporter vers le portail cartographique de l'état hébergé dans l'espace personnel "BOUKRIFL".

La couche web pourrait être partagée avec un groupe d'utilisateurs qui peut avoir accès aux données publiées sur la plateforme ArcGIS (portail cartographique de l'Etat).

2.1.3.2 Partage des images sur le portail cartographique

Les images représentant les installations géothermiques sont publiées et partagées publiquement sur le portail cartographie de l'État pour la récupération des Url spécifiques à chaque image. Par la suite, un attribut nommé Url a été créé dans la table de la couche d'entités du projet, et chaque url est copié pour chaque installation, ce qui permettra à chaque sélection d'un doublet dans le tableau de bord de visualiser sa propre image.

2.1.3.3 Création des cartes web

Sur le portail cartographique de l'Etat (Tergeoportal), l'application Map viewer permet de configurer la carte, de modifier la symbologie et de configurer la fenêtre contextuelle pour l'adapter à une meilleure visualisation. Il suffit de changer la configuration de la carte, et cela change aussi automatiquement au niveau du Dashboard.

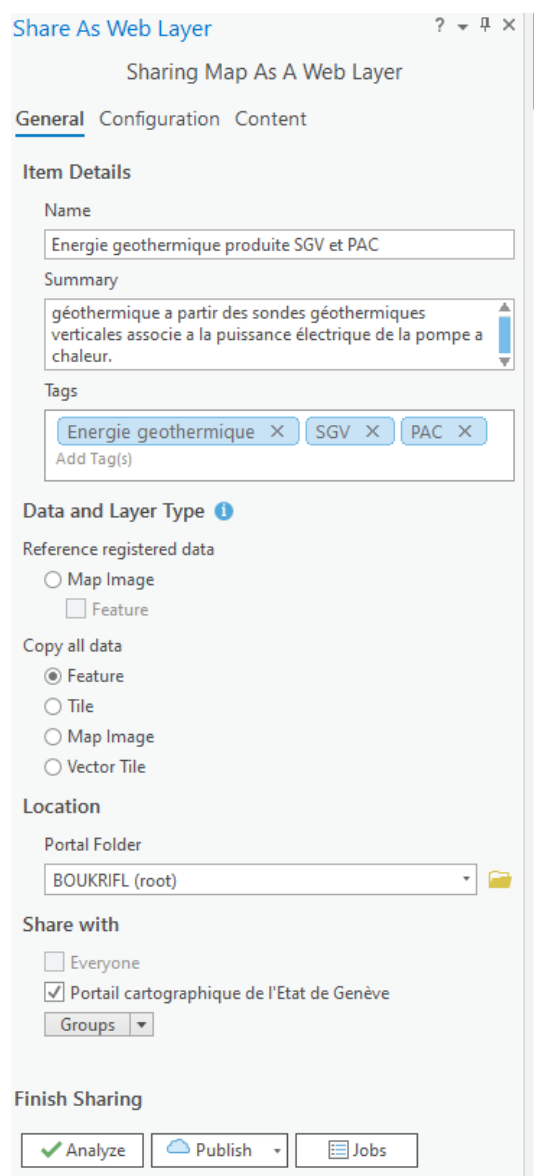


Figure 24. Capture d'écran du volet de métadonnées de la couche d'entité.

2.1.3.4 Création de Dashboard (type et éléments)

2.1.3.4.1 Système fermé (Dashboard public)

Les éléments choisis pour constituer le Dashboard du système fermé (voir section 3.1) pour la mise en valeurs des données de sondes géothermiques utilisées sont les suivants :

- *En-tête et sélecteur*

Cet élément représente le titre du projet situé en haut du Dashboard et contient un sélecteur de catégorie permettant de sélectionner les communes du canton au choix. Cet élément est essentiel, car c'est à partir de là que tous les autres éléments sont configurés avec la carte.

- *Volet latéral*

Le Dashboard des systèmes fermés étant destiné au grand public, il est jugé utile de rajouter un volet latéral qui permet à l'utilisateur d'avoir une description du projet ainsi que du fonctionnement des différents éléments liés à la carte.

- *Indicateurs*

Un seul indicateur a été représenté dans ce Dashboard. Il s'agit du nombre de sondes géothermiques existant au niveau de chaque commune. Nous avons jugé qu'un seul indicateur est suffisant pour le projet des systèmes fermés et pour le grand public visé. Une icône propre à cet indicateur a été ajoutée afin de rendre le visuel plus attractif et plus parlant.

- *Jauge*

Elle représente l'attribut de profondeur-m qui est le total mètre linéaire forer de toutes les sondes géothermiques qui existent au niveau de chaque commune.

- *Diagramme à secteur*

Il est sous forme d'anneau qui représente la part de l'énergie géothermique par rapport à la demande de chaleur en GWh/an pour chaque commune. Les données s'affichent en sélectionnant une commune.

- *Diagramme de série*

Un diagramme de série dynamique configuré avec le sélecteur du tableau permet de donner les valeurs de l'énergie géothermique complétant ainsi le diagramme à secteur de l'énergie géothermique versus la demande de chaleur utile.

2.1.3.4.2 Système ouvert (Dashboard métier) (voir section 3.2)

- *En-tête et sélecteurs*

Ce Dashboard est composé d'un en-tête qui est le titre du projet situé en haut du Dashboard et d'un sélecteur de catégorie permettant de sélectionner les installations géothermiques du canton de notre choix. Cet élément est essentiel, car c'est à partir de là que tous les autres éléments sont configurés avec la carte.

- *Indicateurs*

Plusieurs indicateurs ont été représentés dans ce Dashboard car il est destiné à l'usage interne. Il s'agit de :

-Indicateur 1 : "Nombre d'ouvrages" représente les puits installés au niveau de la parcelle d'exploitation, ils peuvent avoir le rôle de puits de pompage ou de puits d'injection.

-Indicateur 2 : "Débit nominal (l/mn)" c'est le débit de pompage en litre par minute autorisé pour pomper les eaux de la nappe d'eau souterraine à des fins d'usage géothermiques, indiqué dans le document de la concession.

-Indicateurs 3&4 : "Energie d'extraction MWh" et "Energie d'injection MWh" représentent l'énergie possible à extraire et à restituer, respectivement au niveau des puits de pompages et d'injections de chaque installation géothermique.

- *Jauge*

Elle représente l'attribut de profondeur-m qui est le total mètre linéaire forer de toutes les sondes géothermiques qui existent au niveau de chaque commune.

- Liste "Caractéristiques techniques des installations"

Représente les informations relatives concernant la concession (Date début et date fin), prestation de l'installation géothermique chaud ou froid.

2.2 Métadonnées

Comme chaque modèle du système d'information géographique celui-ci possède une page sur laquelle sont décrits des détails des différents éléments tels que : la date de création, la taille du fichier, et avec qui le partage s'est fait. D'autres éléments tel que le titre, les contraintes d'accès et d'utilisation ainsi que la description (où sont mentionner les différents éléments qui composent le Dashboard ainsi que les unités utilisées et la source de données) sont aussi décrit sur cette page présentant les métadonnées. (Figure 25).

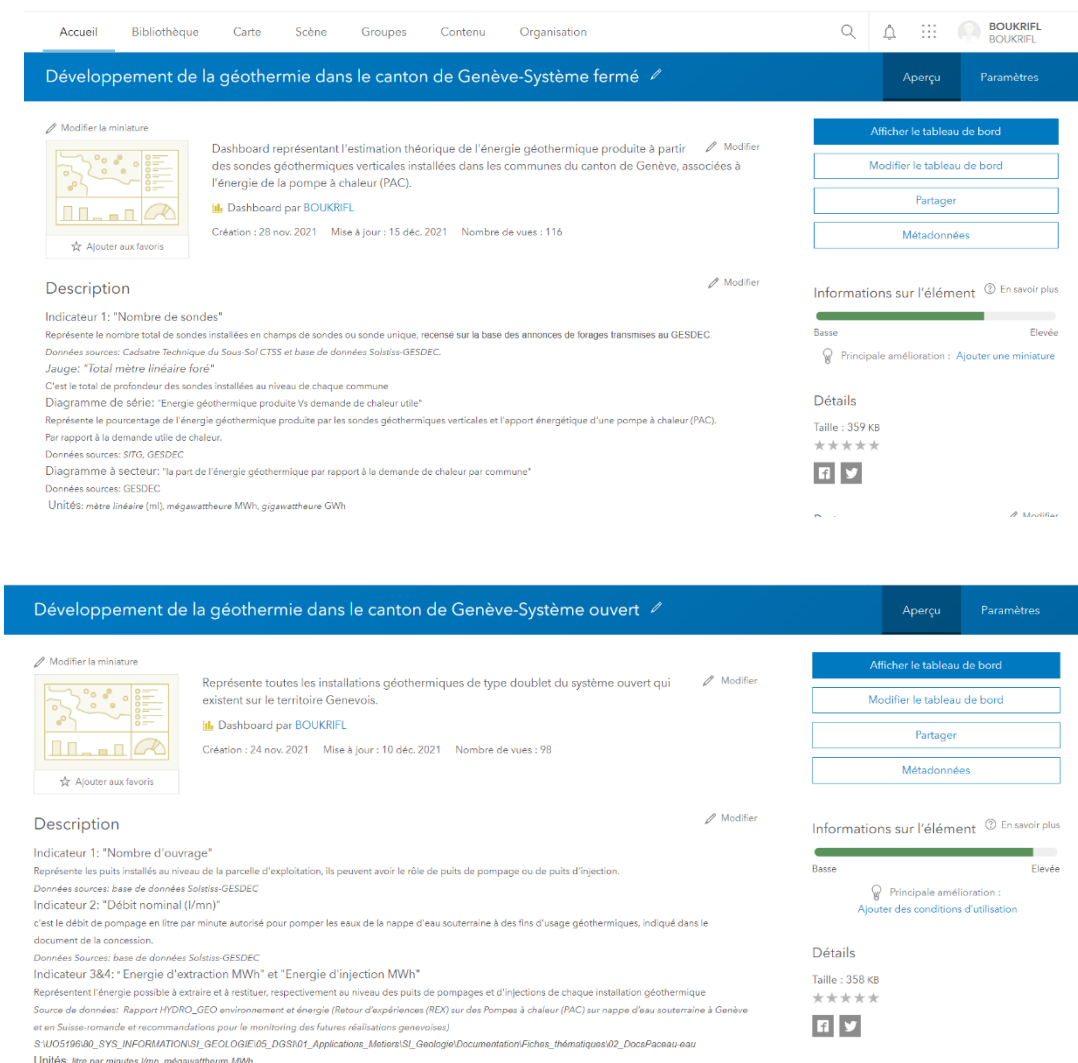


Figure 25. Capture d'écran de la page des métadonnées des deux Dashboards (système fermé et système ouvert).

2.3 Création d'une Story Maps (Classic Story maps)

Après l'application Dashboard principale qui a fait l'objet de notre étude, vient l'utilisation de l'application web « Classic Story Maps », à travers laquelle des récits géographiques sont créés. Des cartes et des images, des vidéos ainsi que d'autres contenus multimédias sont partagés afin d'enrichir le récit. Il existe plusieurs modèles de Story Maps : basique, journal, cascade, série, etc...

Le modèle qui a été compatible à notre étude est de type série car il permet d'associer des contenus représentant la même thématique au sein du même espace géographique ou au contraire, sous forme d'onglets, commande d'accordéon latéral ou puces numérotées¹⁰.

¹⁰ Esri_Classic Story Maps: <https://storymaps-classic.arcgis.com/fr/app-list/map-series/>

2.4 Mise à jour des données des Dashboard

Tout le projet réalisé a été conçu avec le script model-Builder afin d'automatiser toutes les étapes et les outils utilisés. Cela évite l'oubli pour les nombreuses étapes du projet et permet un gain de temps pour une éventuelle exécution si nécessaire. Cependant, pour mettre à jour les données des Dashboard, model Builder n'est pas le script adapté pour faire ce genre d'automatisation. Avec le service DIT (Michel Terrond) une partie du script FME é été réalisée pour les systèmes fermés et les systèmes ouverts.

La méthode suivie pour le script FME des sondes géothermiques verticales est la même que celle utilisée pour le script model-Builder, sauf pour certaine étapes, telle que la sélection des doublons qui s'est faite sur un Buffer de 10 cm (FME) au lieu d'une sélection spatiale (Model-Builder) des sondes ayant les mêmes références spatiales. De plus, malgré la performance du script FME il reste à trouver une autre méthode pour résoudre le problème des valeurs Nul et des valeurs inexistantes qui empêchent le calcul pour certains attributs. Pour l'instant le code n'est pas totalement fini, car pour pouvoir l'exécuter correctement il va falloir corriger le fichier original du Cadastre Technique du Sous-sol. Dans un premier temps, la copie du fichier obtenu après correction pourrait être utilisée.

En ce qui concerne le Script FME des systèmes ouverts, le code est fonctionnel et prêt à être exécuté sans aucun problème. Une partie du Script FME des systèmes fermés et ouverts doit être complétée (Figure 26, 27), afin de mettre à jour les données de la plateforme ArcGIS, et ainsi remplacer le fichier exporté et mis à jour vers les données du tableau de bord.

