

# The Urban Heat Island Effect in the Canton Valais: from open geo-data to mitigation scenarios

Yoan Codjia

24 juin 2025

## Résumé

Ce rapport présente une analyse approfondie de l'effet d'îlot de chaleur urbain (UHI) dans les villes de Monthey et Conthey, situées dans le canton du Valais. En utilisant des simulations réalisées avec CitySim, plusieurs scénarios d'atténuation ont été étudiés pour l'année 2050, incluant l'ajout d'espaces végétalisés, l'installation de bâches ombragées et une combinaison de ces deux approches. Les résultats démontrent une augmentation marquée des températures ressenties durant les mois d'été, soulignant l'urgence d'adopter des solutions efficaces pour améliorer le confort thermique urbain. Parmi les stratégies évaluées, la combinaison vegetalisation-bâches ressort comme la plus efficace, permettant une réduction significative des pics de chaleur. Ces résultats fournissent une base solide pour orienter les futures politiques urbaines face au changement climatique.

## 1 Introduction

Le réchauffement climatique et l'urbanisation croissante rendent les villes de plus en plus vulnérables aux vagues de chaleur. L'effet d'îlot de chaleur urbain (UHI) correspond à une augmentation locale des températures dans les zones densément urbanisées, principalement en raison des matériaux de construction, du manque de végétation et de l'activité humaine.

Dans le contexte du canton du Valais, cette problématique est d'autant plus pertinente que la région connaît des étés de plus en plus chauds et secs. En effet, même en milieu montagneux, on observe de plus en plus fréquemment des îlots de chaleur d'altitude, un phénomène localisé qui se manifeste lorsque certaines zones construites et fortement exposées présentent des températures nettement plus élevées que leur environnement naturel dans des conditions normales. Ces microclimats chauds apparaissent notamment en été, lorsque l'ensoleillement intense, le sol sec et l'absence d'ombrage accentuent l'accumulation de chaleur dans les matériaux minéraux. Ce phénomène est aggravé par des épisodes de sécheresse de plus en plus fréquents et un recul général de la végétation. Tout ça limite la capacité de rafraîchissement naturel par évapotranspiration. Ainsi, même les zones traditionnellement perçues comme tempérées en altitude deviennent vulnérables aux vagues de chaleur. Par exemple, l'année 2024 a été la troisième année la plus chaude enregistrée en Suisse, avec un écart de +1,4 °C par rapport à la norme 1991–2020[1]. Des localités valaisannes comme Sion ont connu des anomalies de température de +1 °C, tandis que des stations en montagnes telles que Château-d'Oex ont enregistré des augmentations allant jusqu'à +1,8 °C.

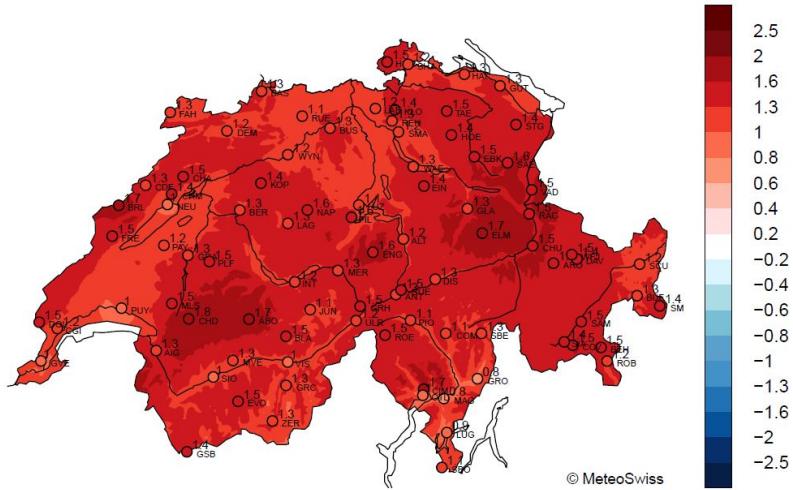


FIGURE 1 – Évolution des températures estivales dans le canton du Valais

De plus, les projections indiquent une diminution des précipitations estivales de 5 à 20 % d'ici 2060, ce qui accentuera les périodes de sécheresse et l'effet des îlots de chaleur urbains [2].

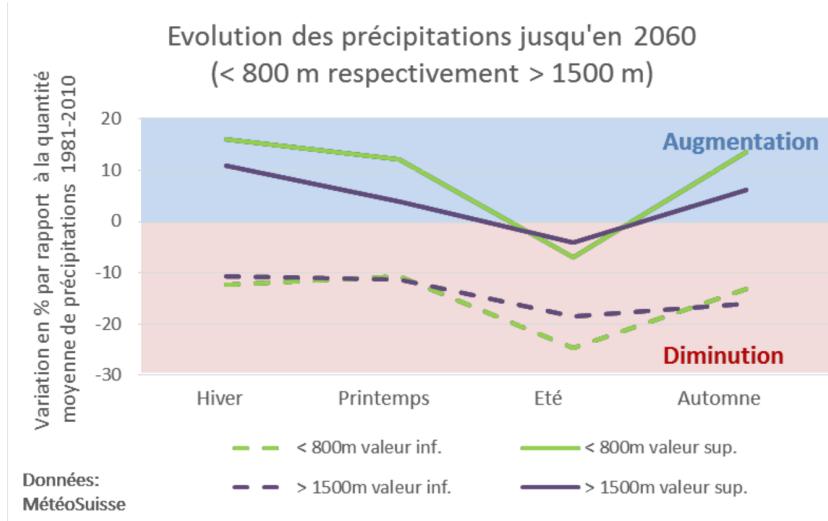


FIGURE 2 – Évolution des précipitations jusqu'en 2060

Face à ces constats préoccupants plusieurs communes ont commencé à mettre en place des solutions pour mieux supporter les vagues de chaleur à venir. L'objectif est de rendre les villes et les villages plus agréables pendant les vagues de chaleur tout en limitant les effets de l'îlot de chaleur. Cela passe par la plantation d'arbres dans les rues, la création de nouveaux parcs, ou la transformation de petits espaces vides en zones vertes. À Genève par exemple, la stratégie « Ville fraîche » a permis de planter plus de 2500 arbres entre 2018 et 2022 pour rafraîchir certains quartiers[3].

Une autre solution consiste à changer les matériaux utilisés pour le sol. Les routes et trottoirs sombres absorbent la chaleur et la relâchent lentement pendant la nuit. En utilisant des matériaux plus clairs ou en rendant certaines surfaces perméables, comme avec du gazon, on limite l'échauffement et on aide l'eau de pluie à s'infiltrer dans le sol. Ce type d'aménagement a été testé à Bâle ou à Zurich dans le cadre de projets pilotes soutenus par la Confédération[4].

Dans certaines zones très minérales, où il n'est pas possible de planter des arbres facilement, des structures légères sont installées pour créer de l'ombre. Cela peut être des bâches tendues entre les bâtiments des toiles au-dessus des places publiques comme on peut en voir dans des villes du sud comme Marrakech. Ces aménagements simples peuvent améliorer considérablement le confort des habitants, surtout en journée.

Dans cette optique, ce projet de semestre intitulé « *The Urban Heat Island Effect in the Canton Valais : from open geo-data to mitigation scenarios* » a plusieurs objectifs précis :

- Quantifier l'intensité et l'étendue des effets d'îlot de chaleur urbain dans différentes configurations urbaines du canton.
- Évaluer l'efficacité relative des stratégies d'atténuation telles que la végétalisation urbaine, les espaces piétonniers végétalisés et l'installation de structures d'ombrage.
- Formuler des recommandations concrètes et adaptées aux divers contextes urbains et montagnards du canton.

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie structurée a été adoptée, basée sur des outils open-source, des données ouvertes suisses et des plateformes de simulation avancées. Parmi ces outils figurent :

- **QGIS**, logiciel de système d'information géographique (SIG), qui permet la gestion, l'analyse spatiale, et la structuration des données géospatiales nécessaires au projet.
- **Python**, langage de programmation utilisé pour automatiser la génération des fichiers XML exploitables par CitySim Pro à partir de données géospatiales, permettant ainsi un traitement efficace des données.
- **CitySim Pro**, un logiciel développé pour modéliser et simuler les interactions thermiques urbaines à haute résolution spatiale et temporelle. CitySim permet notamment de simuler les échanges énergétiques entre bâtiments, végétation et revêtements urbains, fournissant ainsi une analyse précise de l'impact thermique des aménagements mis en place. Les résultats sont par la suite exportés sous forme de fichier .tsv qui seront traiter à l'aide de Pandas ou de Excel.

Par ailleurs, les données géospatiales exploitées proviennent principalement de sources ouvertes suisses, garantissant la transparence et la reproductibilité du projet. Ces jeux de données incluent :

- **SwissBuildings3D** (swisstopo) : informations géométriques sur les bâtiments en 3D.
- **SwissAlti3D** (swisstopo) : données topographiques précises du terrain.
- **SwissTLM3D** (swisstopo) : données détaillées sur les types de revêtements et d'occupation du sol.
- **Registre fédéral des bâtiments et logements (RegBL)** : informations détaillées sur les bâtiments, incluant leur date de construction et d'autres informations complémentaires.
- **Fichiers climatiques annuels (.cli)** : données horaires utilisées par CitySim pour simuler des conditions météorologiques réalistes.

Deux cas d'études représentatifs ont été sélectionnés pour cette analyse : la ville de Monthey, zone dense et fortement minéralisée située en plaine, particulièrement exposée à l'effet UHI, et la commune de Conthey, plus dispersée et située en moyenne montagne, soumise à d'autres contraintes climatiques telles qu'un ensoleillement élevé et une sécheresse accrue en été.

Enfin, plusieurs scénarios d'atténuation ont été élaborés afin de tester leur efficacité à réduire l'impact thermique des îlots de chaleur urbains. Parmi ces scénarios figurent

l'introduction d'arbres et de zones végétalisées, et l'ajout d'éléments d'ombrage artificiels tels que des bâches et des parapluies.

Ce rapport présente donc une démarche intégrative, allant de la collecte et préparation des données géospatiales, en passant par la modélisation urbaine automatisée en Python, jusqu'à la simulation thermique sous CitySim. L'objectif final est de fournir aux décideurs locaux des solutions concrètes, quantitativement validées, pour atténuer les effets négatifs du réchauffement urbain dans le canton du Valais.

## 2 Méthodologie

La méthodologie suivie dans ce projet est structurée en plusieurs étapes, allant de la collecte de données à la préparation des simulations. Chaque étape repose sur l'utilisation d'outils open-source et de plateformes spécialisées telles que CitySim Pro.

L'objectif final est de transformer les données géospatiales de notre zone d'étude, préparées dans QGIS, en un fichier .xml compatible avec CitySim Pro. Pour cela l'utilisation de Python est importante pour lire et structurer ces données automatiquement. Ce fichier .xml constitue la base sur laquelle seront lancées les différentes simulations d'îlots de chaleur et de scénarios d'aménagement.

### 2.1 Choix des cas d'étude

Dans le but de comparer l'effet d'îlot de chaleur urbain dans deux cas différents, deux zones représentatives mais très différentes du canton du Valais ont été sélectionnées :

- **Monthey** : une zone urbaine dense située en plaine, qu'on peut observer sur la Figure 3



FIGURE 3 – Vision satellite de la zone étudiée à Monthezy

- **Conthey** : une zone résidentielle plus dispersée, située en zone de moyenne montagne qu'on peut observer sur la Figure 4



FIGURE 4 – Vision satellite de la zone étudiée à Conthey

Le choix de ces deux cas repose sur leur opposition en termes de densité urbaine de leur topographie. Cette complémentarité est essentielle pour comprendre comment l'environnement bâti influence la formation et l'intensité des îlots de chaleur urbains (UHI).

Monthey est très densément construite et minéralisée. Elle représente un contexte typique où l'UHI est fortement marqué : les matériaux absorbent la chaleur le jour et la restituent lentement la nuit, la circulation de l'air est réduite, et l'absence d'ombrage naturel participe à l'inconfort thermique.

À l'inverse, Conthey offre un cadre plus ouvert avec plus d'espaces végétalisés et un microclimat influencé par l'altitude. Cette zone, bien que moins sujette à un effet UHI classique, présente d'autres contraintes : des étés plus secs, un ensoleillement intense et un besoin accru d'ombrage dans des zones peu urbanisées mais très exposées.