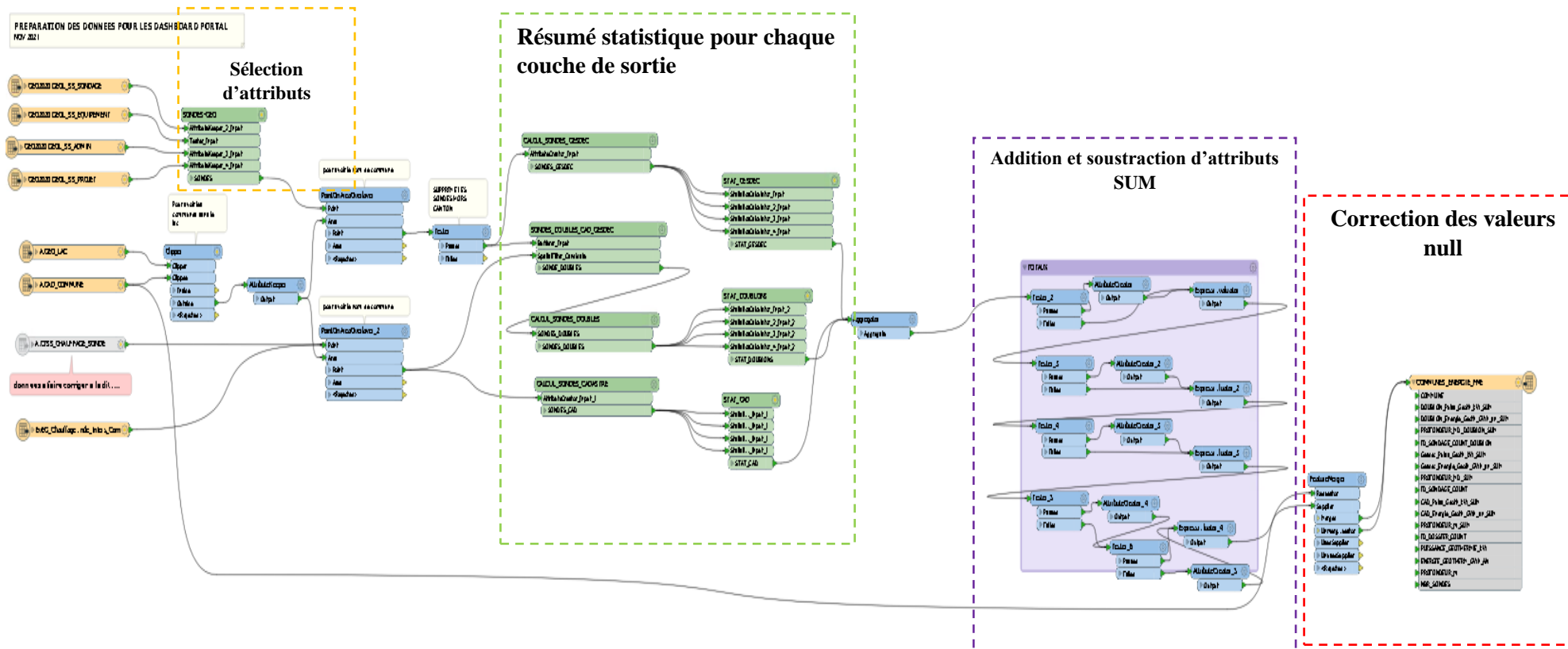


Figure 26. Une partie du Script FME qui servira à l'automatisation des données du Dashboard des systèmes fermés (voir les détails dans annexe 9).

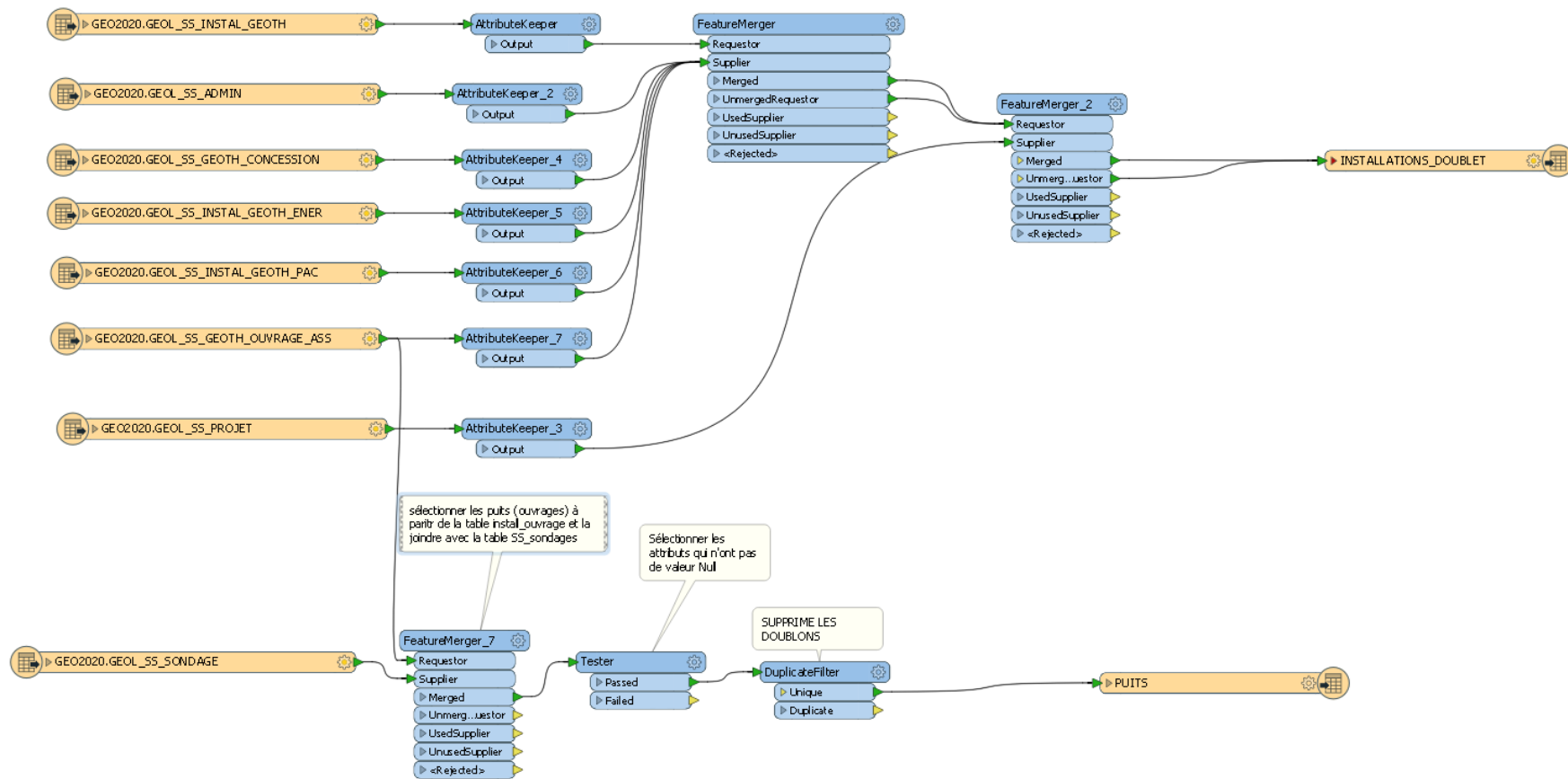
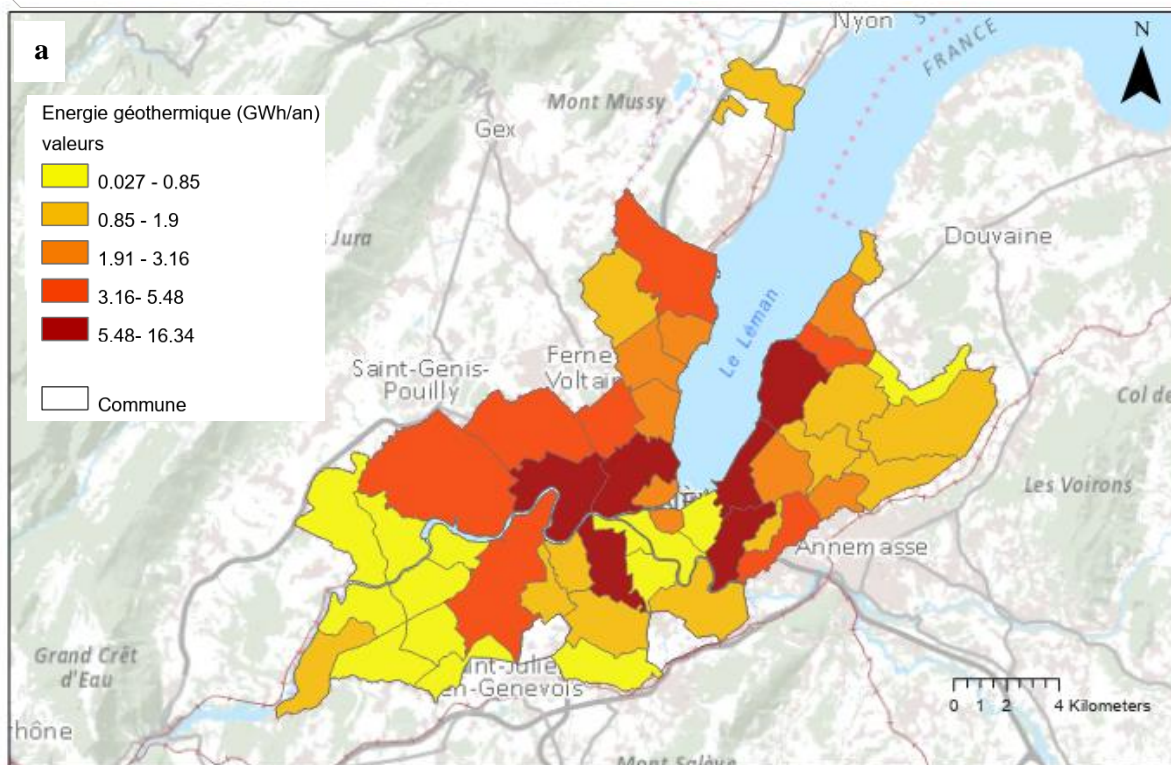


Figure 27. Une partie du script FME qui servira à l'automatisation des données du Dashboard des systèmes ouverts (voir annexe 10).

3 Résultats

Les résultats obtenus se présentent sous forme de cartes (Figure 28A, B), et principalement de deux Dashboards un pour le grand public et un autre pour le secteur métier (usage interne). Les cartes de la Figure 28a à l'échelle des communes, montrent les résultats obtenus sur l'estimation de l'énergie géothermique produite par les sondes géothermiques verticales associées à la puissance de la pompe à chaleur. Selon le modèle théorique de calcul d'énergie géothermique (Section 2.1.1.3), les valeurs obtenues sont comprises entre 0 et 16.34 GWh/an. Les valeurs inférieures à 0.85GWh/an (couleur jaune) représentent les communes de Dardagny, Russin, Aire-la-ville, Cartigny, Laconnex, Soral, Perly-certoux, Bardonnex, Gy et Genève-Eaux-Vives. Et les valeurs entre 5,48 et 16,34 (couleur rouge foncé) représentent les communes de Genève-Grand Saconnex, Lancy, Vernier, Cologny, Chêne Bougeries et Collonge- Bellerive. La Figure 28b montre les valeurs de demande de chaleur utile extraites selon les polygones des Communes. Ces valeurs sont comprises entre 5.08 et 579.214 GWh/an. Les communes dont les valeurs d'énergie géothermique sont élevées et sont comprises entre 5.47 et 16.3 GWh/an (couleur rouge foncé sur la carte) ont des valeurs d'énergies thermiques (demande de chaleur utile) plus faibles que les communes qui ont des valeurs d'énergie géothermique très faibles, comme la commune de Genève-Plainpalais (0.8 GWh/an d'énergie géothermique 579.214 GWh/an d'énergie thermique). De plus, la carte contient d'autres statistiques enregistrées sous les attributs suivants : Total_Nbr_Sondes (total nombre de sondes), mètres linéaires foré (ml), Puiss_Geotherm (kW) (puissance géothermique) et Energie Thermique (MWh/an et GWh/an) (énergie thermique) (Tab.6).

Carte de l'estimation de l'énergie géothermiques à faible profondeur dans le canton de Genève



Carte de demande de chaleur utile le canton de Genève

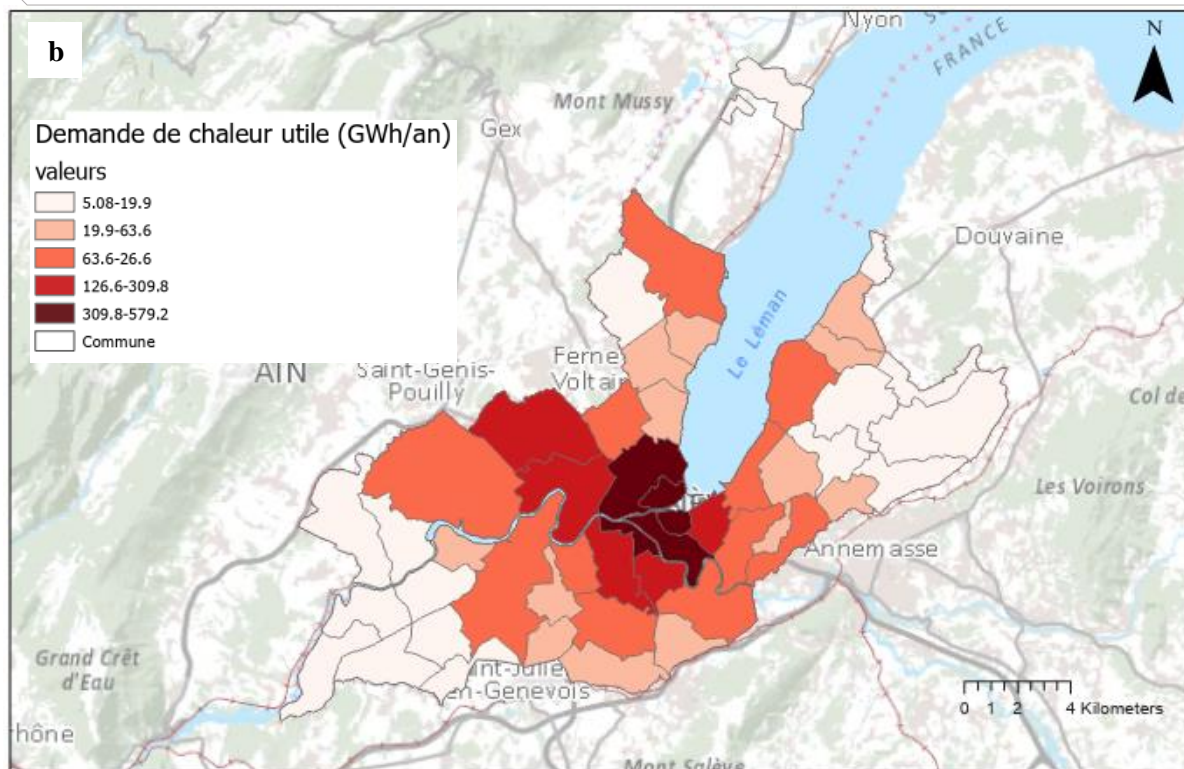


Figure 28. a). Carte de l'estimation de l'énergie géothermique produite à partir des sondes géothermiques verticales SGV valorisée par la puissance de la pompe à chaleur. b). Carte de la demande de chaleur utile dans le canton de Genève en GWh/an.

Tab. 7. Table de la couche "Energie géothermique" exportée sur le portail cartographique de l'Etat qui synthétise tous les résultats obtenus pour le Dashboard des systèmes fermés.

COMMUNE	Puiss_Geotherm (kW)	Energie_Geotherm (GWh/an)	Total mètre linéaire foré	Total_Nbre_Sondes	Energie_Thermique (MWh/an)	Energie_Thermique (GWh/an)
Aire-la-Ville	52,2	0,31728	8	7	24612	24,612
Anières	472,35	2,57364	9447	60	27553	27,553
Avully	32,2	0,19728	5	4	14260	14,26
Avusy	119,05	0,69372	17	16	13310	13,31
Bardonnex	20	0,192	400	6	26768	26,768
Bellevue	551,85	2,57244	52	51	31945	31,945
Bernex	798,6	4,22064	15972	96	83096	83,096
Carouge	142,5	0,846	21	20	198499	198,499
Cartigny	30,5	0,1932	610	5	10744	10,744
Céligny	333,9	1,66536	36	35	9618	9,618
Chancy	352,7	1,63848	33	32	11010	11,01
Chêne-Bougeries	2095,4	10,18896	41908	215	126698	126,698
Chêne-Bourg	389,15	1,91796	7783	41	63640	63,64
Choulex	297,45	1,62588	38	37	12443	12,443
Collex-Bossy	289,55	1,60692	5791	38	14516	14,516
Collonge-Bellerive	3252	16,3488	356	355	95651	95,651
Cologny	2156,1	10,09464	43122	205	82403	82,403
Confignon	297,7	1,65048	39	38	35790	35,79
Corsier	709,05	3,78972	14181	87	22208	22,208
Dardagny	93,7	0,53688	1874	13	17436	17,436
Genève-Cité	583,325	2,98398	66	65	475762	475,762
Genève-Eaux-Vives	1,5	0,0276	2	1	309890	309,89
Genève-Petit-Saconnex	1952,3	8,69352	39046	167	549940	549,94
Genève-Plainpalais	194,9	0,85176	16	15	579214	579,214
Genthod	450,95	2,18628	46	45	26553	26,553
Grand-Saconnex	976,15	4,47876	19523	89	121361	121,361
Gy	76	0,4464	1520	11	5085	5,085
Hermance	204,75	1,1154	4095	26	10745	10,745
Jussy	272,25	1,4454	5445	33	16461	16,461
Laconnex	104,75	0,5394	12	11	6267	6,267
Lancy	1619,25	7,7262	32385	160	260180	260,18
Meinier	275,75	1,4058	5515	31	19992	19,992
Meyrin	1073,85	5,48124	21477	121	289166	289,166
Onex	247	1,3848	4940	33	121354	121,354
Perly-Certoux	0	0	0	0	0	0
Plan-les-Ouates	177,45	1,09788	28	27	113649	113,649
Pregny-Chambésy	586,55	2,94372	11731	64	45957	45,957

Presinge	255,5	1,4052	5110	33	7247	7,247
Puplinge	730,4	3,16896	59	58	30715	30,715
Russin	70,3	0,40872	10	9	6053	6,053
Satigny	809,25	3,6702	72	71	83551	83,551
Soral	1,6	0,02784	2	1	7423	7,423
Thônex	1001,2	5,47488	128	127	125652	125,652
Troinex			2	1	22403	22,403
Vandoeuvres	546,25	2,799	10925	62	36991	36,991
Vernier	1741,7	7,82808	34834	152	269333	269,333
Versoix	725,2	3,85248	14504	88	105607	105,607
Veyrier	67,1	1,14504	41	40	88852	88,852

3.1 Dashboard public, développement des sondes géothermiques verticales à faible profondeur « système fermé »

La Figure 28A représente le tableau de bord du développement de la géothermie à faible profondeur des systèmes fermés. Ces résultats représentent principalement un état des lieux actuel sur l'énergie géothermique dans le canton de Genève. Le tableau est composé de plusieurs éléments qui valorisent les résultats obtenus en Figure 28a.

La configuration établie permet au grand public un usage facile et une description du contenu du tableau à travers un volet latéral (1), un sélecteur de catégorie (2) « Commune » qui est configuré avec tous les éléments du tableau de bord. Il suffit de sélectionner une commune, et un zoom s'effectuera sur la commune au choix où sont visibles les champs de sondes du CTSS avec leurs sondes de référence GESDEC (Figure 29A). Les autres éléments du tableau interagissent aussi avec l'interface cartographique, tels que :

L'indicateur (3) qui indique le nombre de sondes total existant au sein de la commune par rapport au nombre total de sondes sur tout le canton qui est de 3222 sondes. La jauge (4) qui affiche le total mètre linéaire foré, ce qui correspond à la profondeur totale des sondes au sein d'une commune. Le diagramme à secteur (5) représente la part d'énergie géothermique produite par SGV et celle de la demande de chaleur utile en GWh/an. Il donne un aperçu de l'utilisation des énergies renouvelables et des énergies thermiques sur l'ensemble des communes genevoises.

Un autre élément appelé Fenêtre contextuelle (Figure 29. B), apparaît en sélectionnant le polygone de commune ou une sonde géothermique : elle affiche toutes les informations relatives à l'élément sélectionné. Le diagramme de série donne des valeurs d'énergies en GWh/an. Il permet de traduire le pourcentage d'énergie géothermique de chaque commune.

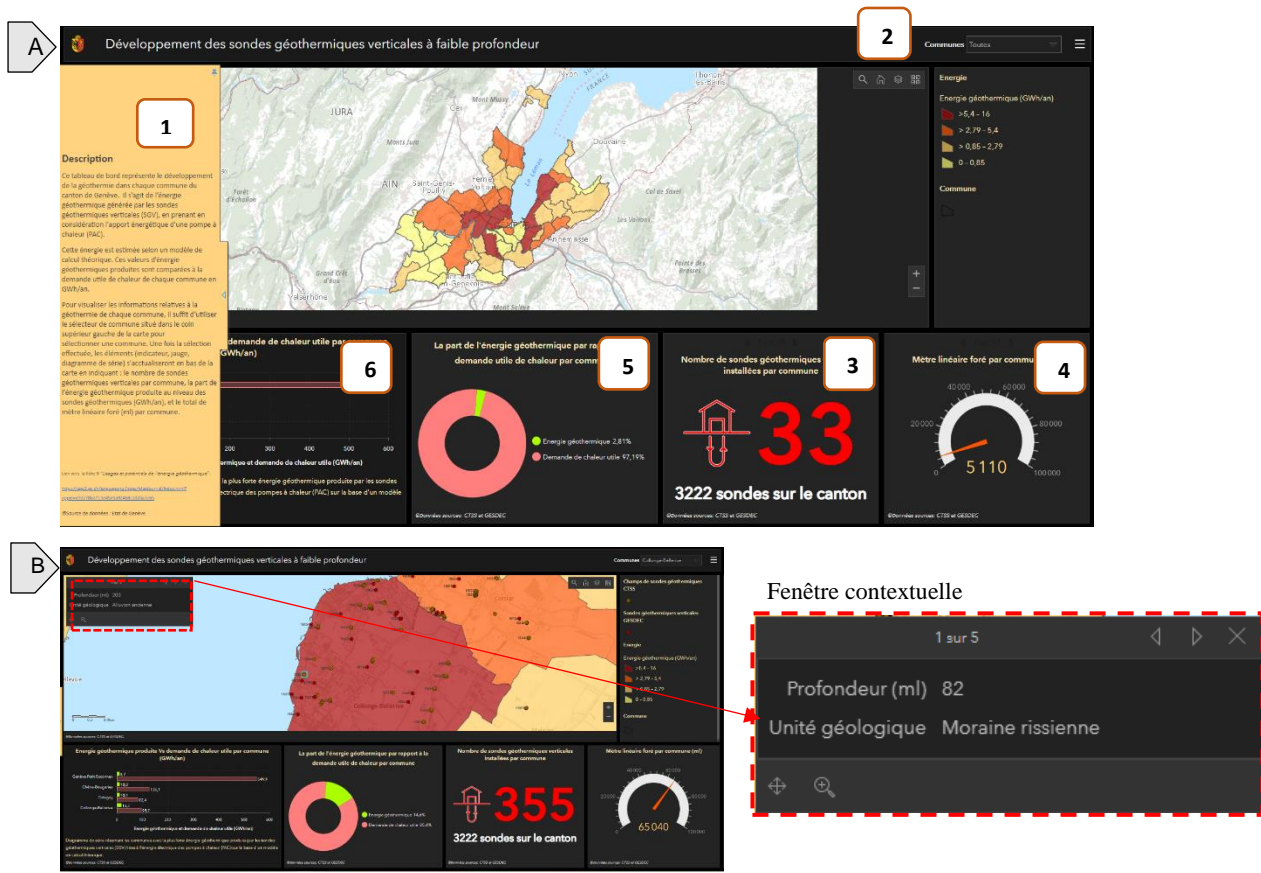


Figure 29. a). Dashboard du développement de la géothermie à faible profondeur des SGV dans le canton de Genève "système fermé". B). Capture d'écran de la fenêtre contextuelle.

3.2 Dashboard métier, Développement de la géothermie sur nappe d'eau souterraine

« système ouvert »

En ce qui concerne le Dashboard sur le développement de la géothermie sur nappe d'eau souterraine (Figure 29), il est destiné à l'usage interne en raison de la confidentialité des données. Avant d'effectuer toute opération sur l'outil, l'élément cartographique montre les différentes nappes souterraines du territoire genevois. Plus d'informations apparaîtront en sélectionnant l'installation géothermique via le sélecteur « Installation », et un zoom s'établira automatiquement et affichera plus de détails tels qu'un polygone qui délimite l'installation (doublet), où sont visibles les ouvrages installés (Pompage-injections) avec leur numéro de sondage ainsi que celui de la parcelle de terrain.