Comparer ces deux milieux permet non seulement de mesurer l'effet de l'UHI dans des contextes très différents, mais aussi de tester la flexibilité des solutions d'atténuation. Certaines stratégies comme l'ajout d'arbres ou la modification des matériaux de sol peuvent se révéler efficaces en plaine mais peu pertinentes en altitude et inversement.

En modélisant à la fois une zone très construite et une zone plus aérée et montagneuse nous élargissons la portée de l'analyse. Cela permet d'identifier les leviers d'action les plus adaptés à chaque configuration, et ainsi de fournir des recommandations ciblées aux communes valaisannes, qui présentent une grande diversité de situations urbaines.

## 2.2 Définition des scénarios d’atténuation

Une fois le modèle de base généré, plusieurs scénarios d’aménagement ont été définis afin d’évaluer l’impact de différentes stratégies de réduction de l’effet d’îlot de chaleur urbain (UHI). Chaque scénario modifie la scène urbaine d’origine en ciblant des leviers précis : végétalisation, création de zones piétonnes, ou ajout d’ombrage.

1. **Scénario 1 – Baseline** : Ce scénario représente la configuration urbaine actuelle, sans aucune transformation. Il sert de point de référence pour mesurer les effets relatifs des scénarios d’atténuation. L’objectif est de quantifier l’impact réel des interventions en comparant leur performance thermique à celle du statu quo.
2. **Scénario 2 – Ajout d’arbres et végétalisation** : Ce scénario introduit des arbres supplémentaires dans des zones urbaines minérales : bords de route, places, parkings ou esplanades. On y introduit également des zones vertes comme de la pelouse ou des plantes pour réduire l’absorption de chaleur.
3. **Scénario 3 – Zones d’ombrage** : Ce scénario explore l’ajout de structures légères d’ombrage artificiel, comme des bâches tendues (**tarps**) ou des parapluies, dans des lieux fortement exposés au rayonnement solaire (places publiques, allées minérales, zones piétonnes).

Dans les milieux urbains denses comme les médinas du Maghreb, ces dispositifs sont déjà utilisés de manière empirique. À Marrakech par exemple, les bâches tendues dans les souks servent à :

- créer de l’ombre dans les ruelles étroites peu ventilées,
- offrir un confort thermique aux commerçants et visiteurs,

Une inspiration complémentaire provient du projet artistique d’Agueda (Portugal), où des parapluies suspendus créent des zones ombragées tout en apportant une dimension esthétique. Ces structures peuvent être pensées comme simple et peu coûteuses à déployer. La Figure 5 nous montre ce projet artistique.



FIGURE 5 – Les parapluies d’Agueda au Portugal

À plus long terme, ces installations pourraient aussi être valorisées énergétiquement : en zones rurales ou montagneuses, l’installation de grandes bâches blanches (réfléchissantes) pourrait servir à la fois d’ombrage et de support pour des panneaux photovoltaïques, optimisant ainsi l’occupation du sol.

4. **Scénario 4 – Scénario combiné** : Ce scénario rassemble tous les leviers précédents : ajout d'arbres et zones végétalisées, et installation d'éléments d'ombrage artificiel. Il permet de simuler un aménagement urbain ambitieux et coordonné, maximisant le potentiel d'atténuation de l'UHI.

Toutes ces transformations sont intégrées dans la scène CitySim via des fonctions Python dédiées.

## 2.3 Collecte et évaluation des données géospatiales

La première étape du projet a consisté à identifier et rassembler les données géospatiales nécessaires à la simulation de l'effet d'îlot de chaleur urbain (UHI). Les données ont été sélectionnées en fonction de leur disponibilité en open-source et de leur niveau de précision. L'ensemble des données a été structuré et intégré dans des fichiers **GeoPackage** afin de manipuler ces données depuis QGIS.

— **SwissBuildings3D** (Office fédéral de topographie swisstopo) : Il s'agit d'un jeu de données vectorielles 3D représentant les bâtiments suisses sous forme de polygones avec une composante en Z. Chaque bâtiment est modélisé avec des informations géométriques sur les sols des batiments, la hauteur moyenne et l'altitude des toits. Pour télécharger ces données, il faut se rendre sur SwissBuildings3D. Les étapes à suivre sont les suivantes :

1. Ouvrir la carte interactive et localiser la zone d'étude.
2. Sélectionner la tuile correspondant à la zone (ici, Monthey) en cliquant dessus ; la tuile sélectionnée apparaît alors en vert (voir Figure 6).
3. Dans les options situées en bas de l'interface, choisir le format **File Geodatabase (ZIP)**.
4. Vérifier que le système de coordonnées est bien réglé sur **LV95 (CH1903+)**.
5. Laisser l'option **Time status** sur **Current**.
6. Télécharger la tuile sélectionnée, qui contiendra les couches **floor**, **roof**, et **wall**.

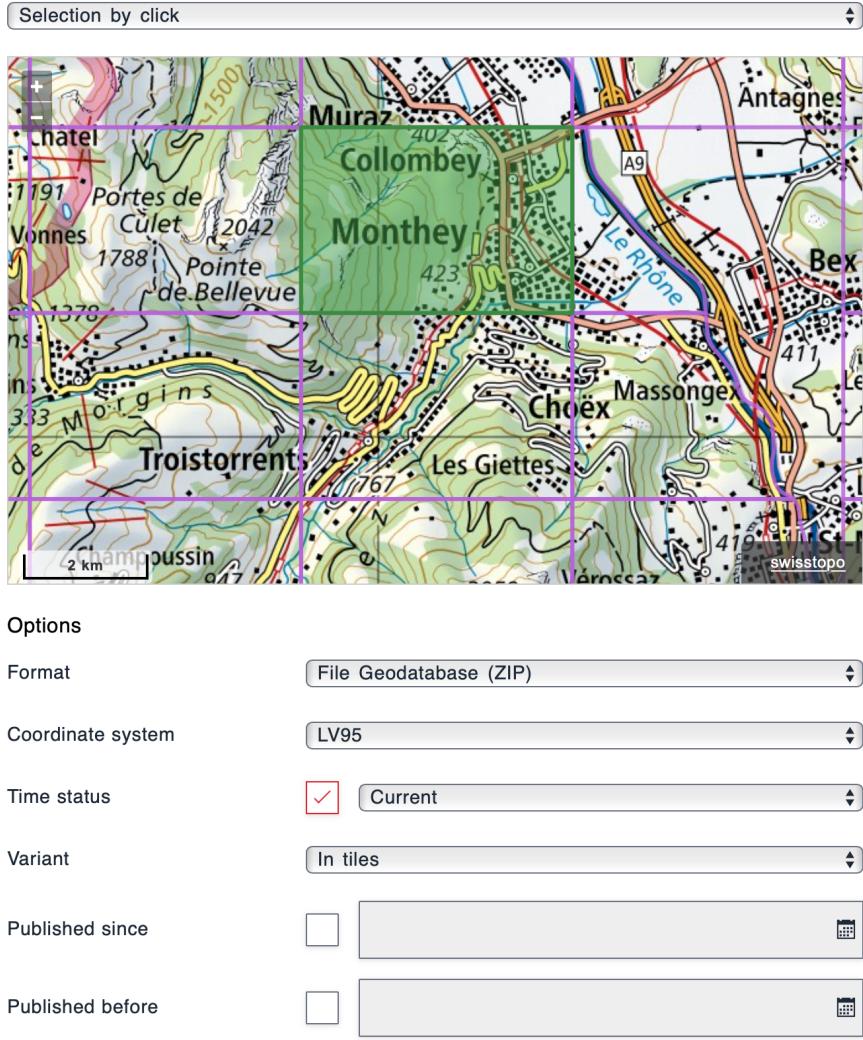


FIGURE 6 – Sélection de la tuile correspondant à Monthei sur le portail swisstopo

- **MO cadaster (geodienste)** : Ces données sont disponibles au format **GeoPackage** via le portail [geodienste.ch](http://geodienste.ch). Elles contiennent les limites et objets cadastraux (bâtiments, routes, terrains, etc.) pour l'ensemble du territoire suisse. Ces données servent notamment à identifier les bâtiments effectivement construits et leur position cadastrale ainsi qu'à définir des zones d'étude spécifiques. Pour le canton du Valais, il est possible de télécharger directement les données en cliquant sur le logo **VS** dans la liste des cantons. Une section "Remarques" s'ouvre alors avec un lien direct vers les données ouvertes du canton. Le fichier principal doit être téléchargé sous ce format OpenData (GDB).
- **SwissAlti3D (Surface du sol)** : SwissAlti3D est une donnée altimétrique de haute précision produite par swisstopo. Il est disponible au format **.xyz**, qui contient une grille régulière de points avec leurs coordonnées X,Y,Z en mètres (système LV95).

Les données peuvent être téléchargées depuis le site officiel : [swisstopo.admin.ch](http://swisstopo.admin.ch)

#### { SwissAlti3D

Lors du téléchargement, il est possible de choisir :

- une résolution de **2 mètres** (fichier plus léger, traitement plus rapide),
- ou une résolution plus fine de **0.5 mètre** (plus précis mais plus lourd à traiter).

- **swissTLM3D(Types de sol)** : Ce jeu de données fournit une cartographie précise de l'occupation du sol en Suisse(routes, zones végétalisées, etc). Il est fourni au format **GeoPackage** (GPKG) et téléchargeable via le site officiel : [swisstopo.admin.ch](http://swisstopo.admin.ch) { swissTLM3D}
- **Registre fédéral des bâtiments et des logements (RegBL)** : Le RegBL fournit une base de données exhaustive sur tous les bâtiments et logements en Suisse, incluant leur identifiant unique (EGID), l'année de construction, le type d'usage (par exemple résidentiel ou industriel) ainsi que des informations sur les logements associés. Les données sont accessibles via le portail officiel [housing-stat.ch](http://housing-stat.ch). Il est possible de télécharger un fichier pour un canton donné contenant la liste complète des bâtiments enregistrés dans cette région.
- **Fichiers climatiques (.cli)** : CitySim utilise des fichiers climatiques annuels décrivant heure par heure les conditions météorologiques locales Pour ce projet, un fichier .cli correspondant à une station météorologique proche a été utilisé pour simuler des conditions réalistes. Ces données permettent de modéliser finement les échanges thermiques entre les bâtiments, le sol et l'atmosphère.

Toutes ces données ont été explorées et traitées à l'aide du logiciel **QGIS**, qui a permis la vérification géométrique, la simplification des entités et leur regroupement en couches logiques compatibles avec CitySim. Le format **GeoPackage**, qui permet de stocker plusieurs couches vectorielles et raster dans un seul fichier, a été privilégié pour faciliter l'intégration avec les scripts Python de génération des fichiers XML.

## 2.4 Préparation des fichiers de simulation

Une fois les données géospatiales collectées, un ensemble d'étapes est nécessaire pour préparer les fichiers d'entrée destinés à la simulation dans CitySim Pro. Ce processus repose sur une chaîne d'outils complémentaire : QGIS est utilisé pour le traitement et la structuration des données spatiales, Python permet d'automatiser la génération du fichier .xml, et CitySim Pro exécute la simulation énergétique et thermique à partir de ces fichiers. Le schéma de la Figure 7 résume les principales étapes de ce pipeline.

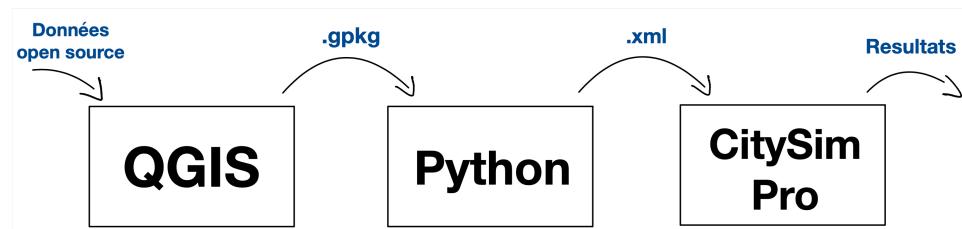


FIGURE 7 – Chaîne de traitement des données : depuis les données open source jusqu’aux résultats de simulation.

### Traitement initial dans QGIS

La première étape, comme l'indique la Figure 8, consiste à importer des données open source dans QGIS afin de créer un GeoPackage.