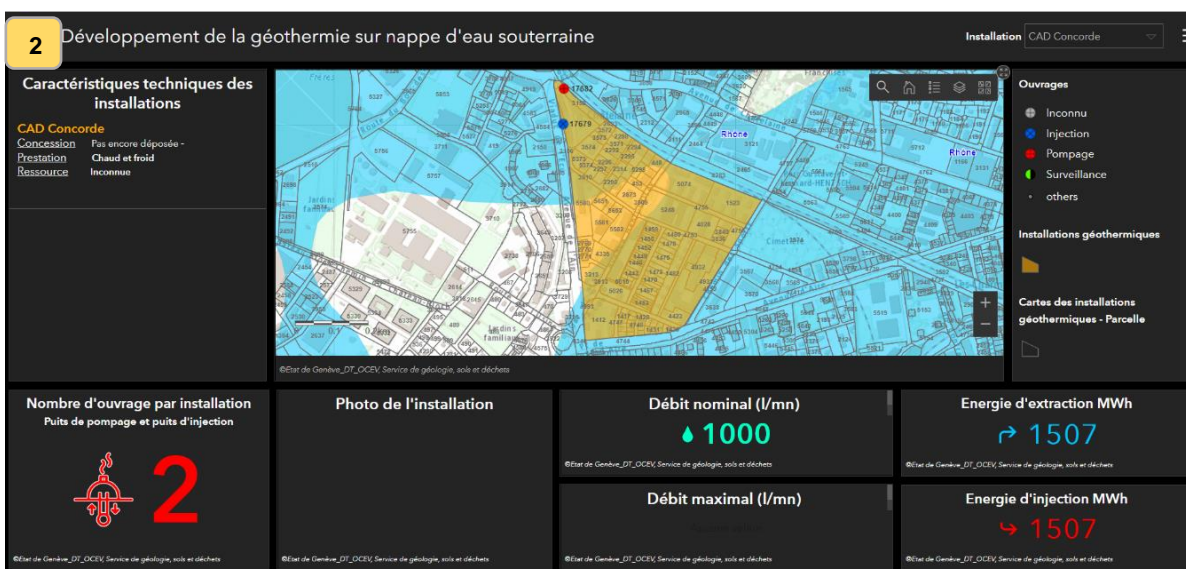
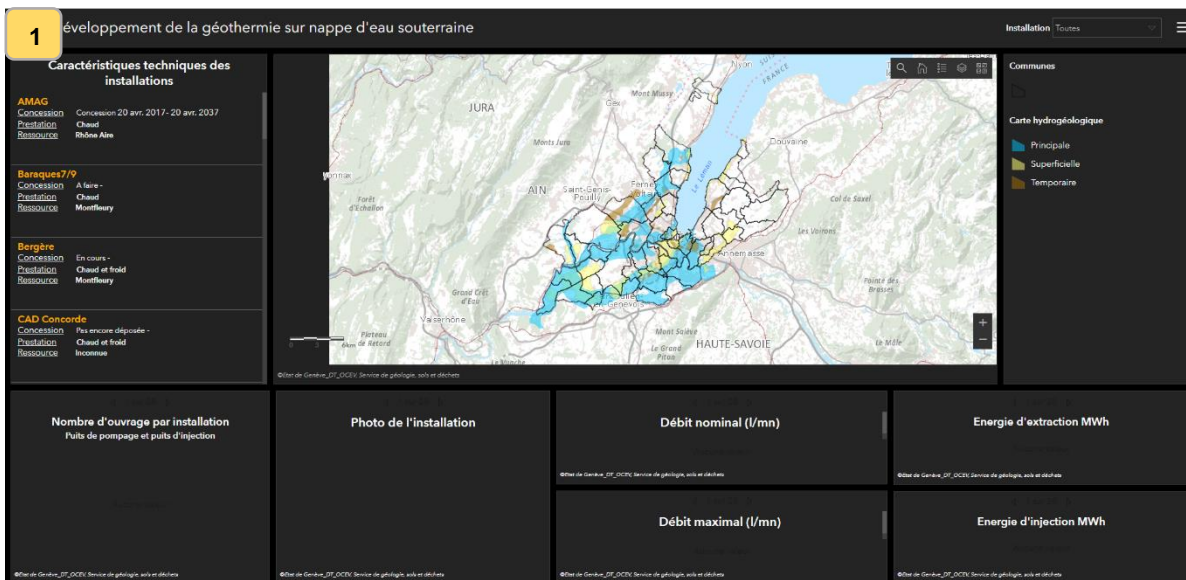


Figure 30. 1). Aperçu du Dashboard du développement de la géothermie sur nappe d'eau souterraine "Système ouvert". 2) Détail de visualisation du Dashboard après zoom avant de la carte.

Pour les utilisateurs internes, il s’agit d’une configuration simple qui fournit de nombreux détails et permet de suivre facilement et rapidement les projets des systèmes ouverts au niveau du canton de Genève. Certains indicateurs tels que le débit nominal et le débit maximal (l/mn) mais également les indicateurs des énergies d’extraction et d’injection (MWh) ne contiennent pas d’information, c’est pour cela que sur le Dashboard rien n’apparaît. Idem pour les photos d’installations : certaines d’entre elles ont été prises à partir du rapport « HYDRO_GEO environnement et énergie (REX) » et plusieurs installations géothermiques ne possèdent pas de photo (Figure 31). Une autre possibilité qu’offre ce Dashboard est qu’au lieu d’utiliser le sélecteur, il est possible d’utiliser le zoom avant de la carte et de voir les détails que contient l’installation : puits de pompages-d’injections et numéro de la parcelle.

Au fur et à mesure que le zoom augmente, tous les éléments configurés avec la carte apparaîtront, tandis que d'autres non, à cause de l'absence de données (Figure 30).

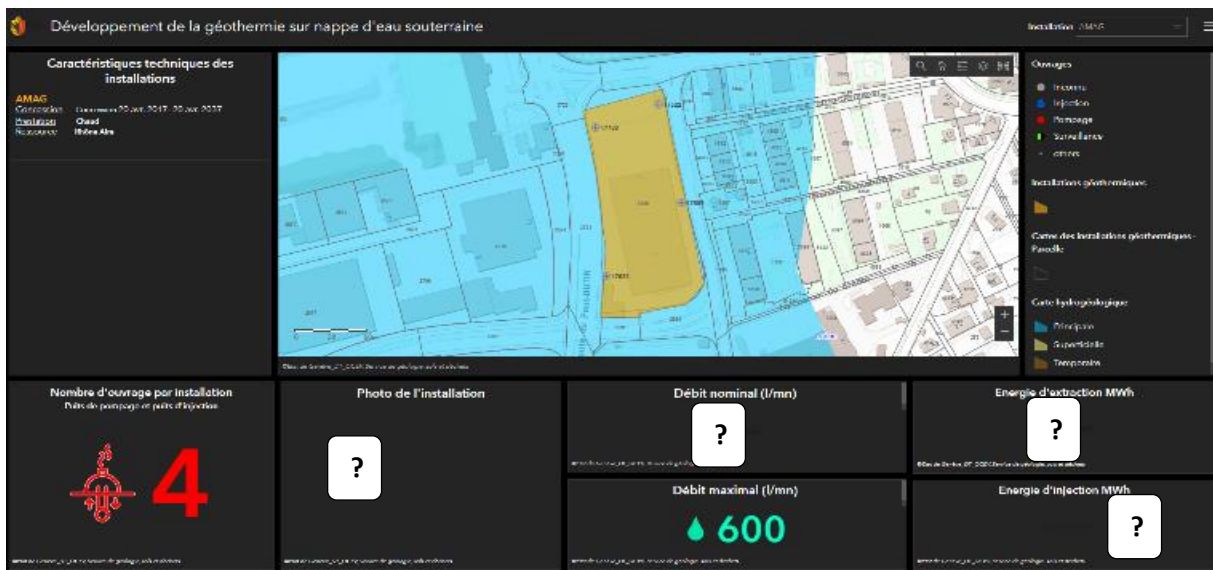
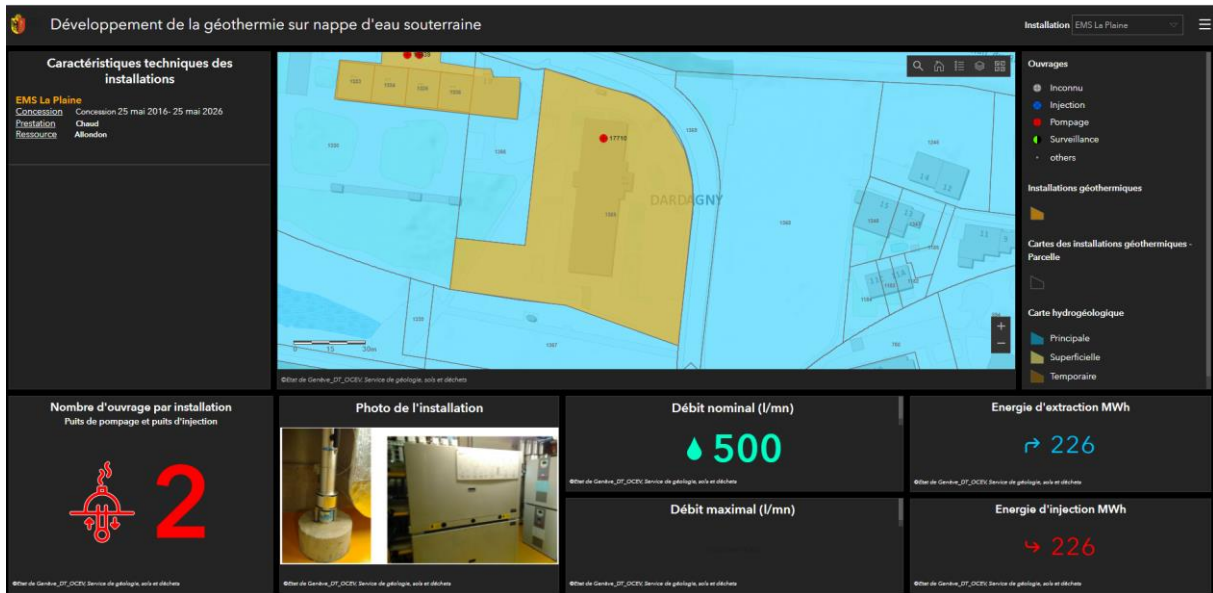


Figure 31. (En haut) le Dashboard montre une installation (EMS La Plaine) qui contient une photo. (En bas) Données manquantes au niveau d'une installation géothermique, exemple « AMAG ».

3.3 Story Maps

La Figure 32 montre un aperçu des Story Maps du modèle série qui combine les résultats des deux tableaux de bord obtenus ci-dessus sous le même thème de développement de la géothermie à faible profondeur dans le canton de Genève. Cela permet de placer les deux tableaux de bord dans deux onglets différents. Le premier appelé SGV est utilisé pour le tableau des systèmes fermés et le second appelé doublet est utilisé pour les systèmes ouverts. Le principe de visualisation du Dashboard ne change pas sur la story Maps c'est le même fonctionnement. Cette organisation de tableaux de bord au sein d'une story Maps permet aux utilisateurs un accès plus facile au contenu et leur évitera de chercher trop longtemps dans le contenu de la plateforme où les tableaux sont séparés.

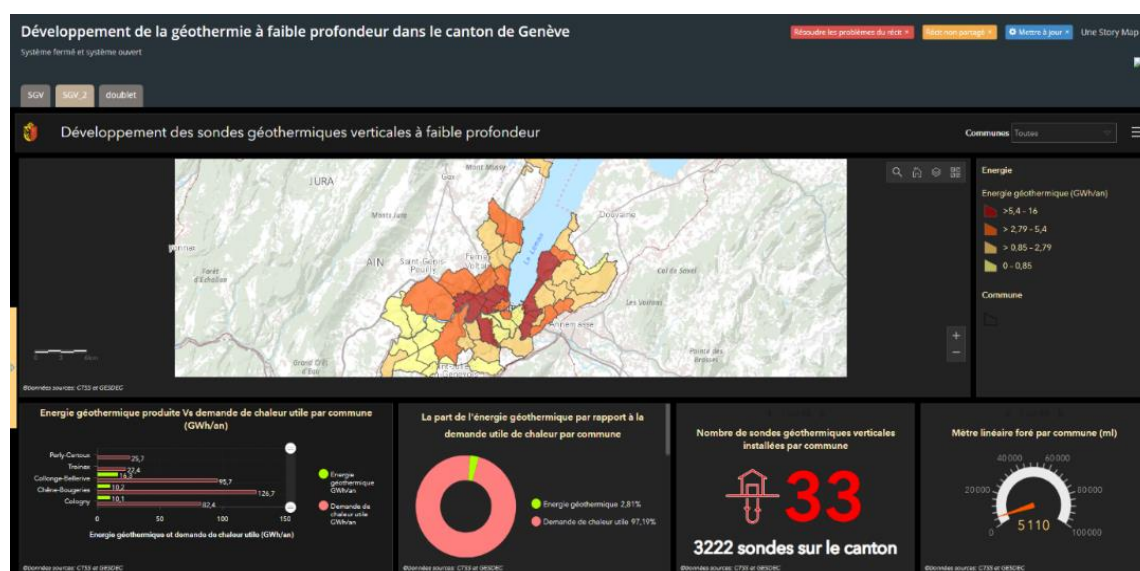
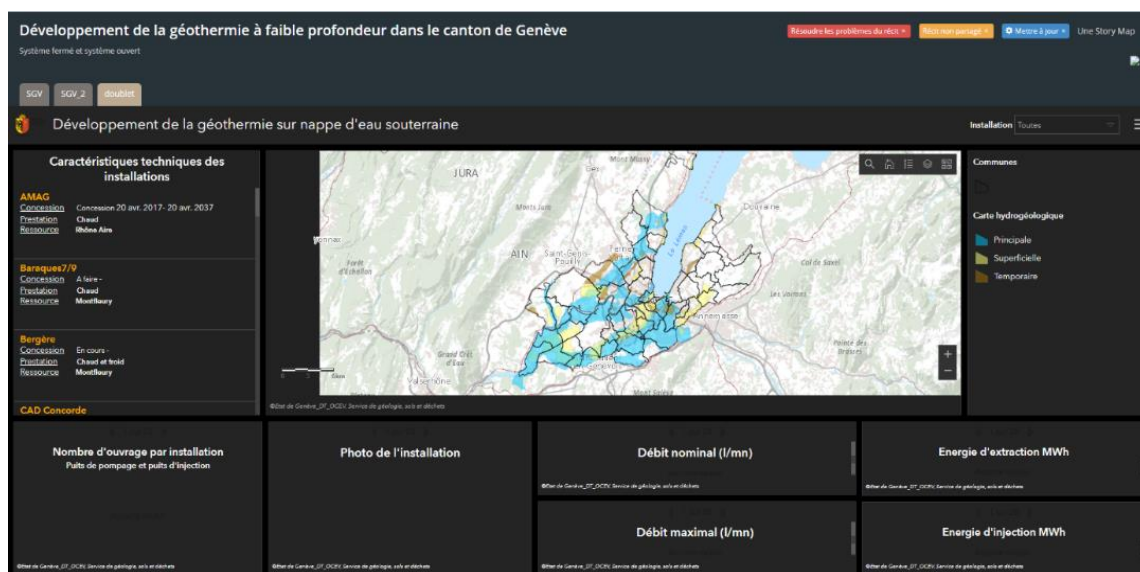


Figure 32. Aperçu de l'organisation de la story Maps de type série regroupant les résultats de Dashboard sous une même thématique. (En haut) onglet doublet « Dashboard des systèmes ouverts ». (En bas) onglet SVG « Dashboard des systèmes fermés ».

4 Discussion

Les résultats obtenus dans le chapitre 3 sont deux tableaux de bord, l'un pour les systèmes fermés et l'autre pour les systèmes ouverts. Ces Dashboard représentent une première approche réalisée pour la valorisation des données géothermiques du canton de Genève. De plus, ces résultats fournissent un premier aperçu de l'état actuel de la production géothermique, à partir des sondes géothermiques verticales et de la répartition des installations géothermiques de type doublet à travers le canton. C'est aussi l'occasion d'explorer les possibilités offertes par l'outil de visualisation « Dashboard » sur la plateforme ArcGIS.

Une méthode de géotraitement élaborée et la création de scripts Model-Builder a permis de répondre à la problématique de cette étude en s'adaptant à la qualité et à la quantité de données. Plusieurs jeux de données ainsi que des méthodes et des outils de géotraitement ont été testés sur les données géothermiques, avant de choisir les géodonnées et la méthode adéquate au projet. L'utilisation de deux sources de données (CTSS et GESDEC) a rendu le processus plus complexe, car la conception des attributs et les fichiers de base sont organisés et conçu de manière différente pour chaque source. Cela est probablement dû au fait, que l'organisation des fichiers de base de données répond au besoin interne de chaque organisation.

Toutefois, la méthode de géotraitement choisie pour le traitement des données de sondes géothermiques verticales SGV, aurait pu être plus simple, avec moins d'étapes, si le fichier du CTSS possédait les attributs et données suffisantes pour répondre directement à notre problématique. Cependant, du point de vue théorique, le fichier des sondes géothermique du CTSS est idéal pour cette étude. Car il contient presque tous les champs de sondes de chaque installation. En revanche, pour les systèmes ouverts, les données sont issues d'une seule source (SOLSTISS) : le géotraitement des données a donc été plus simple à réaliser, par rapport aux systèmes fermés.

Le choix de l'analyse spatiale des géodonnées à l'échelle de la commune est certainement le plus adapté pour traiter la question du développement de la géothermie dans le canton de Genève. Contrairement à une échelle plus grande (la parcelle), il est difficile de traiter la donnée à ce niveau, en raison du changement régulier des périmètres administratifs des parcelles. En revanche, il est nécessaire d'associer les informations des sondes géothermiques avec des informations complémentaires telles que la couche « Bâtiment » (voir chapitre 6). De plus, si l'étude se limite à la parcelle, il faudra plus de temps pour étudier chacune au niveau de tout le canton dans ce cas, il serait probablement mieux de se limiter à un périmètre donné (par ex., quartier).

La méthode exécutée pour ce projet a nécessité l'utilisation de deux scripts. Le premier est le script Model-Builder, car il présente une interface facile à utiliser et une méthode rapide pour synthétiser les étapes et outils utilisés pour la conversion de données. En revanche, ce script présente plusieurs limitations auxquelles le traitement de données a été confronté, tels que le problème de la perte du chemin des géodonnées à traiter et la difficulté d'exécuter toutes les étapes en un seul modèle, d'où la nécessité d'avoir subdivisé les étapes en plusieurs petits modèles allant de MB1 jusqu'à MB7. Au fur et à mesure du développement du projet et avec l'enchaînement de plusieurs étapes, Model-Builder devenait parfois difficile à exécuter même au niveau des petits modèles. Cela est parfois lié aux outils de la fenêtre catalogue que le modèle ne parvient pas à trouver ou à exécuter un ou plusieurs des outils utilisés ¹¹ dans le script model-Builder.

Le script FME étant le script le plus performant comparé à Model-Builder, il est l'idéal pour la réalisation d'un workflow et la transformation des données. Il prend en charge un vaste ensemble de données contrairement à Model-Builder qui ne prend que les données spatiales. Une partie du script FME a été générées avec le service DIT (Michel Terrond) pour la mise à jour des données du Dashboard (Section 2.1.3.3), qui a permis de se rendre compte du gain de temps et de précision que peut apporter le script FME par rapport à Model-Builder : il aurait fallu l'utiliser dès le début du géotraitement. Cependant, malgré sa performance. Model-Builder rend l'opération de réalisation de statistiques sur des valeurs nul ou inexistantes beaucoup plus simple que FME.

Les Dashboards obtenus (Chapitre 3) dressent l'état T₀ du développement de l'énergie géothermique dans le canton de Genève à travers les systèmes fermés ou ouverts. L'outil Dashboard est utilisé pour simplifier l'information et transmettre un message de façon rapide et directe, car un tableau contenant de grande quantité d'informations pourrait brouiller le message à transmettre. En raison du besoin interne pour le suivi des projets de chaque installation géothermique, le Dashboard des systèmes ouverts contient plus d'informations que celui des systèmes fermés. Malgré son contenu dense il reste simple et clair à l'utilisation. Outre la quantité d'information fournies sur le tableau, il convient de noter que la création de ce dernier nécessite un géotraitement poussé et une stratégie réfléchiée pour déterminer la structure du tableau, les objectifs et l'identification des indicateurs clés.

L'élément cartographique principal du tableau de bord des systèmes fermés ne contient qu'une seule information, la valeur de l'énergie géothermique, mais un zoom avant sur la carte permet de voir plus de détails. Pour des raisons inconnues, liées à l'outil de tableau de bord, un petit problème est survenu avec le seuil de zoom lors de la sélection de certaines communes, mais il suffit de zoomer sur la carte et les détails des sondes géothermiques apparaîtront.

¹¹ Esri_ArcGIS for Desktop: <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/analyze/modelbuilder/repairing-a-model.htm>

Une autre limitation très connue de cet outil concerne l'adaptation à la taille de l'écran. L'outil Dashboard ne s'adapte pas à toute taille d'écran. Les tableaux construits pour ce projet sont conçus sur un écran de 22 pouces et le passage à un écran (laptop) de 14 ou 15 pouces rend la visibilité médiocre. On pourrait également adapter ces Dashboards sur une tablette ou sur un mobile, mais il faudra utiliser une autre application appelée Expérience Builder¹² qui permet de recadrer le Dashboard en fonction de la taille de l'écran voulu en important l'Url des tableaux et qui les redimensionnera à la taille de l'écran mobile, mais avec moins de détails qu'un tableau édité sur PC¹³.

5 Conclusion

Le projet de ce stage est une première approche de la valorisation des données du sous-sol réalisée de façon dynamique différente de celle des cartes et base de données. Ainsi, il a été question d'aborder l'estimation de l'énergie géothermique au niveau des systèmes fermés et d'établir le recensement des systèmes ouverts implantés sur le territoire genevois.

La valorisation de ces géodonnées du sous-sol a été réalisée grâce à l'outil de visualisation « Dashboards » intégrant un élément cartographique principal, configuré avec d'autres éléments et indicateurs clés qui éclairent les paramètres essentiels du projet. Intégrer cet outil d'esri (Dashboards) au sein du GESDEC permettra aux acteurs de la géothermie d'avoir une vision différente des données géothermiques et de gagner davantage de temps, d'analyser et de suivre le développement de la géothermie dans le canton de Genève, et donne l'occasion au grand public de découvrir l'avancement de la stratégie d'énergie renouvelable qui prend de l'ampleur dans les différentes communes du territoire genevois.

Pour conclure : la mise en place du tableau de bord (traitement des données et construction des tableaux) a certes pris beaucoup de temps durant ce projet (6 mois). Mais une fois la conversion des données effectuées, il suffira simplement d'automatiser le script FME (section 2.4) afin de mettre à jour les données du tableau de bord. Cela permettra donc de facilement valoriser les données de manière continue et dynamique afin d'informer le public et de répondre aux besoins internes du GESDEC.

¹²Esri_Video: <https://www.esri.com/videos/watch?videoid=j-p8j2He5yc&title=make-your-dashboards-mobile-friendly>

¹³Esri_ArcGIS Dashboards: <https://doc.arcgis.com/fr/dashboards/reference/dashboards-on-your-smartphone.htm>

6 Perspectives et recommandations

Les données géothermiques illustrées dans les Dashboard créés ne sont représentatives que de la phase T0 du projet de la valorisation des données géothermiques du système d'information géographique du sous-sol. Cependant, à l'avenir, on pourrait encore développer plus le thème de l'énergie géothermique en faisant la part de ce qui est produit par l'énergie géothermique et la part de ce qui est produit par l'énergie fossile à grande échelle. Par exemple, la Figure 33 montre un immeuble où l'énergie utilisée pour le chauffage ne dépend pas à 100% de l'énergie géothermique (SGV) mais encore de l'énergie fossile.

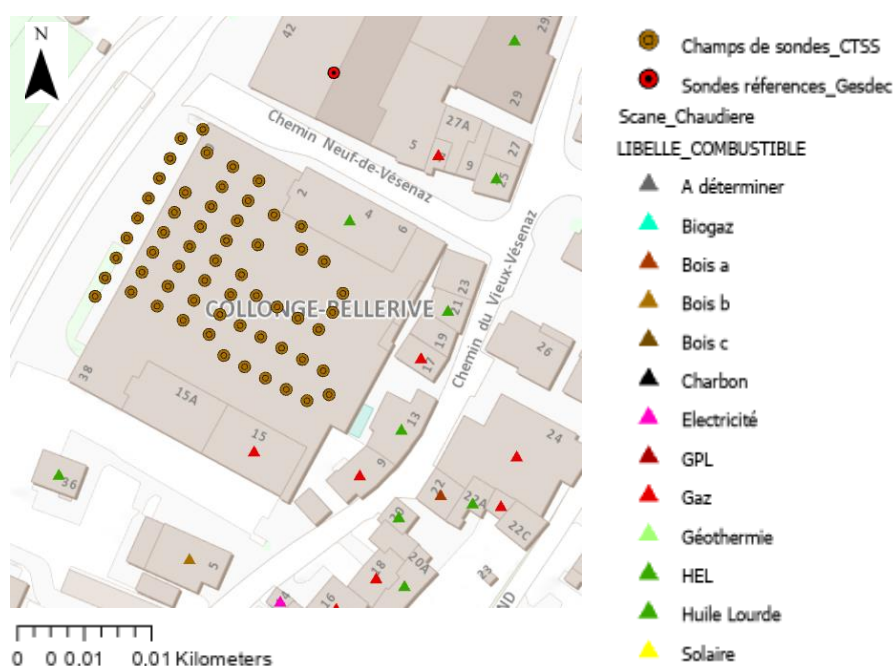


Figure 33. Dépendance d'un immeuble de plusieurs ressources d'énergie pour le chauffage : Sondes géothermiques verticales en champ de sondes (points en brun), Gaz (triangle en rouge), Huile lourde (triangle vert).

Il est possible d'estimer grossièrement la puissance en énergie géothermique (kW) et d'en déduire le nombre de sondes potentiellement présent sur les parcelles de terrains en recoupant les données de la couche des sondes géothermiques verticales (sondes de références) avec les données des deux couches suivantes : CAD_BATIMENT_HORD_SOL, et SITG_SCANE_CHAUDIERRE, qui contiennent les informations telles que n° EGID, IDC (Indice de dépense de chaleur), consommation de l'énergie en kWh, et SRE m² (surface de référence énergétique).

Un autre point envisageable est l'estimation de la part de l'énergie géothermique issue des systèmes fermés et celle issue des systèmes ouverts à l'échelle de la commune puis à grande échelle (Parcelle ou bâtiments) (Figure 34).

D'autre part, on pourrait aborder la question de l'énergie géothermique extraite (Pompage) par mois et par années au niveau de chaque installation géothermique de type doublet, dans le cas où les données sont transmises au GESDEC.