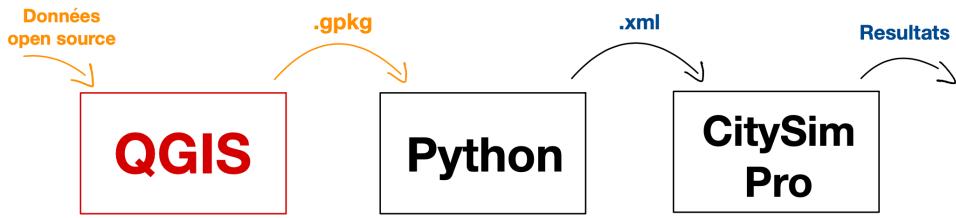


FIGURE 8 – Chaîne de traitement des données : QGIS

Le traitement des données commence par le téléchargement et l'importation de plusieurs jeux de données open-source dans QGIS, en fonction de la zone géographique choisie pour l'étude (ex. : une tuile Swisstopo ou une commune du Valais). Les principales étapes sont les suivantes :

- **SwissBuildings3D** : téléchargé au format geodatabase depuis swisstopo. Nous avons importé les couches correspondantes aux `floors`, `walls`, `roofs`.
- **Cadastre MO** : téléchargé au format GeoPackage via geodienste.ch. Nous avons importé la couche `M0 Couverture du sol` et filtré les entités "Genre" IN (0, 1, 2, 3, 4, 5) pour isoler les bâtiments.

La couche ne contient pas le numero REGBL\_EGID dont on a besoin. Pour enrichir la couche avec cet identifiant, nous avons téléchargé une table séparée depuis le site housing-stat.ch, contenant les correspondances entre géométries et numéros EGID. Cette table a été jointe à la couche cadastrale dans QGIS grâce à l'outil :

#### Boîte à outils → Joindre les attributs par localisation

Dans la fenêtre de configuration de l'outil (voir Figure 9), nous avons :

- défini la couche de destination comme `zone_tout` (couche des bâtiments extraits du cadastre),
- défini la couche source comme `buildings` (contenant les identifiants EGID),
- choisi les prédictats spatiaux `intersecte` et `contient`,
- précisé `egid` dans le champ "Champs à ajouter".

On sélectionne "Refactoriser les champs" et on renomme EGID en RegBL\_EGID. Cela permet d'associer chaque entité de la couche cadastrale au bon identifiant EGID, en fonction de leur superposition géographique avec les données du RegBL. La couche résultante est ensuite prête à être exportée dans le GeoPackage final.

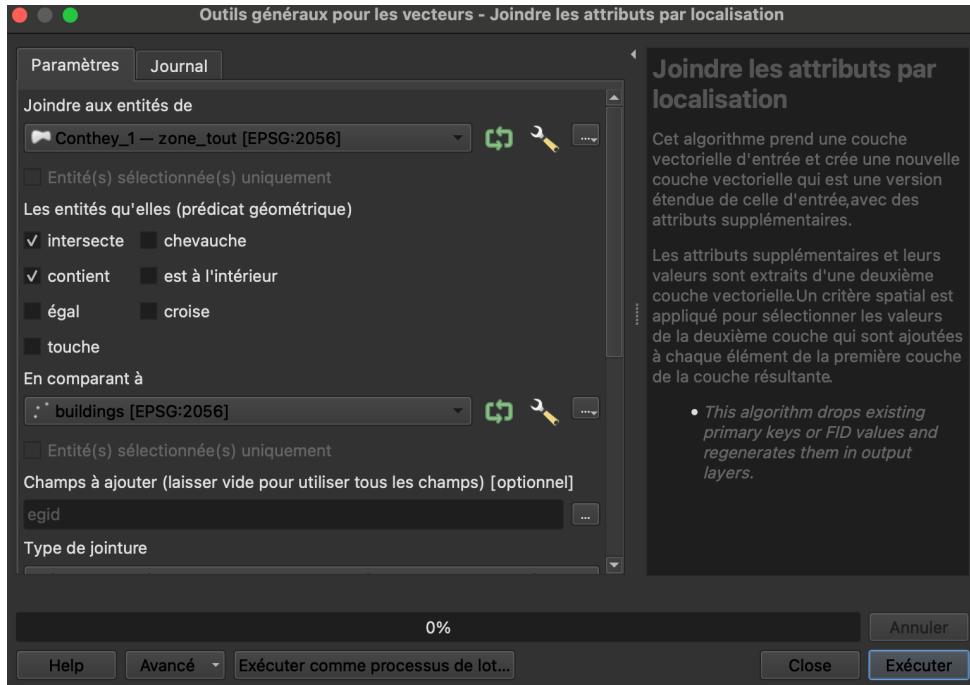


FIGURE 9 – Interface QGIS – Jointure spatiale entre la couche cadastrale et les identifiants Egid.

A présent, il faut définir manuellement deux sous-ensembles géographiques dans QGIS qui sont :

- **zone\_tout** : cette couche contient l'ensemble des bâtiments situés dans la zone d'étude. Elle est définie manuellement en traçant un polygone de sélection (outil *Sélection des entités par polygone*) autour de la zone d'étude. Ensuite, nous avons utilisé cliqué droit sur la couche/exporter/sauvegarder les entités sous.

Après ça on peut enregistrer la couche dans le **GeoPackage** de la zone d'étude.

- **zone\_cad** : cette couche contient les bâtiments raccordés à un réseau de chaleur existant ou prévu. La sélection est similaire à celle de la zone\_tout.

Chaque sous-couche est ensuite exportée dans le **GeoPackage** final, respectivement sous les noms **zone\_tout** et **zone\_cad**. Reste à rajouter les suivantes.

- **Types de sol (swissTLM3D)** : également téléchargé au format **GeoPackage** depuis swisstopo. Deux couches ont été importées :

- **tlm\_bb\_bodenbedeckung**, filtrée sur les valeurs 'Wald', 'Gehoelzflaeche', 'Gebueschwald', 'Wald offen' du champ **objektart** pour obtenir les zones boisées et végétalisées : "objektart" IN ('Wald', 'Gehoelzflaeche', 'Gebueschwald', 'Wald offen')

- **tlm\_strassen\_strasse**, en filtrant pour exclure les objets de type 'Verbindung' ou 'Platz' afin de ne conserver que les vraies routes urbaines : "objektart" NOT IN ('Verbindung', 'Platz').

A partir de ces geopackages on définit respectivement les couches **green** et **streets**

**Organisation dans QGIS** Après l'importation, les couches pertinentes sont exportées manuellement via l'option **Exporter les entités** de QGIS, en veillant à supprimer le champ **fid**. Les couches exportées sont regroupées dans un seul fichier **GeoPackage** contenant les éléments suivants :

- **zone\_cad** : bâtiments raccordés à un réseau de chaleur,

- **zone\_tout** : tous les bâtiments de la zone d'étude,
- **centrale** : emplacement des centrales thermiques (point),
- **floor, wall, roof** : éléments géométriques des bâtiments issus de SwissBuildings3D,
- **streets** : réseau routier structurant de la zone,
- **green** : zones végétalisées existantes,
- **trees** : arbres existants (pointZ),
- **pedestrian** : piétons (pointZ).

**Préparation pour les scénarios** Enfin, d'autres couches spécifiques sont ajoutées pour générer les scénarios d'atténuation dans CitySim :

- **sidewalk** : trottoirs modélisés seulement dans Monthey,
- **tarps** : Polygones représentant de grandes bâches (Conthey) /couche de parapluies(Monthey) installées en hauteur, utilisées pour générer des zones d'ombre étendues dans l'espace urbain,
- **soil\_green** : espaces verts modifiables,
- **new\_trees** : points où de nouveaux arbres sont ajoutés.

Cette structuration des données dans QGIS permet une préparation rigoureuse et réplicable des simulations dans CitySim, en séparant clairement les couches d'entrée de la simulation de celles servant à générer des scénarios.

Les Figures 10 et 11 nous montre ce qu'on obtient.

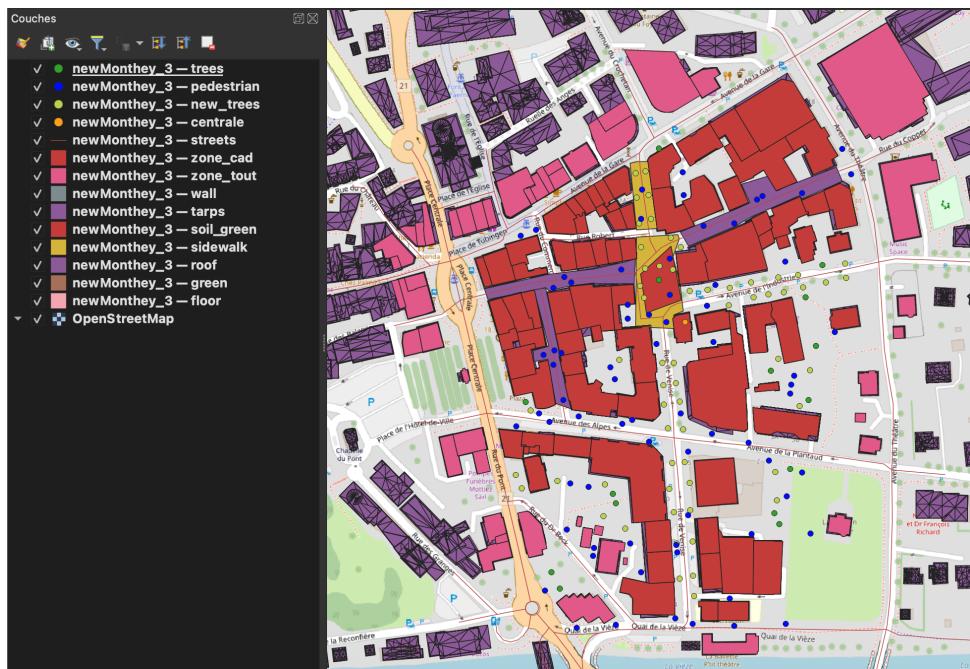


FIGURE 10 – Monthey depuis QGIS

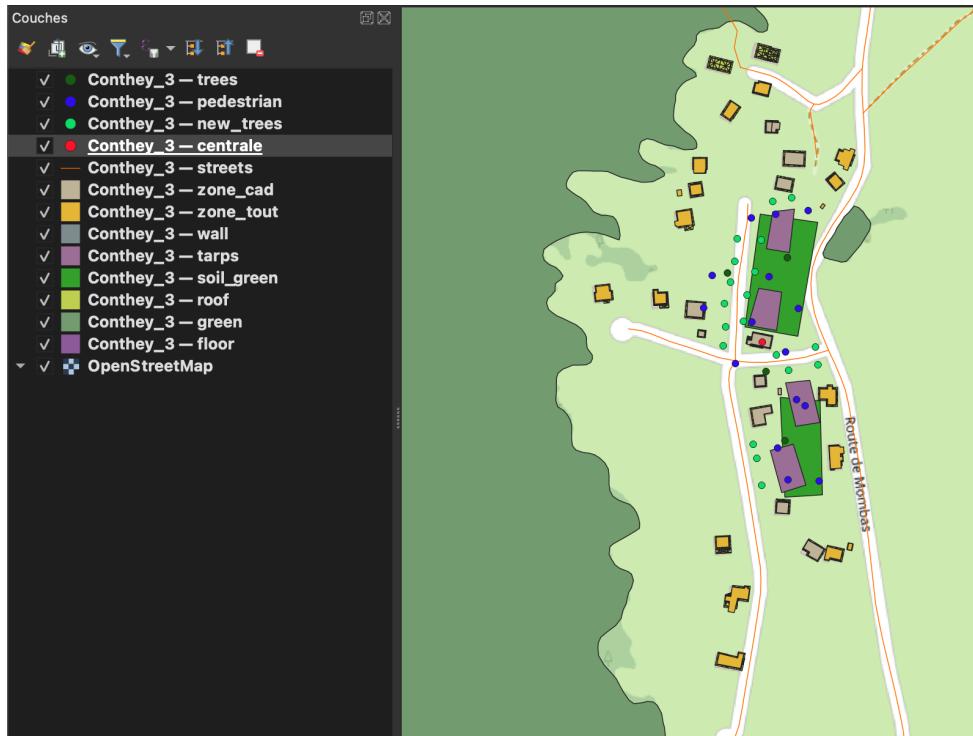


FIGURE 11 – Conthey depuis QGIS

### Génération des fichiers XML avec Python

Une fois les couches géographiques prêtes et regroupées dans un fichier GeoPackage, un fichier Python permet de générer automatiquement les fichiers XML nécessaires à la simulation dans CitySim Pro. Ce fichier contient des informations sur la géométrie des bâtiments, le terrain ainsi que les éléments de simulation. Cette étape est réalisée automatiquement à l'aide de scripts Python, comme illustré dans la Figure 12.