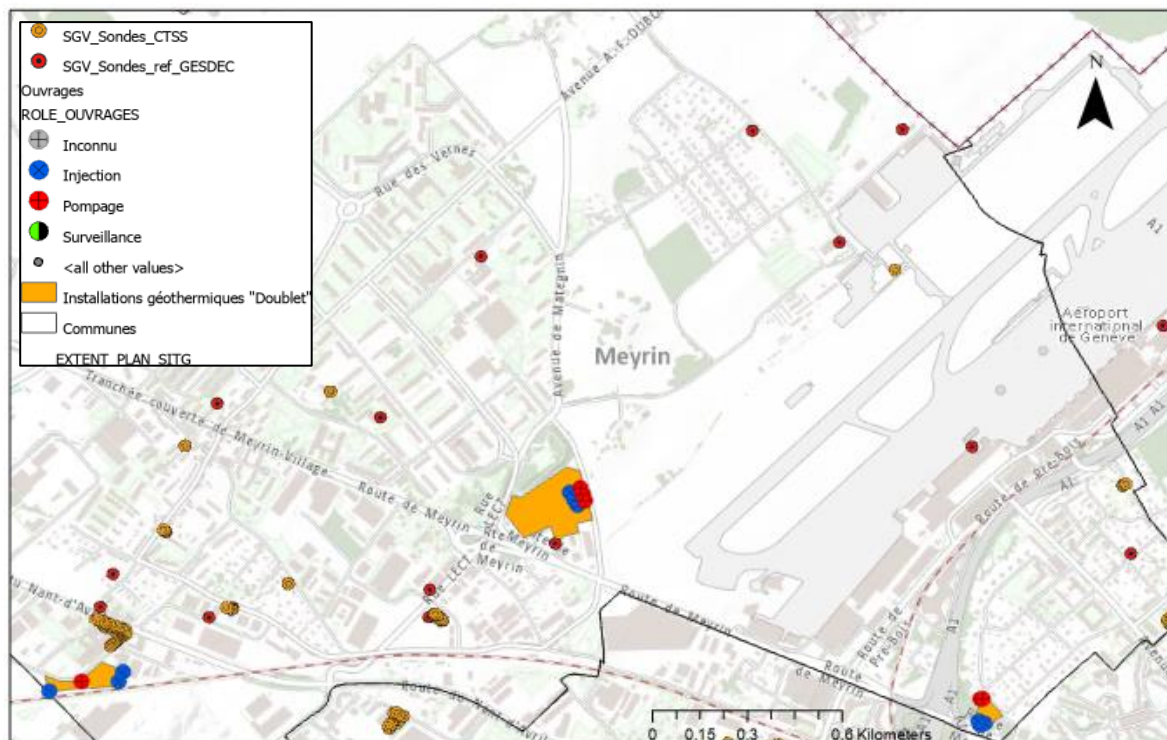


Figure 34. Répartition des systèmes de géothermie au niveau de la commune de Meyrin (système fermé et système ouvert).

Mis à part le thème sur l'estimation de l'énergie géothermique, d'autres perspectives peuvent être mises en évidence en publiant les Dashboards sur le site de GEothermies2020, ou en ajoutant une rubrique « Développement de la géothermie à faible profondeur dans le canton de Genève (Dashboards) » sous la rubrique « Ressource » de la story Maps de la fiche 9 sur le site de l'Etat¹⁴ (Figure 35). Cette rubrique résumera l'objectif des tableaux de bord et mettra en évidence le modèle théorique utilisé pour estimer l'énergie géothermique à partir des sondes géothermiques verticales. Ceci complétera la description de la rubrique « Ressource » qui parle des systèmes géothermiques existant dans le canton de Genève.

¹⁴ Fiche 9 Usages et potentiels de l'énergie géothermique.

<https://app2.ge.ch/tergeportal/apps/MapJournal/index.html?appid=d7d278b2713d45d9a924b8c1020a3eb5>

Retour au sommaire du PGR

Fiche 9 - Usages et potentiels de l'énergie géothermique

2.1 Ressource (offre)

Si un flux géothermique existe sur l'ensemble de la surface terrestre, toutes les conditions géologiques et hydrogéologiques ne sont pas équivalentes pour en profiter. En particulier, les paramètres suivants sont importants pour déterminer le potentiel d'une ressource :

- La **conductivité thermique** du sol est caractéristique de la capacité qu'aura le sol à transmettre la chaleur à un objet en son contact. C'est un paramètre particulièrement important pour les systèmes fermés : la longueur de sonde nécessaire pour répondre à un même besoin thermique sera faible dans un sous-sol très conducteur et élevée dans un sous-sol peu conducteur. La conductivité thermique varie en fonction des caractéristiques géologiques (les argiles, les graviers ou les roches n'ont par exemple pas la même conductivité), mais surtout de la présence ou de l'absence d'eau dans le sous-sol. Les sols saturés en eau étant sensiblement plus conducteurs que les sols secs. Une autre propriété thermique du sous-sol est sa **capacité thermique**, c'est-à-dire la quantité d'énergie qu'un volume donné de sol peut contenir. C'est notamment un paramètre important dans le cadre de projets faisant appel aux capacités de stockage du sous-sol.
- Pour les systèmes utilisant les eaux souterraines, les conditions hydrogéologiques sont déterminantes pour caractériser le potentiel de la ressource qui dépendra en particulier du débit pouvant être prélevé par un puits. La puissance thermique exploitée correspondant au produit du débit de la capacité calorifique de l'eau et de la différence de température entre le point de prélèvement et de réinjection. Les systèmes d'exploitation géothermique de puissance importante peuvent donc être réalisés dans des aquifères de bonne transmissivité, c'est-à-dire avec une

RESSOURCES (offre)

- Conductivité et capacité thermique
- Transmissivité des aquifères
- Température et profondeur

BESOIN ÉNERGÉTIQUE (demande)

- Type de besoin
- Puissance et énergie
- Système de distribution

PROJET GÉOTHERMIQUE

CONDITIONS DU MILIEU

- Protection de l'environnement
- Autres usages du sous-sol
- Risques

ÉCHANGEUR + PAC

Systèmes ouverts **Systèmes fermés**

2,1,1, Développement de la géothermie à faible profondeur dans le canton de Genève

Figure 35. Proposition de l'ajout de la rubrique « développement de la géothermie à faible » profondur dans le canton de Genève dans la story map de la fiche 9 « usage et potentiels de l'énergie géothermique ».

Des tableaux de bord supplémentaires liés à la thématique des SGV peuvent être envisagés et d'autres indicateurs développés pour enrichir le contenu des tableaux de bords, Par exemple les indicateurs « Puissance » en kWh/an et « Energie géothermique » en GWh/an dans le cas où un jour le GESDEC dispose de données de suivi qui permettent l'évaluation de la qualité des données. De plus, une réflexion sur des indicateurs clés qui pourrait montrer l'économie en termes de CO₂.

Cependant, une visualisation du développement de l'énergie géothermique dans le temps (par l'année de fin forage) à l'échelle de la commune pourrait faire l'objet d'un Dashboard secondaire lié au Dashboard du développement des sondes géothermiques verticales à faible profondeur, ce qui pourrait compléter et renforcer la valorisation des données et le développement de la géothermie par le biais des systèmes fermés.

Il est recommandé au niveau du CTSS de faire une révision du fichier « A_CTSS_CAD_CHAUFFAGE » pour l'automatisation des données du Dashboard des sondes géothermiques verticales via le script FME. Autrement, il est peut-être envisageable au niveau du GESDEC de reprendre les sondes géothermiques installées recensées à partir des relevés de sondage transmis et enregistrés dans le fichier du suivi des dossiers interne, et ce malgré la position spatiale méconnue des sondages.

Références

Boennec, 2008. Shallow ground energy systems, doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.57. Volume 161 Issue 2, May 2008, pp.57-61.

Cory A Kramer, 2013. An experiment investigation on performance of a model geothermal pile in sand (Master of Science). The Pennsylvania State University, The Graduate School, Department of Civil and Environmental Engineering. P 9-8.

FAVRE S.2018. Systèmes d'information pour les données géologiques 2D et 3D : Perspectives et limites pour l'analyse du sous-sol genevois et ses ressources, p12.

Pahud. Dr D, 2002. Geothermal Energy and Heat Storage, p 12.

Pahud. Dr D,1999. PILESIM – LASEN, Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Heat Exchanger Piles or Borehole Heat Exchangers. EPFL - LASEN, Switzerland, p1.

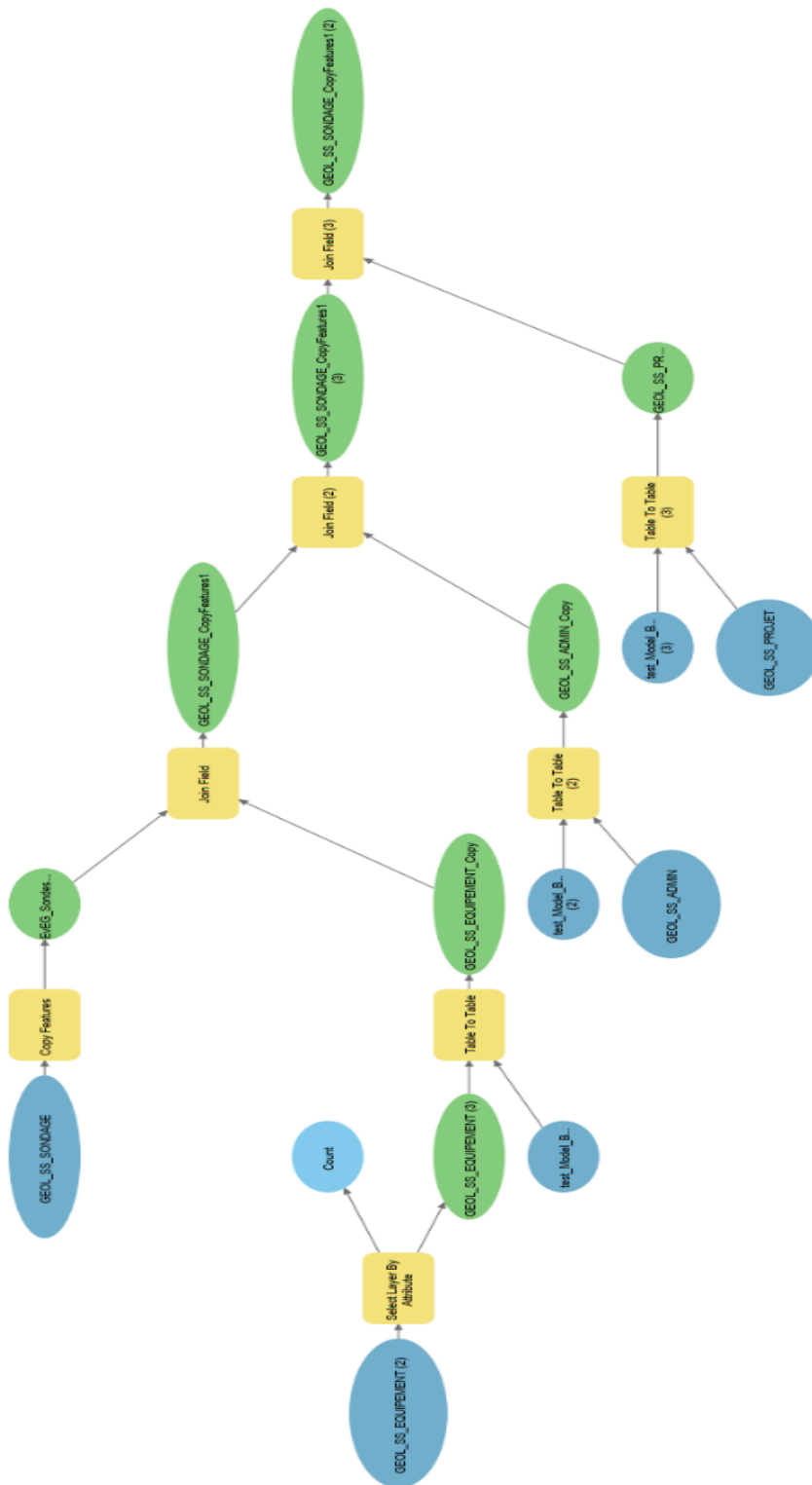
Pelletier. Zena, 2020. Operations Dashboard for ArcGIS. p8

Rapport du Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel Sondes géothermiques verticales : « Guide d'aide au dimensionnement des ouvrages de petite dimension et procédures d'autorisation dans le Canton de Neuchâtel ».

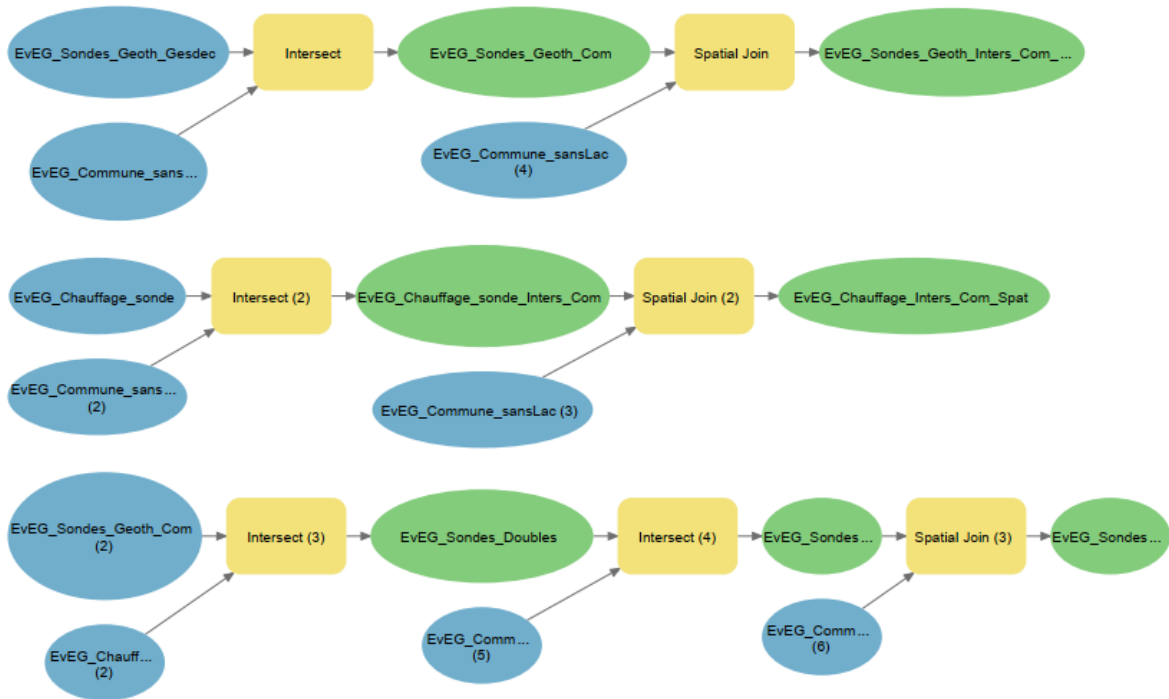
Groupement PDGN, Marc Affolter, Bernard Matthey Ingénieurs_Conseils S.A. p5-6.