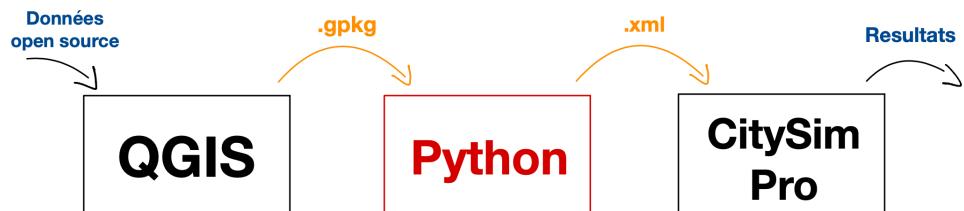


FIGURE 12 – Chaîne de traitement des données : Python

Voici les principales étapes du processus :

- 1. Création du fichier XML de base** La génération débute par la création de la structure XML de base pour CitySim. Cela inclut l'ajout des jours simulés, des fichiers climat et horizon, ainsi que l'import de composants depuis un fichier XML source (profils d'occupation, composites, etc.).

Le code utilisé pour créer cette structure est illustré à la Figure 13.

```

root = xml.add_root()
xml.add_simulation_days(root)
xml.add_climate(root, climate_file)
district = xml.add_district(root)

# Horizon
horizon_df = pd.read_csv(horizon_file, sep='\t', header=None)
horizon_df.columns = ['phi', 'theta']
xml.add_far_field_obstructions(district, horizon_df)

# Add all the composites and profiles, taken from a source XML
xml.add_child_from_xml_to_district(district, xml_file_to_copy, 'Composite')

```

FIGURE 13 – Création de la structure XML minimale pour CitySim.

Cette structure est la base sur laquelle seront ajoutés les éléments urbains (sols, bâtiments, arbres...).

**2. Chargement des données géospatiales** Les différentes couches nécessaires sont extraites depuis le GeoPackage créées juste avant. Le code utilisé pour effectuer ce chargement est illustré à la Figure 14.

```

M0_all = gpd.read_file(gpkg_filepath, layer = "zone_tout")
M0_dhn = gpd.read_file(gpkg_filepath, layer = "zone_cad")
centrale = gpd.read_file(gpkg_filepath, layer = "centrale")
pedestrian = gpd.read_file(gpkg_filepath, layer = "pedestrian")
trees = gpd.read_file(gpkg_filepath, layer = "trees")

# Split Multipolygons into Polygons
zone_all = M0_all.explode(index_parts=False)
zone_dhn = M0_dhn.explode(index_parts=False)

```

FIGURE 14 – Chargement des couches géospatiales depuis un GeoPackage.

Ces données sont ensuite utilisées pour construire les enveloppes 3D des bâtiments, filtrer la zone d'intérêt, et préparer les objets à simuler.

**3. Génération du terrain via les points XYZ** Le fichier contenant les points topographiques (.xyz) permet de reconstruire le relief du sol. Chaque point contient une coordonnée ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), et l'ensemble est transformé en surfaces triangulées.

La Figure 15 montre l'utilisation de la fonction `add_ground_from_XYZ`.

```

terrain_df = pd.read_table(XYZfile, skiprows=1, sep='\s+', names=['X', 'Y', 'Z'])

ground_data = xml.add_ground_from_XYZ(M0_dhn, district, terrain_df, zone_box,
                                         center_coordinates)

```

FIGURE 15 – Génération du terrain à partir des données altimétriques.

Ces surfaces reçoivent ensuite des propriétés physiques (type, k-factor, réflectance), et sont découpées pour éviter qu'elles ne recouvrent les bâtiments.

La fonction `add_ground_from_XYZ` crée ces triangles à partir de la grille régulière de points en connectant chaque groupe de quatre points voisins pour former deux triangles. Elle vérifie ensuite que chaque triangle :

- reste à l'intérieur de la zone d'étude,
- ne chevauche pas les éléments existants du réseau thermique.

Les triangles valides sont ajoutés au fichier XML dans une balise `<GroundSurface>` et enrichis avec des paramètres physiques comme la réflectance ou bien le type de sol. En parallèle, ils sont également stockés dans un `GeoDataFrame`.

**4. Génération des bâtiments 3D** La modélisation des bâtiments commence à partir des empreintes au sol extraites du fichier GeoPackage, auxquelles s'ajoutent des informations issues de RegBL (Registre fédéral des bâtiments). Ces empreintes sont ensuite enrichies avec les surfaces 3D (murs, toits, planchers) fournies par les données SwissBuildings3D, ce qui permet de reconstruire la géométrie complète de chaque bâtiment.

Cette étape est réalisée à l'aide de la fonction `generate_buildings` (voir Figure 16), qui retourne deux objets : un ensemble filtré des empreintes géométriques (`footprints`) et une table contenant les attributs associés à chaque bâtiment (`buildings`).

```
footprints, buildings = generate_buildings(zone_all, EGID_list, GEOADMIN_BASE_URL,
                                             altitude_default, create_geometry_3D,
                                             calculate_volume_3D, zone_floor, zone_roof,
                                             zone_wall)
```

FIGURE 16 – Création des bâtiments à partir des empreintes cadastrales, des données d'altitude et des surfaces SwissBuildings3D.

Une fois les bâtiments identifiés, la fonction `generate_envelope` permet de générer leurs enveloppes géométriques : murs, toits, planchers, ainsi que le volume intérieur si les données 3D sont disponibles. Le résultat est ensuite intégré dans le fichier XML avec `add_all_buildings`, comme montré à la Figure 17.

```
envelope, buildings_volume_3D = generate_envelope(footprints, buildings, calculate_volume_3D)

xml.add_all_buildings(district, buildings, envelope, center_coordinates)
```

FIGURE 17 – Génération des enveloppes 3D et intégration des bâtiments dans le fichier XML.

La fonction `add_all_buildings` :

- choisit le volume le plus pertinent (volume cadastral ou volume 3D),
- ajoute un réservoir de chaleur dimensionné selon l'année de construction (chauffage au sol ou radiateur),
- crée un ballon d'eau chaude sanitaire, proportionnel au nombre d'occupants,
- assigne les profils d'occupation et d'activité,
- installe une chaudière standard de 10 MW comme source de chaleur,
- ajoute enfin toutes les surfaces (murs, toits, sols) dans la scène XML.

Ce processus permet d'obtenir une représentation réaliste des bâtiments, avec des propriétés thermiques prêtes pour la simulation dans CitySim.

**5. Génération des piétons et des arbres** Une fois les bâtiments et le sol modélisés, on ajoute d'autres éléments de la scène urbaine : les piétons et les arbres. Ces objets permettent de mieux représenter l'environnement réel et d'affiner la simulation.

Les **piétons** sont créés à partir de la couche `pedestrian` du fichier GeoPackage. Chaque point représente un individu. La fonction `generate_pedestrian` leur assigne un identifiant unique, ajuste leur position selon l'altitude du terrain, puis génère un petit cylindre en 3D. Ce cylindre est composé d'un sol, d'un toit et de plusieurs parois latérales. Ces éléments sont ensuite rassemblés dans un fichier d'enveloppes géométriques et ajoutés au fichier XML avec la fonction `xml.add_pedestrians`.

Le code de cette génération est illustré à la Figure 18, qui montre l'appel à la fonction `generate_pedestrian`.

```
pedestrian_data, pedestrian_envelope = generate_pedestrian(pedestrian, buildings, ground_data)
print("Adding pedestrians in xml file...")
xml.add_pedestrians(district, pedestrian_data, pedestrian_envelope, center_coordinates)
```

FIGURE 18 – Appel de la fonction `generate_pedestrian` pour créer les volumes des piétons et les ajouter à la scène.

Les **arbres** sont extraits de la couche `trees`. Pour chaque arbre, la fonction `generate_tree` ajuste d'abord la position verticale selon le terrain, puis crée deux parties : un tronc (sous forme de cylindre vertical) et des feuilles, qui sont représentées par un disque plat placé au sommet du tronc. Si certaines informations comme la hauteur ou le diamètre sont absentes, des valeurs par défaut sont utilisées. Une fois les formes créées, les arbres sont ajoutés à la scène grâce à `xml.add_trees`.

L'appel de la fonction `generate_tree` est montré à la Figure 19, illustrant la création des troncs et couronnes des arbres.

```
trees_data, trees_envelope, next_tid = generate_tree(trees, ground_data, next_tid)
xml.add_trees(district, trees_data, trees_envelope, center_coordinates)
```

FIGURE 19 – Appel de la fonction `generate_tree` pour créer les troncs et couronnes des arbres et les intégrer dans la scène.

Par la suite, des arbres supplémentaires (`new_trees`) ont été ajoutés à la scène selon la même méthode. Cela permet d'intégrer des scénarios de végétalisation.

**6. Génération des objets d'ombrage : bâches et parapluies** En complément des éléments déjà présents dans la scène, des surfaces d'ombrage artificiel ont été ajoutées pour représenter des aménagements urbains tels que des bâches suspendues et des parapluies.

Les **bâches** sont générées à partir de polygones 2D présents dans la couche `tarps`. La fonction `generate_tarps_from_polygons` commence par déterminer l'altitude du terrain au centre de chaque polygone, puis soulève chaque bâche à une hauteur définie. Si une épaisseur est précisée, la bâche est représentée comme un volume avec :

- une face inférieure (`class_id = 20`),
- une face supérieure (`class_id = 21`),
- et des parois latérales (`class_id = 22`).

Les géométries ainsi créées sont ensuite ajoutées à la scène via `xml.add_shading_surfaces`. Le processus est illustré à la Figure 20.

```

print("Creating tarps...")

tarps_2d = gpd.read_file(gpkg_filepath, layer='tarps')
tarps_2d = tarps_2d.to_crs(2056)

tarps_df, tarps_surfaces = generate_tarpes_from_polygons(tarps_2d, ground_data,
    start_tid=next_tid, height=6.0, thickness=0.8)

next_tid = tarps_df['tid'].max() + 1
xml.add_shading_surfaces(district, tarps_df, tarps_surfaces, center_coordinates)

```

FIGURE 20 – Création des bâches en 3D à partir de polygones 2D. Les faces sont générées automatiquement en fonction de la hauteur et de l'épaisseur.

Les **parapluies** sont également générés à partir de zones définies dans la couche `tarps`, mais selon une approche différente. La fonction `generate_parapluies_from_polygons` place automatiquement des disques circulaires (représentant les parapluies) à l'intérieur de chaque zone, en les espaçant régulièrement. Chaque disque est positionné à une hauteur fixe au-dessus du sol et a un rayon donné. Les disques sont modélisés à l'aide de 16 points répartis uniformément sur un cercle, puis ajoutés au fichier XML en tant que surfaces de type `class_id = 23`.

Cette étape est illustrée à la Figure 21, qui montre la génération et l'ajout de ces objets dans la scène.

```

print("Generating parapluies...")

parapluie_zones = gpd.read_file(gpkg_filepath, layer='tarps')
parapluie_zones = parapluie_zones.to_crs(2056)

parapluies_df, parapluies_surfaces = generate_parapluies_from_polygons([
    parapluie_zones,
    ground_data,
    start_tid=next_tid,
    height=5.0,
    radius=2.0,
    spacing=4.0
])

next_tid = parapluies_df['tid'].max() + 1

surfaces_parapluies = parapluies_surfaces[parapluies_surfaces['class_id'] == 23]
xml.add_shading_surfaces(district, parapluies_df, surfaces_parapluies, center_coordinates)

```

FIGURE 21 – Génération automatique de parapluies à l'intérieur de zones définies. Chaque disque est surélevé par rapport au sol et ajouté comme surface d'ombrage.

**7. Modification des types de sols selon les scénarios** Dans le cadre des différents scénarios étudiés, certaines surfaces du sol sont modifiées pour simuler des propriétés thermiques différentes. Cela permet par exemple de différencier un trottoir en béton d'un espace vert.

La fonction `modify_type` est utilisée pour ajuster les propriétés physiques des surfaces du sol en fonction des zones géographiques ciblées. Pour chaque zone, on spécifie :

- un `groundtype` (type de sol selon CitySim),
- un facteur de conductivité thermique (`kfactor`),
- une réflectance aux ondes courtes (`SWR`).

Par exemple, les trottoirs sont modélisés avec un `groundtype` de 31, une faible conductivité (`kfactor = 0.1`) et une réflectance de 0.4. Les surfaces végétalisées (`ground_green`) reçoivent des valeurs adaptées à leur nature.

Le code correspondant est présenté à la Figure 22.

```
sidewalk_index_list, _ = xml.modify_type(district, ground_data,
                                         groundtype=31, kfactor=0.1, SWR=0.4,
                                         modif_data=sidewalk)
ground_green_index_list, _ = xml.modify_type(district, ground_data,
                                              groundtype=3, kfactor=0.7, SWR=0.22,
                                              modif_data=ground_green)
```

FIGURE 22 – Modification des types de sol selon les zones, à l'aide de la fonction `modify_type`.

**8. Finalisation et sauvegarde du fichier XML** Une fois tous les éléments ajoutés à la scène (bâtiments, terrain, objets urbains, végétation, surfaces d'ombrage, etc.), la dernière étape consiste à sauvegarder le fichier XML. Ce fichier contient l'ensemble des informations nécessaires à la simulation dans CitySim.

Avant d'écrire le fichier, la fonction `xml.cut` est utilisée pour découper les surfaces du sol, afin d'éviter qu'elles ne recouvrent les bâtiments ou d'autres objets. Ensuite, la scène complète est enregistrée avec `xml.write_xml_file`, en précisant le chemin de sortie.

Le code correspondant est présenté à la Figure 23.

```
print('creating xml file \n')

# Write XML file
xml.cut(district, ground_data, M0_dhn, footprints)
xml_path = os.path.join(directory_path, xml_name+".xml")
xml.write_xml_file(root, xml_path)
print(f"{xml_name}.xml file created \n")
```

FIGURE 23 – Découpe du sol et écriture du fichier XML final pour CitySim.

Cette étape marque la fin du processus de génération. Le fichier XML produit est directement exploitable dans CitySim Pro pour lancer les simulations thermiques et comparer différents scénarios d'aménagement.

## 2.5 Simulation avec CitySim Pro

Les fichiers XML sont ensuite chargés dans CitySim Pro comme le montre la Figure 24.

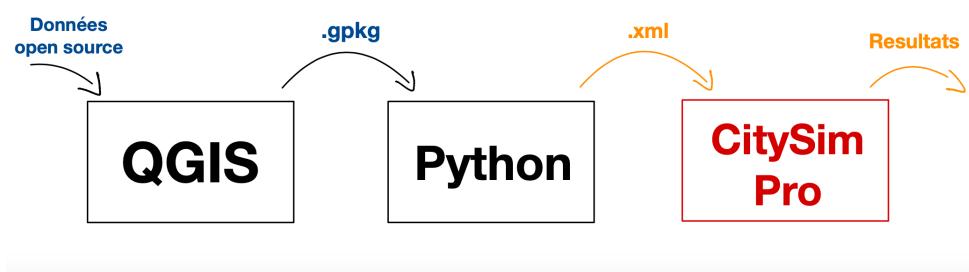


FIGURE 24 – Chaîne de traitement des données : CitySim Pro

Une fois le fichier .xml final généré, celui-ci est chargé dans le logiciel CitySim Pro pour réaliser la simulation. CitySim est un simulateur développé à l'EPFL qui permet d'estimer les échanges thermiques entre les bâtiments, le sol et l'environnement, en tenant compte de l'ensoleillement, de la géométrie urbaine, des matériaux, de la végétation, et des profils d'occupation.

Pour lancer une simulation dans CitySim, il faut :

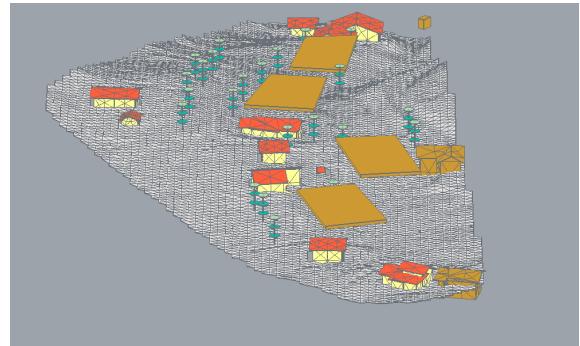
- ouvrir le fichier .xml correspondant à la scène étudiée,
- charger un fichier climatique horaire au format .cli, adapté à la région analysée (par exemple : Sion),
- charger un fichier d'horizon au format .hor, qui contient les données d'obstruction solaire.

Une fois ces trois éléments chargés, on clique sur le bouton **Simulate** dans CitySim. La simulation peut prendre plusieurs heures en fonction de la complexité de la scène et du nombre d'objets présents. Il est important de ne pas interrompre le processus, car CitySim effectue des calculs pour chaque heure de l'année.

À la fin de la simulation, le logiciel génère automatiquement plusieurs fichiers de résultats, qui peuvent être exportés pour être analysés. Ces fichiers contiennent notamment les températures de surface des objets, les flux d'énergie entrants et sortants, et les consommations d'énergie (si les bâtiments sont équipés d'un système thermique dans la scène). On observe sur la Figure 25 un exemple de visualisation des 2 cas d'études après importations du fichier .xml. Juste en dessous la Figure 26 nous montre un exemple de visualisation après simulation. Les surfaces vont du bleu au rouge foncé et traduisent la températures de ces dernières.



(a) Cas d'étude 1 : Monthei



(b) Cas d'étude 2 : Conthey

FIGURE 25 – Visualisation des deux cas d'étude dans CitySim Pro.

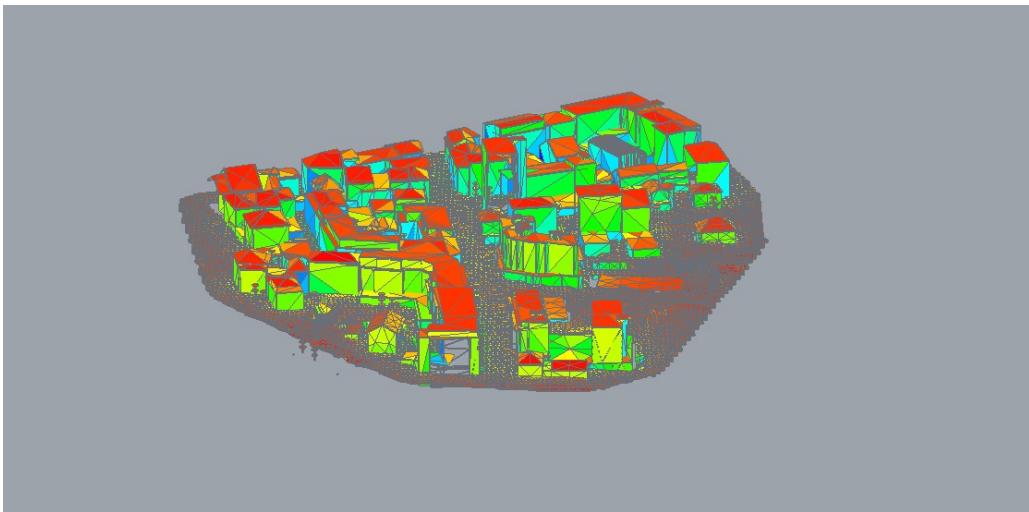


FIGURE 26 – Resultats visuels d'un scenario de Monthey après simulation

## 2.6 Visualisation et analyse spatiale

À l'issue des simulations, CitySim génère des résultats sous forme de fichiers .tsv contenant :

- les températures de surface,
- les flux de chaleur,
- la consommation énergétique simulée (si pertinente).

Ces données sont ensuite importées dans QGIS, où elles sont croisées avec les couches géographiques initiales pour produire des visualisations thématiques :

- Cartes des températures de surface selon le scénario,
- Comparaison visuelle des zones chaudes ou tempérées,
- Analyse spatiale de l'impact des mesures d'atténuation.

Ces cartes et visualisations sont essentielles pour interpréter les résultats de manière visuelle et serviront de base aux recommandations formulées dans la conclusion.

## 3 Résultats et Analyse

Cette section présente les principaux résultats obtenus à partir des simulations menées avec CitySim. On s'intéresse à deux aspects complémentaires : d'un côté, l'analyse des indicateurs de confort thermique (comme l'UTCI) et d'autre part, l'analyse spatiale des températures de surfaces.

Les visualisations produites à partir des données simulées permettent de mieux comprendre comment les différentes mesures d'atténuation influencent le climat urbain.

### 3.1 Évolution entre 2025 et 2050 : comparaison des scénarios de référence

La Figure 27 montre l'évolution mensuelle de l'UTCI moyenne pour les deux périodes simulées. Dans les deux localités, on observe une élévation généralisée des températures ressenties tout au long de l'année.

Comparaison mensuelle de l'UTCI moyenne : Baseline 2025 vs 2050 – Conthey



Comparaison mensuelle de l'UTCI moyenne : Baseline 2025 vs 2050 – Monthey



FIGURE 27 – Comparaison mensuelle de l'UTCI moyenne entre 2025 et 2050 pour Conthey (haut) et Monthey (bas), scénario de référence.

La hausse est particulièrement marquée entre mai et septembre, période pendant laquelle les températures atteignent ou dépassent fréquemment 20 °C d'UTCI en 2050. Cette évolution suggère un allongement de la saison chaude, avec un impact potentiel sur le bien-être des habitants. À Conthey, les valeurs estivales franchissent même ponctuellement les 22 °C d'UTCI moyen, tandis que Monthey suit une tendance similaire.

### Nombre d'heures avec un indice UTCI supérieur à 26 °C

La Figure 28 illustre l'évolution du nombre d'heures où l'indice UTCI dépasse le seuil de 26 °C, indicateur courant d'inconfort thermique.

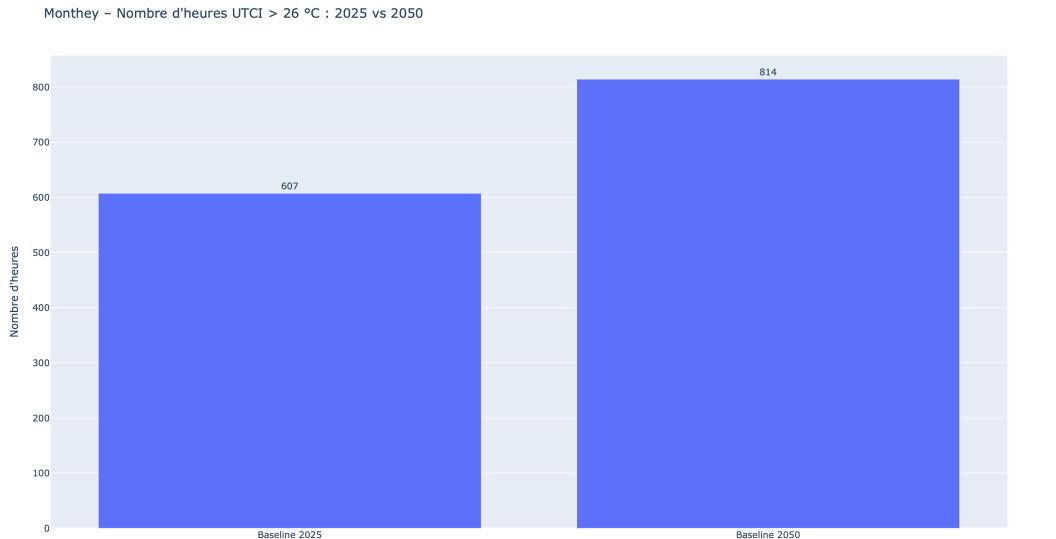
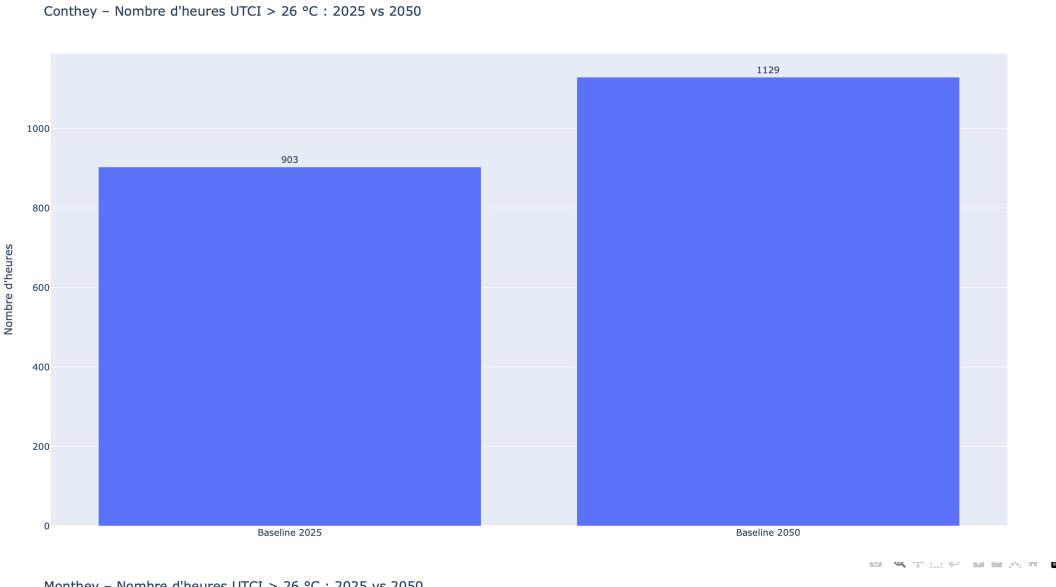


FIGURE 28 – Nombre d’heures avec UTCI > 26 °C en 2025 et 2050 pour les scénarios de référence à Conthey (haut) et Monthei (bas).