Annexes

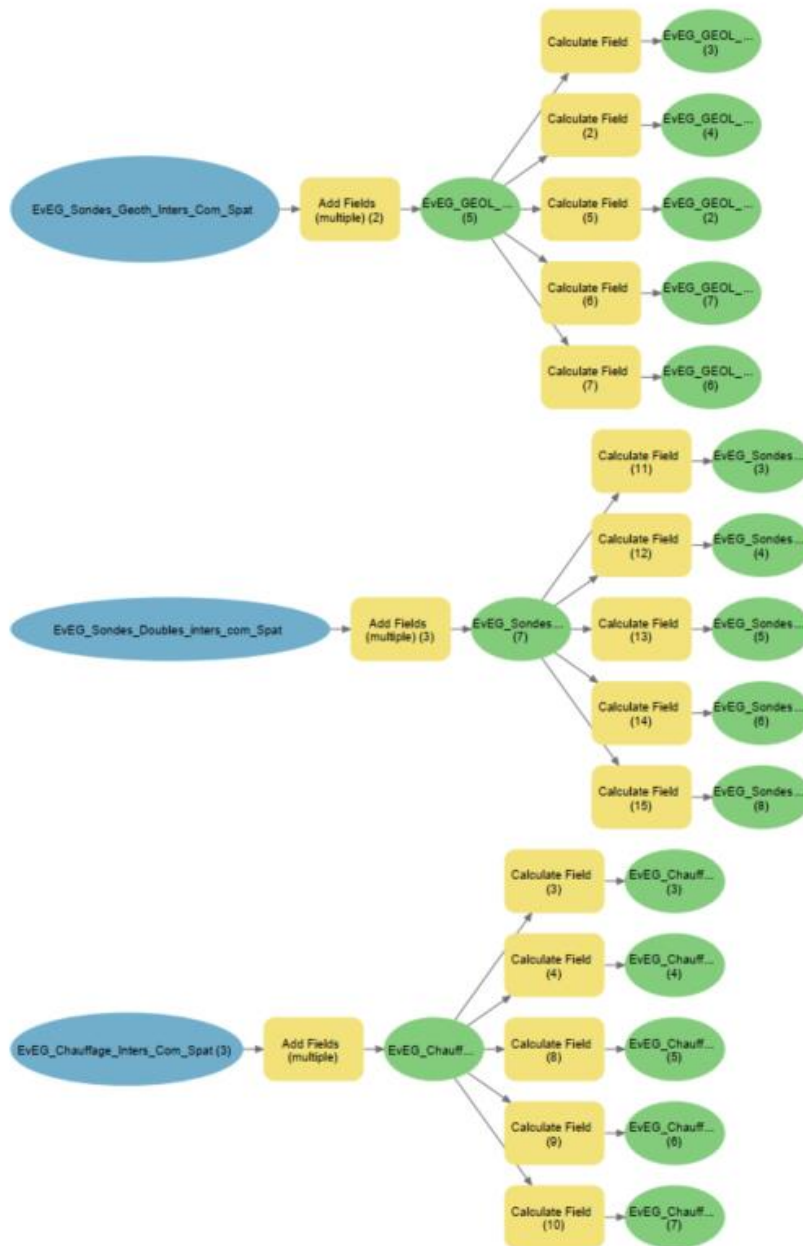
Annexe 1 : SGV_MB1 : Sélection des sondes géothermiques verticales et création d'une nouvelle couche



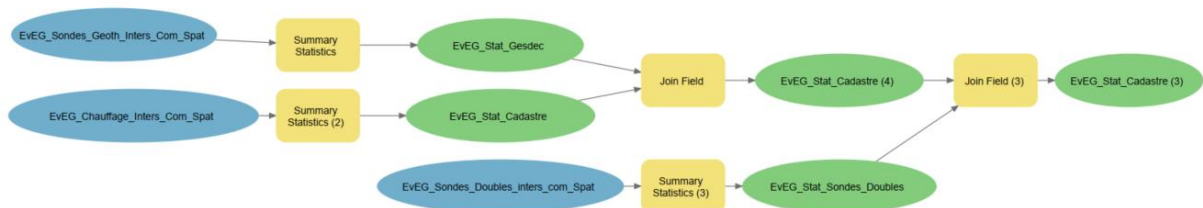
Annexe 2 : SGV_MB2 : Croisement des données CTSS & SOLSTISS et jointure spatiale



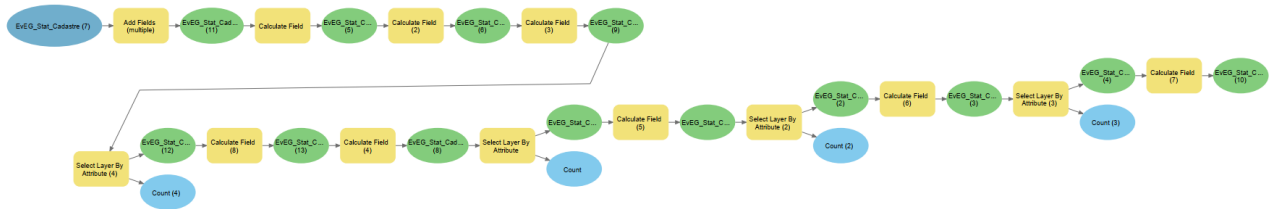
Annexe 3 : SGV_MB3 : Ajout et calcul d'attributs des nouveaux attributs



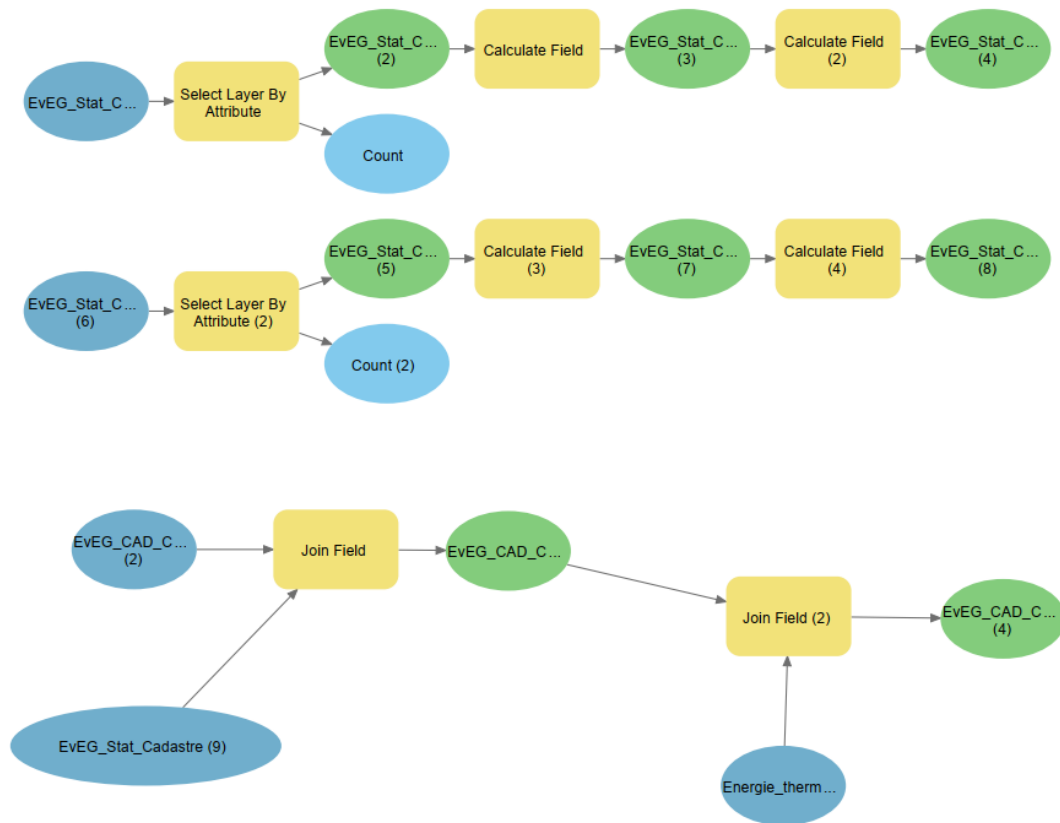
Annexe 4 : SGV_MB4 : Résumé statistique pour chaque couche de sortie



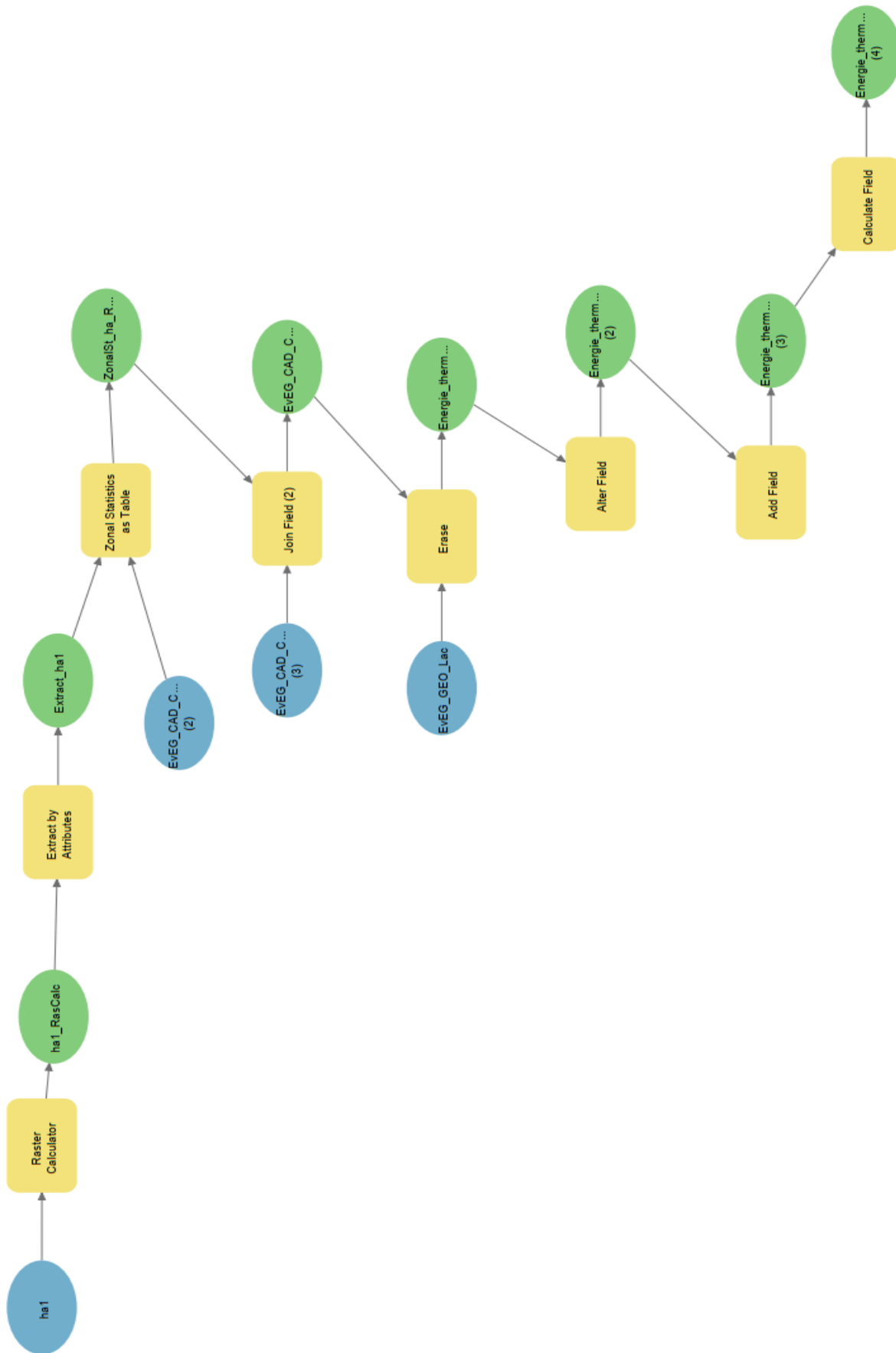
Annexe 5 : SGV_MB5 : Jointure des tables statistiques, addition et soustraction des attributs