À Conthey, le nombre d’heures dépasse les 1100 en 2050, contre 903 en 2025, soit une augmentation d’environ 25 %. À Monthei, cette valeur passe de 607 à 814 heures, traduisant également une intensification notable des périodes d’inconfort.

Ces résultats confirment la tendance au réchauffement dans les deux communes, avec des conséquences directes sur le confort thermique urbain. Ils soulignent la nécessité de mettre en place des stratégies d’adaptation ciblées pour limiter les impacts futurs.

### 3.2 Confort des piétons-Monthei

Les résultats présentés ici concernent le confort thermique des piétons à Monthei, évalué à partir de simulations menées selon quatre scénarios distincts : scénario de référence (Baseline), ajout de parapluies (Tarps), ajout de zones vertes (Trees), et scénario combinant ces deux interventions (Combiné).

La Figure 29 présente l'évolution mensuelle moyenne de l'indice UTCI. On y remarque une nette variation saisonnière, avec des valeurs maximales atteintes durant les mois d'été qui traduisent une diminution du confort thermique. Toutefois, les différences entre scénarios restent discrètes à cette échelle annuelle.

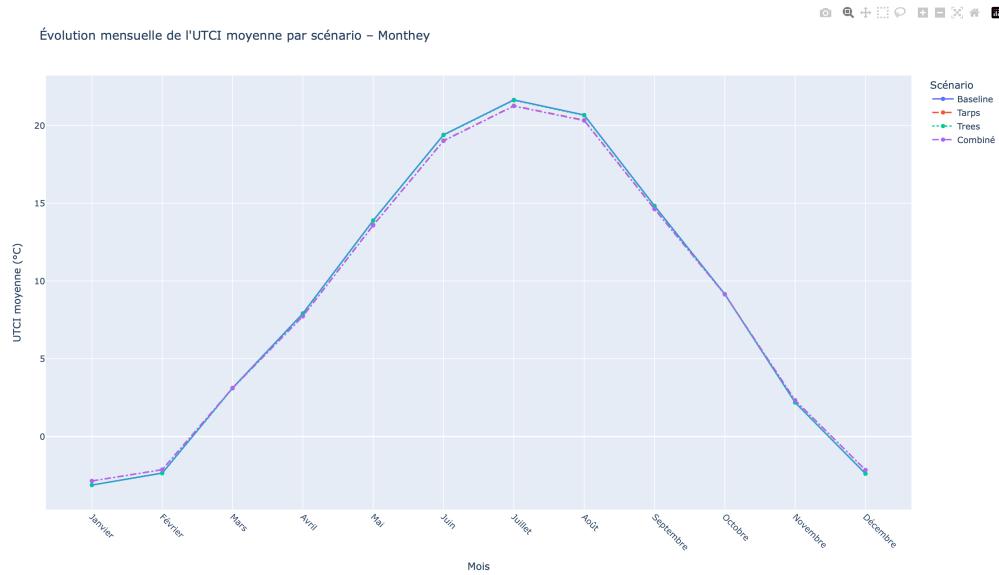


FIGURE 29 – Évolution mensuelle de l'UTCI moyen pour chaque scénario à Monthey.

La Figure 30 compare l'UTCI moyen estival (juin à août). On y constate à nouveau une légère diminution de l'UTCI avec les scénarios Tarps et Combiné, confirmant l'efficacité de ces interventions durant les périodes les plus chaudes.

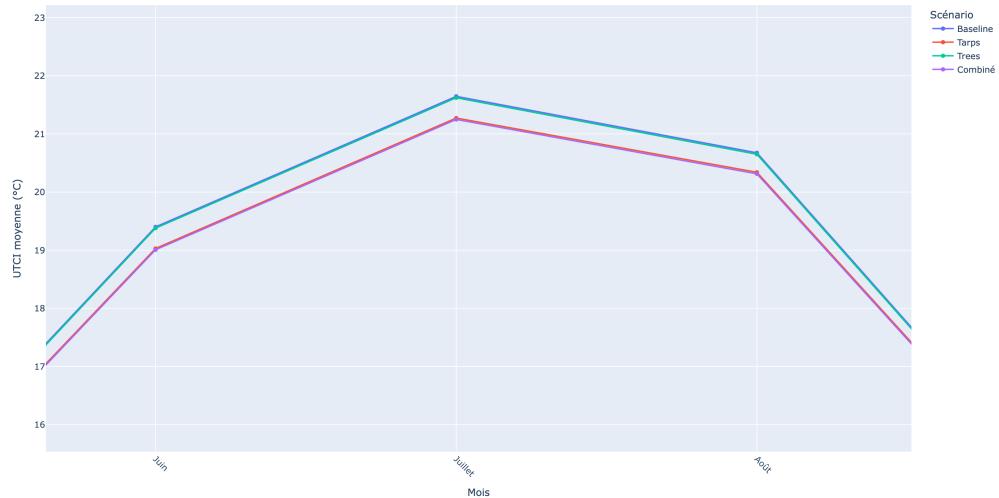


FIGURE 30 – UTCI moyen durant les mois d'été (juin, juillet, août) par scénario.

La Figure 31 présente le gain mensuel d'UTCI par scénario comparativement au scénario de référence. On constate un impact généralement positif en hiver pour les scénarios Tarps et Combiné, tandis qu'en été, ces mêmes scénarios produisent des réductions modérées de l'UTCI, améliorant ainsi le confort thermique durant cette période critique.



FIGURE 31 – Gain mensuel d'UTCI par scénario par rapport à la Baseline.

La Figure 32 illustre le cycle journalier moyen de l'UTCI pendant les mois les plus chauds (juin, juillet, août). On observe clairement que l'impact des bâches et de la stratégie combinée réduit légèrement les pics de chaleur, en particulier aux heures les plus chaudes de la journée (12h-15h).

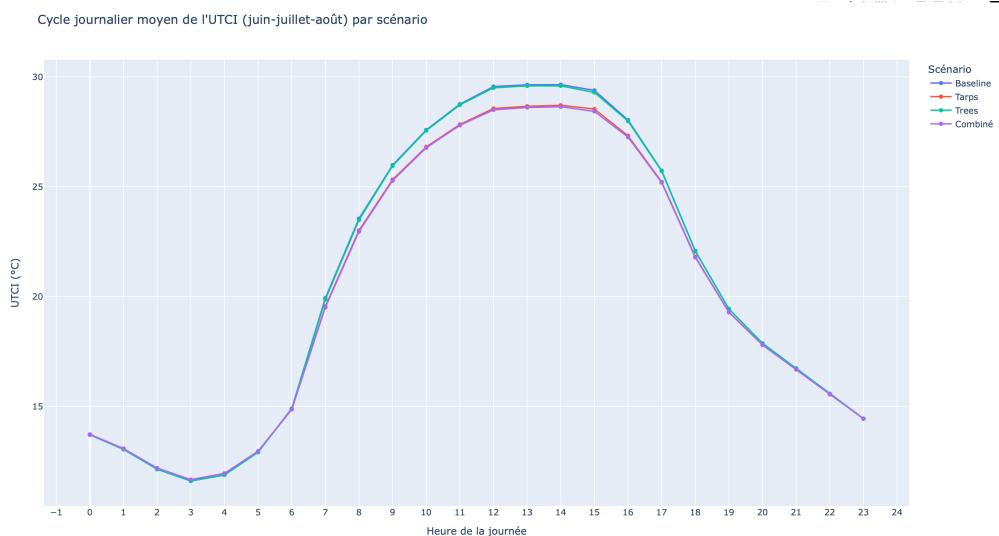


FIGURE 32 – Cycle journalier moyen de l'UTCI (juin-juillet-août) par scénario.

La Figure 33 met en évidence le nombre total d'heures gagnées en confort thermique (UTCI inférieur à 26°C) par rapport au scénario Baseline, sur la période d'avril à octobre. L'ajout de bâches permet une amélioration significative avec 99 heures supplémentaires de confort, tandis que l'ajout de zones vertes a un impact limité à seulement 7 heures supplémentaires. Le scénario combiné offre la meilleure amélioration avec un total de 104 heures gagnées.

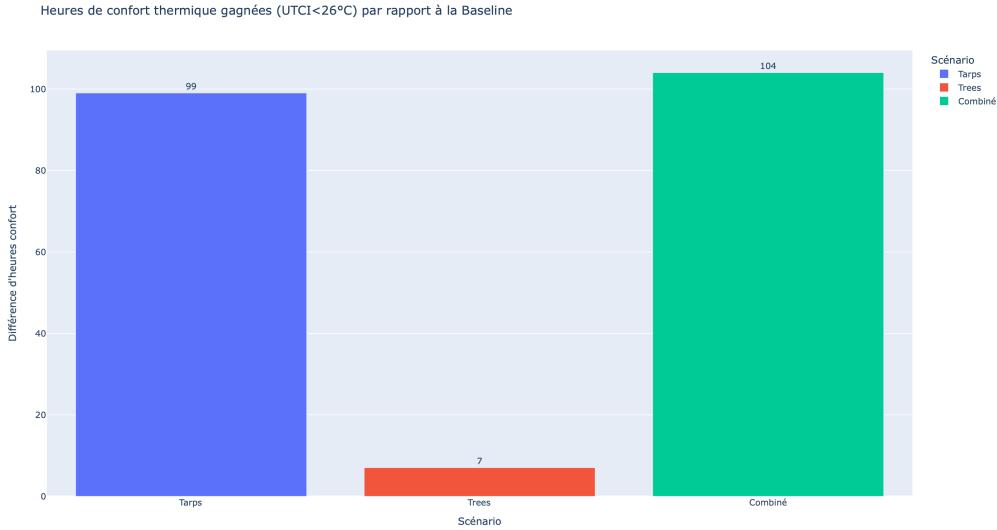


FIGURE 33 – Heures de confort thermique gagnées (UTCI inférieur à 26°C) par rapport au scénario Baseline.

En complément, la Figure 34 illustre l'évolution mensuelle des températures moyennes des surfaces communes entre avril et octobre. Ce graphique confirme que les différences observées dans l'UTCI trouvent leur origine en grande partie dans la capacité des interventions (parapluies/bâches, végétation) à limiter l'échauffement des surfaces urbaines pendant l'été. Le scénario combiné affiche systématiquement les températures les plus basses en période estivale ce qui renforce son rôle dans l'amélioration du confort thermique perçu par les piétons.



FIGURE 34 – Évolution mensuelle des températures moyennes de surface pour chaque scénario à Monthei.

### 3.3 Confort thermique des piétons – Conthey

Comme pour Monthei, des simulations ont été réalisées pour la commune de Conthey selon quatre scénarios : Baseline (référence), ajout de bâches (Tarps), ajout de vegetalisations (Trees), et une stratégie combinée (Combiné). Les résultats présentés ci-dessous confirment des tendances très proches à celles observées dans le premier cas d'étude.

La Figure 35 montre l'évolution mensuelle moyenne de l'UTCI. Le profil est typiquement saisonnier avec une dégradation du confort thermique durant les mois d'été. Les différences entre scénarios restent très discrètes sur l'ensemble de l'année, tout comme à Monthezy.

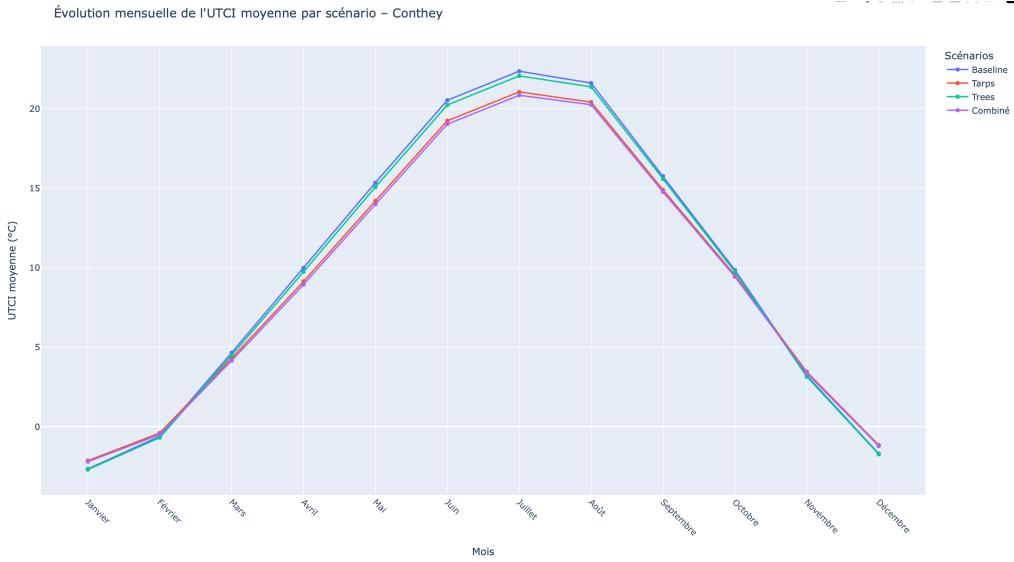


FIGURE 35 – Évolution mensuelle de l'UTCI moyenne pour chaque scénario à Conthey.

En revanche, lorsque l'on s'intéresse uniquement à la période estivale, on remarque de légères diminutions d'UTCI dans les scénarios Tarps et Combiné. Cela se traduit par une amélioration du confort thermique, notamment durant les après-midis chaudes (Figure 36).

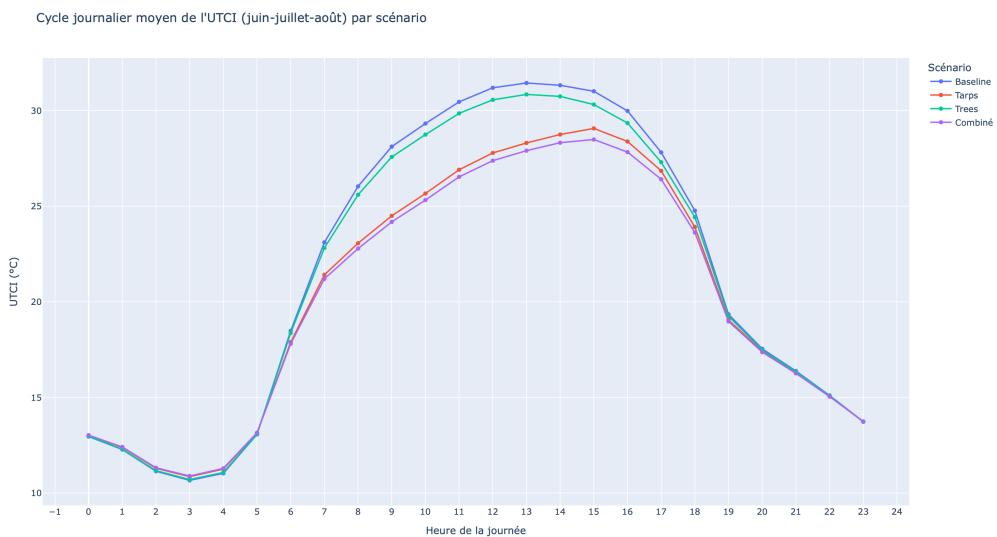


FIGURE 36 – Cycle journalier moyen de l'UTCI (juin-juillet-août) à Conthey selon les scénarios.

Les gains mensuels en UTCI (Figure 37) révèlent, comme à Monthezy, un effet plus significatif en période estivale. On observe des réductions notables de l'UTCI pour les scénarios Tarps et Combiné entre mai et septembre. Ces résultats confirment l'intérêt de

ces aménagements pour améliorer le confort thermique des piétons pendant les périodes critiques.



FIGURE 37 – Gain mensuel d'UTCI par scénario par rapport à la Baseline à Conthey.

Enfin, les heures de confort thermique gagnées (UTCI inférieur à 26°C) sont bien plus nombreuses à Conthey que dans le cas de Monthey (Figure 38). On compte 370 heures supplémentaires pour le scénario Tarps, 83 pour Trees, et jusqu'à 428 pour le scénario Combiné. Cette amélioration notable peut s'expliquer par des conditions locales plus favorables à l'efficacité des interventions testées.

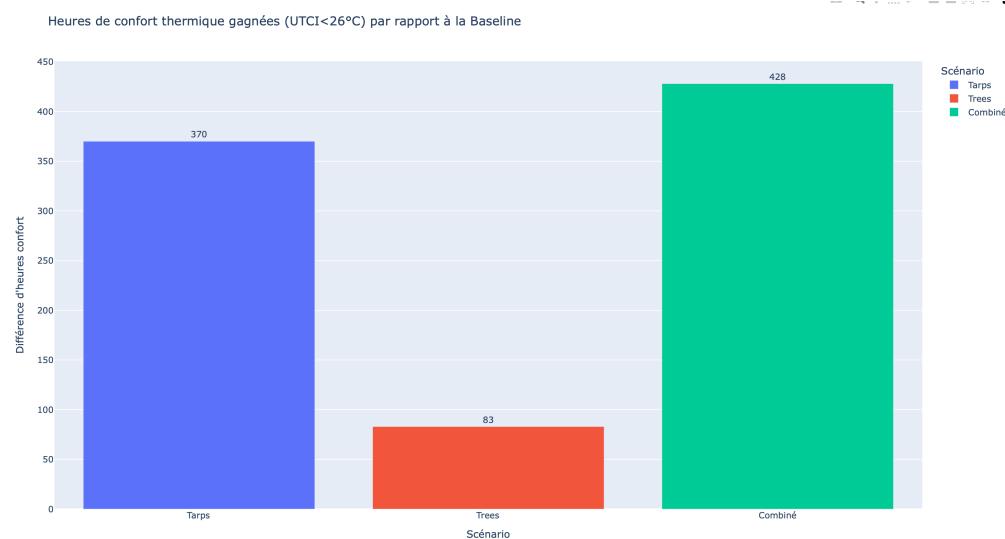


FIGURE 38 – Heures de confort thermique gagnées (UTCI inférieur à 26°C) par rapport à la Baseline à Conthey.

Ces analyses confirment clairement une tendance générale au réchauffement dans les deux localités étudiées, avec un été de plus en plus chaud et prolongé, influençant directement le confort quotidien des habitants. La hausse des températures ressenties et

l'augmentation des heures d'inconfort soulignent la nécessité urgente de prévoir et mettre en place des solutions pratiques pour améliorer la qualité de vie en milieu urbain face aux défis climatiques à venir.

Globalement, à Monthezy, les différentes solutions testées montrent leur potentiel à améliorer sensiblement le confort thermique. L'approche combinée d'arbres et de bâches ressort clairement comme la solution la plus bénéfique, offrant des conditions de vie plus agréables. À Conthey, les résultats vont dans le même sens qu'à Monthezy, avec une efficacité encore plus marquée des solutions mises en place. La combinaison végétaux-bâches apparaît à nouveau comme la stratégie optimale, permettant un gain important d'heures confortables durant la période estivale. Ce constat souligne l'intérêt d'adapter précisément les stratégies aux conditions locales pour maximiser leur efficacité et améliorer durablement le confort urbain.

## 4 Discussion

### 4.1 Efficacité comparée des scénarios d'atténuation à Monthezy et à Conthey

Les simulations indiquent que chaque mesure d'atténuation testée procure un certain rafraîchissement. De manière générale, le scénario combiné se démarque en offrant la réduction la plus importante de l'indice UTCI et le plus grand nombre d'heures de confort supplémentaire en été. Ces résultats étaient attendus car combiner plusieurs interventions renforce leur efficacité.

En comparant les deux sites, on constate que Monthezy, zone urbaine dense de plaine, subit un îlot de chaleur plus intense du fait de ses surfaces bitumées accumulant la chaleur et d'une ventilation limitée la nuit. Conthey qui est une commune plus ouverte en moyenne montagne, connaît un ensoleillement estival très fort mais profite de nuits plus fraîches grâce à son relief et à un nombre d'édifices moins important.

Ces différences influencent l'impact des mesures. À Monthezy, les structures d'ombrage artificiel (bâches tendues) ont un effet immédiat marqué sur le confort des locaux en bloquant le rayonnement solaire direct. En particulier, dans les rues très exposées de Monthezy, l'installation d'ombrage artificiel (parapluies) a bien plus baissé l'UTCI que la plantation d'arbres. Ce constat est cohérent avec des études menées sous climat sec, où l'ombrage fourni par des dispositifs artificiels ou le bâti peut surpasser, ou au moins égaler, celui des arbres en termes de rafraîchissement instantané [5]. .

À Conthey, le relief montagneux et le climat plus aride rendent également les ombrages artificiels très efficaces. Du fait d'un ensoleillement intense et d'un air sec, bloquer le soleil avec des toiles procure un gain sensible de confort. Par ailleurs, l'altitude et l'ouverture du site impliquent que la chaleur se dissipe facilement la nuit. Dans ce contexte créer de l'ombre artificielle ou végétale en journée à Conthey montre un bénéfice significatif, parfois même supérieur à Monthezy pour certaines heures critiques.

En revanche, le scénario "Trees" seul n'apporte qu'une amélioration modeste à court terme. Planter des arbres et des zones vertes dans des rues très chaudes ne suffit pas à éliminer l'îlot de chaleur urbain. L'effet direct sur l'UTCI reste limité à quelques dixièmes de degré dans nos simulations. Cela s'explique par le fait que les jeunes arbres offrent peu d'ombrage tant qu'ils ne sont pas matures, et que leur impact reste limité (portée de l'ombre restreinte). D'après certaines études, même un couvert arboré important (environ

30% de la surface urbaine) n'abaisserait la température moyenne que d'environ 0,4°C à 0,5°C dans le contexte urbain européen [6].

À Montheys, où la densité de bâtiment est forte, il est plus difficile de planter des arbres en nombre ou de grande taille (manque de place, infrastructures souterraines contraintantes). Les bâches se présentent alors comme une solution rapide pour procurer de l'ombre là où la végétation urbaine est déficiente.

À Conthey, l'espace disponible pourrait faciliter davantage la plantation, mais la sécheresse estivale limite l'effet rafraîchissant des arbres s'ils ne sont pas suffisamment irrigués.

En conclusion, les deux sites tirent avantage du verdissement et de l'ombrage, mais Montheys gagne surtout à déployer des dispositifs d'ombre artificielle à court terme, tandis que Conthey illustre le potentiel des deux approches combinées, en tenant compte de ses contraintes microclimatiques (soleil, sol sec).

## 4.2 Limites méthodologiques et incertitudes de l'étude

Bien que les résultats soient encourageants, il convient d'en souligner les limites et les incertitudes. Premièrement, les simulations reposent sur un scénario climatique à l'horizon 2050 qui comporte lui-même des marges d'erreur. Les projections pour le Valais indiquent une hausse des températures moyennes estivales de l'ordre de +2 à +3 °C d'ici 2050–2060 (par rapport à 1980–2010), avec une incertitude d'environ  $\pm 1$  °C [7]. Un été “normal” vers 2050 pourrait ainsi être aussi chaud que la canicule exceptionnelle de 2003. De plus, les étés seront probablement plus secs, avec une baisse des précipitations estivales pouvant atteindre 15% par rapport à la période 1981–2010[8]. Nos simulations utilisent ces tendances moyennes pour 2050, mais la variabilité réelle du climat futur reste inconnue.