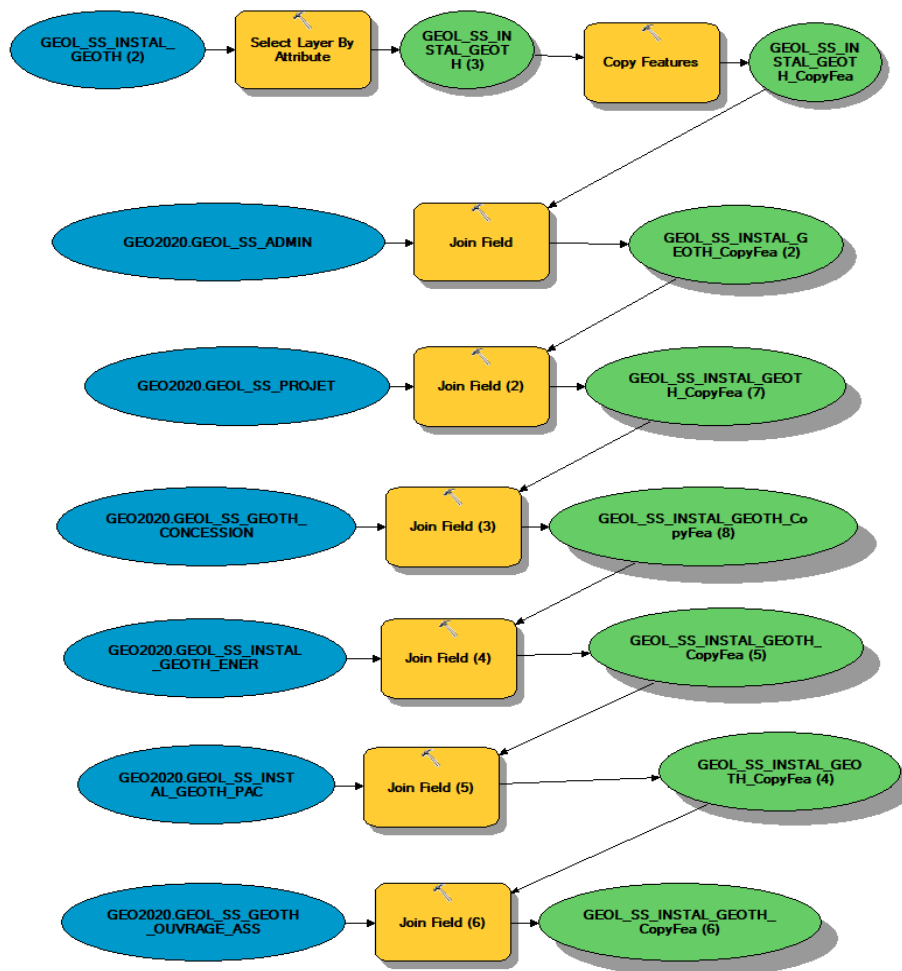
Annexe 6 : SGV_MB6 : Correction des communes ayant 0 sondes



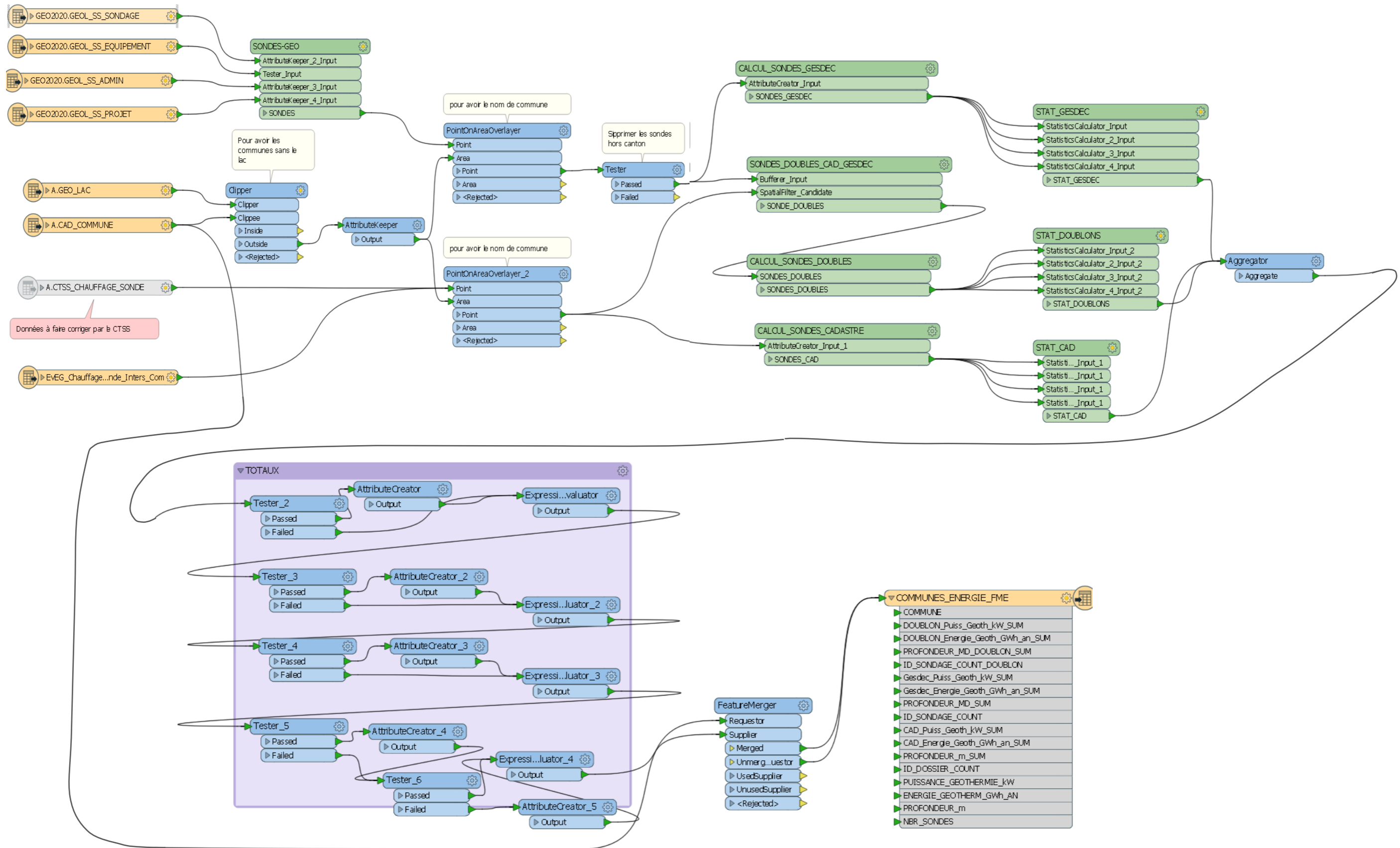
Annexe 7 : Traitement du fichier raster ha_1 : extraire les valeurs de demande de chaleur utile par commune



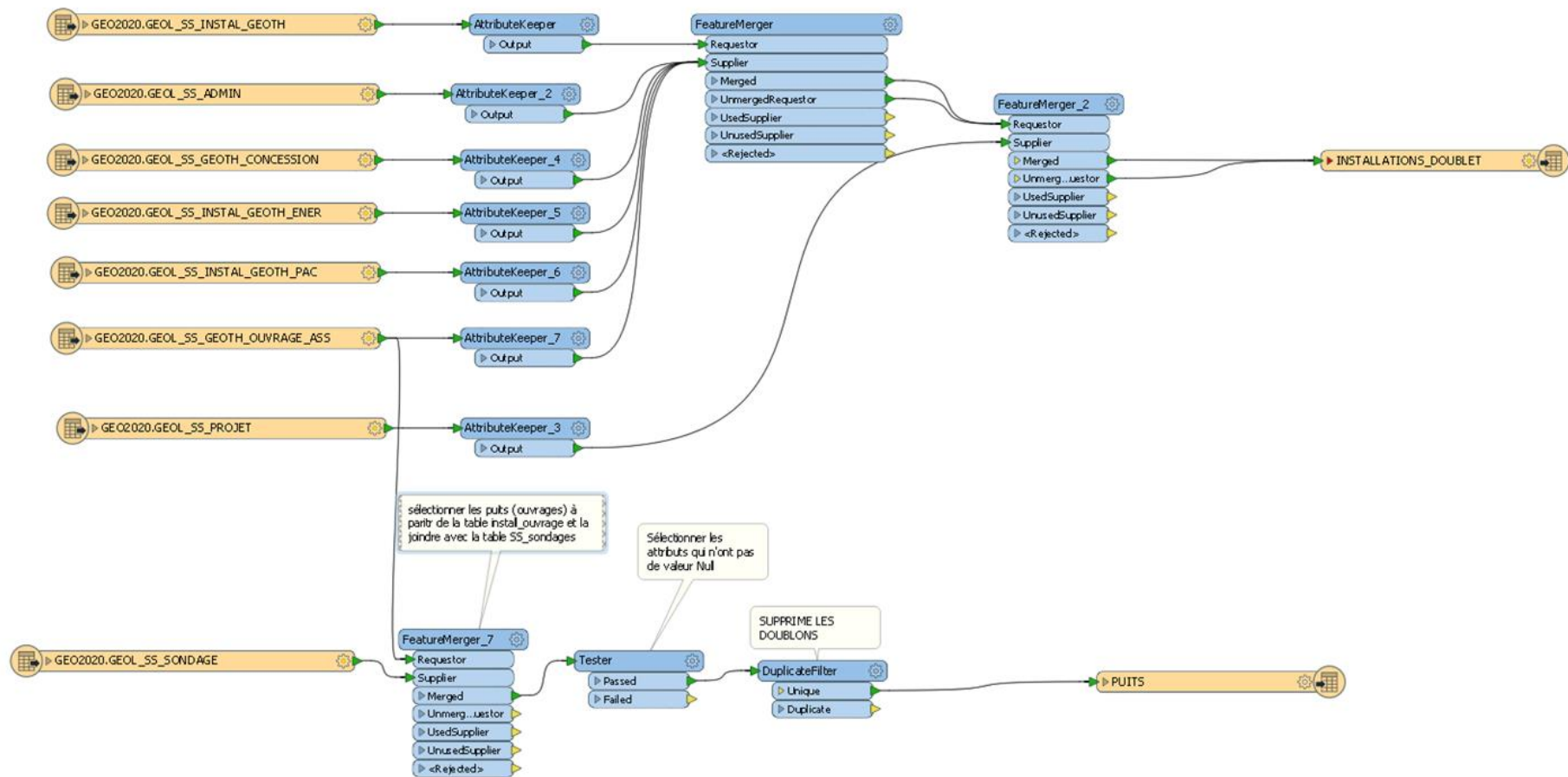
Annexe 8 : Script Model-Builder des installations géothermiques « doublet »



































Annexe 9 : Une partie du Script FME qui servira à l'automatisation du Dashboard des systèmes fermés (réaliser par la DIT Michel Terrond).



Annexe 10 : Une partie du Script FME qui servira à l'automatisation du Dashboard des systèmes ouverts (réaliser par la DIT Michel Terrond).



Annexe 11 : Capture d'écran de la fenêtre du contenu dans le portail cartographique de l'Etat de Genève.

<input type="checkbox"/>	 Développement de la géothermie dans le canton de Genève-Système fermé	Dashboard		☆ ...	19 janv. 2022
<input type="checkbox"/>	 Développement de la géothermie dans le canton de Genève-Système ouvert	Dashboard		☆ ...	19 janv. 2022
<input type="checkbox"/>	 Répartition des installations géothermiques	Feature Layer (hébergé)		☆ ...	19 janv. 2022
<input type="checkbox"/>	 Estimation de l'énergie des sondes géothermiques verticales	Feature Layer (hébergé)		☆ ...	19 janv. 2022
<input type="checkbox"/>	 Story Maps: Développement de la géothermie à faible profondeur dans le canton de Genève	Web Mapping Application		☆ ...	17 janv. 2022
<input type="checkbox"/>	 Développement de la géothermie dans le canton de Genève-Système fermé_ Diagramme série dynamique	Dashboard		☆ ...	2 janv. 2022
<input type="checkbox"/>	 Développement de la géothermiques dans le canton de Genève-Système Ouvert	Web Map		☆ ...	1 déc. 2021
<input type="checkbox"/>	 Développement de la géothermie dans le canton de Genève_Système fermé	Web Map		☆ ...	30 nov. 2021
<input type="checkbox"/>	 Energie_géothermique_SGV	Service Definition		☆ ...	29 nov. 2021
<input type="checkbox"/>	 Cartes des installations géothermiques	Service Definition		☆ ...	24 nov. 2021
<input type="checkbox"/>	 DOUBLET_Villa individuelle_Chancy	Image		☆ ...	16 nov. 2021
<input type="checkbox"/>	 DOUBLET_Logements_LaPlaine	Image		☆ ...	16 nov. 2021
<input type="checkbox"/>	 DOUBLET_Locatif et restaurant_Chancy	Image		☆ ...	16 nov. 2021
<input type="checkbox"/>	 DOUBLET_Jargonnant_EauxVive	Image		☆ ...	16 nov. 2021
<input type="checkbox"/>	 DOUBLET_EMS_residence	Image		☆ ...	16 nov. 2021
<input type="checkbox"/>	 DOUBLET_Edinfondo_ZIBoisDeBay_Satiny	Image		☆ ...	16 nov. 2021