Deuxièmement, la modélisation urbaine simplifiée dans CitySim présente des faiblesses. CitySim Pro simule les échanges thermiques entre bâtiments, sol et végétation, mais ne reproduit pas tous les processus microclimatiques. Par exemple, la modélisation des arbres y est limitée. Les arbres sont considérés comme des éléments d'ombrage et de masse végétale, le modèle ne capture qu'en partie l'effet de refroidissement par évapotranspiration. En réalité un arbre bien irrigué rafraîchit l'air ambiant en évaporant l'eau par son feuillage. L'efficacité d'un arbre à réduire la température dépend fortement de sa croissance et de l'eau disponible dans le sol. Or notre approche ne considère pas explicitement l'évolution de la flore ni l'état des nappes phréatiques.

Nos résultats de confort sont donc à interpréter comme des tendances dans un cadre idéalisé et pas comme des valeurs absolues garanties.

Enfin, l'étude ne porte que sur deux cas d'étude spécifiques. Montheys et Conthey offrent un contraste intéressant, mais ils ne couvrent pas toute la diversité des situations urbaines en Valais. D'autres régions pourraient réagir différemment en fonction de leur structure urbaine. Une étude sur les zones industrielles ou des zones résidentielles doit être effectuée. Elles pourraient également réagir différemment en fonction de leur altitude ou de leur exposition aux vents thermiques de vallée. Il faudra donc rester prudent dans la généralisation des conclusions. Il s'agit de résultats sur des zones spécifiques qui devront idéalement être confirmés par des études supplémentaires.

### **4.3 Pistes d'amélioration et stratégies complémentaires pour l'avenir**

Malgré ces limites, cette étude fournit des indications pour adapter les villes valaisannes face aux îlots de chaleur. Plusieurs pistes d'amélioration concrètes se dégagent pour approfondir et compléter les stratégies testées :

**Optimisation des solutions testées :** Réfléchir à l'implantation des arbres et des zones végétalisées afin d'en maximiser les effets (espacement optimal entre chaque pour une efficacité optimale). Il serait utile de cibler en priorité les endroits les plus critiques (axes sans ombre, abords des écoles et hôpitaux) pour établir des zones résistantes à la sécheresse et offrant un large ombrage. De même, le déploiement des bâches pourrait être optimisé en pensant au matériaux et à l'orientation etc.

**Combinaison avec d'autres mesures passives :** D'autres solutions d'atténuation de l'UHI mériteraient d'être explorées en complément. Par exemple, l'utilisation de revêtements clairs ou réfléchissants sur les façades et les routes pourrait réduire l'absorption de chaleur pendant la journée (à Monthey, des trottoirs plus clairs ou des toits réfléchissants aideraient à diminuer la chaleur dans les bâtiments). De même, la végétalisation des façades pourrait apporter un rafraîchissement supplémentaire tout en isolant les bâtiment. Ces solutions "verticales" sont particulièrement prometteuses en milieu dense où le sol disponible manque, et elles contribuent à multiplier les surfaces de végétation au-delà des seuls arbres de rue.

**Gestion de l'eau et rafraîchissement actif :** Dans un climat de plus en plus sec, la question de l'eau devient centrale. Il faudra envisager des solutions pour assurer la disponibilité en eau des nouveaux espaces verts (récupération d'eaux pluviales, arrosage nocturne pour minimiser les pertes par évaporation) afin que les arbres et pelouses puissent réellement évapotranspirer et rafraîchir l'air. Par ailleurs, des dispositifs de rafraîchissement urbain actif pourraient compléter l'ensemble de mesures lors des pics de chaleur : par exemple, des fontaines qui fournissent un rafraîchissement appréciable. Bien que ces solutions actives consomment de l'eau et de l'énergie, elles peuvent être précieuses ponctuellement pour soulager le stress thermique dans les zones à forte fréquentation comme les marchés ou encore les places. Ces dispositifs se marqueront assez efficaces notamment à Conthey où la sécheresse estivale est marquée.

**Planification urbaine et design climatique :** À plus long terme, intégrer la problématique des îlots de chaleur dans l'urbanisme permettra de bâtir des villes plus adaptées aux changements climatiques. Par exemple, on pourrait préserver et créer des corridors de vent le long des vallées, éviter les configurations urbaines qui emprisonnent la chaleur et repenser le matériau des espaces extérieurs (moins d'asphalte noir). L'orientation des nouvelles constructions pourrait tenir compte du soleil en été pour minimiser l'exposition des façades. Ces mesures d'aménagement, combinées aux solutions de végétalisation et d'ombrage testées dans notre étude, contribueront à atténuer durablement l'impact des étés caniculaires futurs.

En résumé, la diversité des contextes urbains en Valais requiert des réponses adaptables et complémentaires. Nos résultats montrent qu'aucune mesure unique ne suffit à éliminer

l'îlot de chaleur, mais qu'un ensemble de stratégies permet d'obtenir des améliorations du confort thermique estival. Il faudra poursuivre les efforts de recherche pour affiner ces stratégies, afin de réduire les incertitudes de modélisation et adapter au mieux les solutions à chaque localité. Tenir compte des spécificités de chaque site, est la clé pour des centres urbains valaisans plus frais et vivables à l'horizon 2050.

## 5 Conclusion

Ce rapport visait à étudier en profondeur le phénomène des îlots de chaleur urbains (UHI) et à évaluer différentes stratégies d'atténuation, en se projetant à l'horizon 2050. Pour mener à bien cette étude, plusieurs étapes ont été nécessaires, combinant l'utilisation de données ouvertes, des outils géospatiaux avancés et des simulations informatiques précises.

Dans un premier temps, l'étude a commencé par l'identification et la collecte de données géospatiales ouvertes, disponibles principalement auprès de plateformes suisses officielles comme SwissAlti3D et SwissBuildings3D. Ces données offrent un accès gratuit à des informations très détaillées, telles que les élévations du terrain, les caractéristiques des bâtiments, leur emplacement précis ainsi que leur géométrie complète en trois dimensions. Cette étape était cruciale, car la qualité et la fiabilité des résultats dépendent directement de la précision des données initiales.

La seconde étape, essentielle à la réussite du projet, fut le traitement et l'analyse de ces données à l'aide du logiciel QGIS. Grâce à cet outil, nous avons pu effectuer des tâches variées telles que le nettoyage et le filtrage des données, la correction de certaines anomalies géométriques, ainsi que la sélection précise des zones d'intérêt à analyser. QGIS a également permis de visualiser clairement les différents éléments urbains, comme les rues, les bâtiments, les surfaces vertes ou minérales, facilitant ainsi la planification des interventions à simuler.

Par la suite, un ensemble de scripts Python spécifiques a été développé pour automatiser et simplifier le processus complexe de préparation des données destinées aux simulations dans CitySim Pro. Ces scripts avaient pour rôle principal de transformer les données issues de QGIS en fichiers XML parfaitement compatibles avec CitySim. Ils permettaient notamment l'ajout automatisé et précis d'éléments urbains tels que les arbres ou les bâches d'ombrage, tout en respectant les contraintes topographiques et urbanistiques des sites étudiés. La robustesse et la modularité du script Python ont permis d'explorer facilement plusieurs scénarios et de garantir la reproductibilité des résultats.

La simulation des scénarios a ensuite été réalisée à l'aide de CitySim Pro, logiciel spécialisé dans la modélisation urbaine qui permet de simuler finement les flux thermiques et le confort thermique des piétons. Trois scénarios principaux ont été testés : le scénario d'ajout de végétalisation, le scénario d'installation de bâches, et un scénario combinant ces deux stratégies. Ces simulations étaient particulièrement complexes, car elles tenaient compte non seulement des conditions climatiques prévues pour 2050, mais également des propriétés thermiques des matériaux, des interactions entre bâtiments et surfaces urbaines, et de l'influence directe des stratégies d'atténuation mises en place.

Les résultats obtenus ont révélé plusieurs conclusions importantes. L'ajout de zone vertes s'est avéré particulièrement bénéfique, grâce à leur double capacité à fournir de l'ombre naturelle et à rafraîchir l'air par le phénomène d'évapotranspiration. En revanche, les bâches ont démontré une efficacité immédiate dans la réduction directe des températures de surface, en particulier sur des espaces très exposés au soleil. Toute-

fois, l'étude comparative approfondie montre clairement que la stratégie combinée offre les meilleurs résultats globaux, à la fois en termes de réduction des températures et d'amélioration significative du confort thermique des habitants.

L'étude comparative des deux cas d'étude qui sont Monthey et Conthey a souligné l'importance cruciale d'adapter les mesures d'atténuation aux spécificités locales. À Monthey, ville fortement urbanisée, les bénéfices des interventions étaient immédiatement perceptibles, justifiant pleinement l'investissement dans ces solutions combinées. À Conthey, la stratégie devait plutôt être pensée en termes de complémentarité avec le contexte naturel environnant, en adaptant les interventions de manière à respecter et valoriser le paysage montagneux tout en obtenant un bénéfice thermique significatif.

Enfin, plusieurs pistes intéressantes méritent d'être approfondies à l'avenir. Il serait pertinent d'intégrer des paramètres supplémentaires dans les simulations, comme l'humidité relative ou les échanges thermiques liés au vent. De plus, il serait bénéfique d'intégrer une dimension économique en analysant précisément les coûts de mise en œuvre, ainsi que les aspects liés à l'acceptabilité sociale des solutions proposées, qui constituent un levier important pour la réussite des stratégies d'atténuation.

Il serait également judicieux d'étendre cette analyse à d'autres zones urbaines de tailles et de caractéristiques différentes, afin d'assurer une meilleure représentativité et de valider davantage les résultats obtenus. Enfin, il serait utile de suivre ces solutions sur le long terme, avec des mesures prises après leur mise en place réelle afin d'améliorer les modèles et de s'assurer qu'ils fonctionnent bien dans la pratique.

Ce rapport constitue ainsi une base solide pour orienter la prise de décision des urbanistes et des décideurs en matière de politiques urbaines, dans l'objectif d'améliorer significativement le confort thermique en milieu urbain face aux défis climatiques actuels et futurs.

## Références

- [1] MétéoSuisse, *L'année 2024 en Suisse romande et en Valais*, 2025. <https://www.meteosuisse.admin.ch/portrait/meteosuisse-blog/fr/2025/01/annee2024-en-suisse-romande-et-en-valais.html>
- [2] NCCS, *Le Valais face aux changements climatiques – Synthèse*, 2020. [https://www.nccs.admin.ch/dam/nccs/fr/dokumente/klima/externe-studien-berichte/Das%20Wallis%20angesichts%20des%20Klimawandels%20-%20Synthese.pdf.download.pdf/Le\\_Valais\\_face\\_\\_aux\\_changements\\_climatiques\\_-\\_synth%C3%A8se.pdf](https://www.nccs.admin.ch/dam/nccs/fr/dokumente/klima/externe-studien-berichte/Das%20Wallis%20angesichts%20des%20Klimawandels%20-%20Synthese.pdf.download.pdf/Le_Valais_face__aux_changements_climatiques_-_synth%C3%A8se.pdf)
- [3] Ville de Genève, *Stratégie Ville fraîche – Rapport d'étape 2018–2022*, 2022. <https://www.geneve.ch/fr/actualites/ville-fraiche-geneve-lutte-contre-chaleur>
- [4] Office fédéral de l'environnement (OFEV), *Îlots de chaleur urbains – Mesures d'atténuation et recommandations*, 2021. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/publications-etudes/ilot-de-chaleur-urbain.html>
- [5] Middel, A., Chhetri, N., Quay, R. (2016). Impact of shade on outdoor thermal comfort – a seasonal field study in Tempe, Arizona. *International Journal of Biometeorology*, 60(12), 1849–1861. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1172-5>
- [6] Iungman, T. et al. (2023). Increasing urban tree coverage to 30% reduces summer urban heat island effects by 0.4°C. Étude portant

- sur 93 villes européennes. <https://environment.ec.europa.eu/news/increasing-tree-coverage-30-european-cities-could-reduce-deaths-linked-urban-heat-en>
- [7] CREALP, *Climat du futur en Valais – Quelles projections pour 2050 ?*, 2021. <https://www.crealp.ch>
- [8] NCCS/CH2018 (2018). *Climate Scenarios for Switzerland – CH2018 Climate Scenarios Summary Brochure*. National Centre for Climate Services. [https://www.nccs.admin.ch/dam/nccs/en/dokumente/website/klima/CH2018\\_broschure.pdf](https://www.nccs.admin.ch/dam/nccs/en/dokumente/website/klima/CH2018_broschure.pdf)