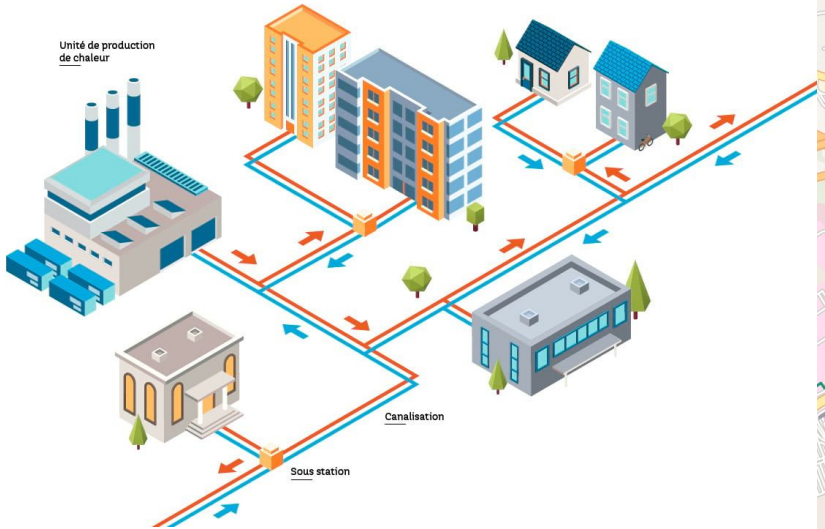
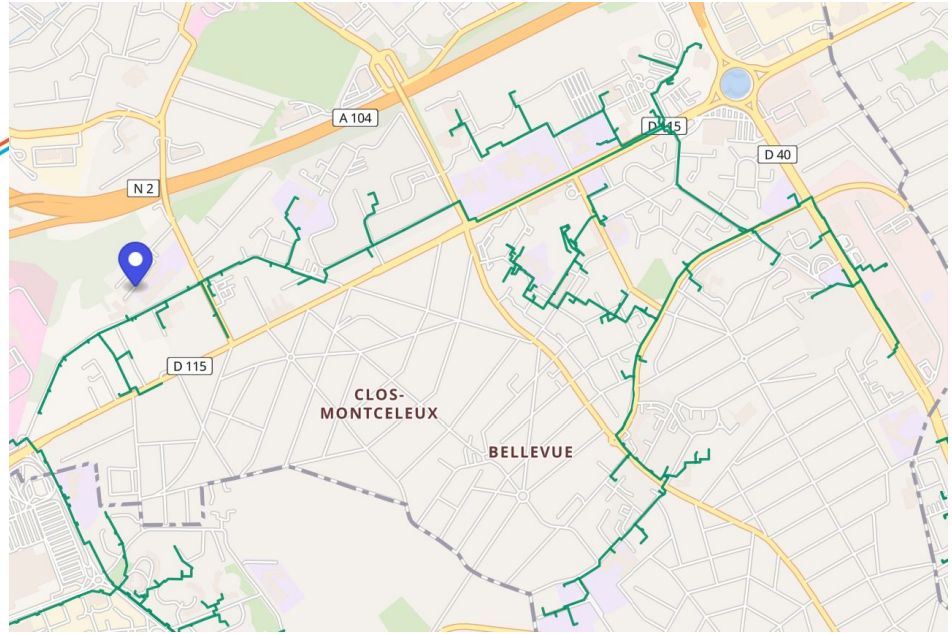
Conception automatisée de réseaux de chaleur urbains

Valentin Allard, Mathis Peinaud, Tom Graciet

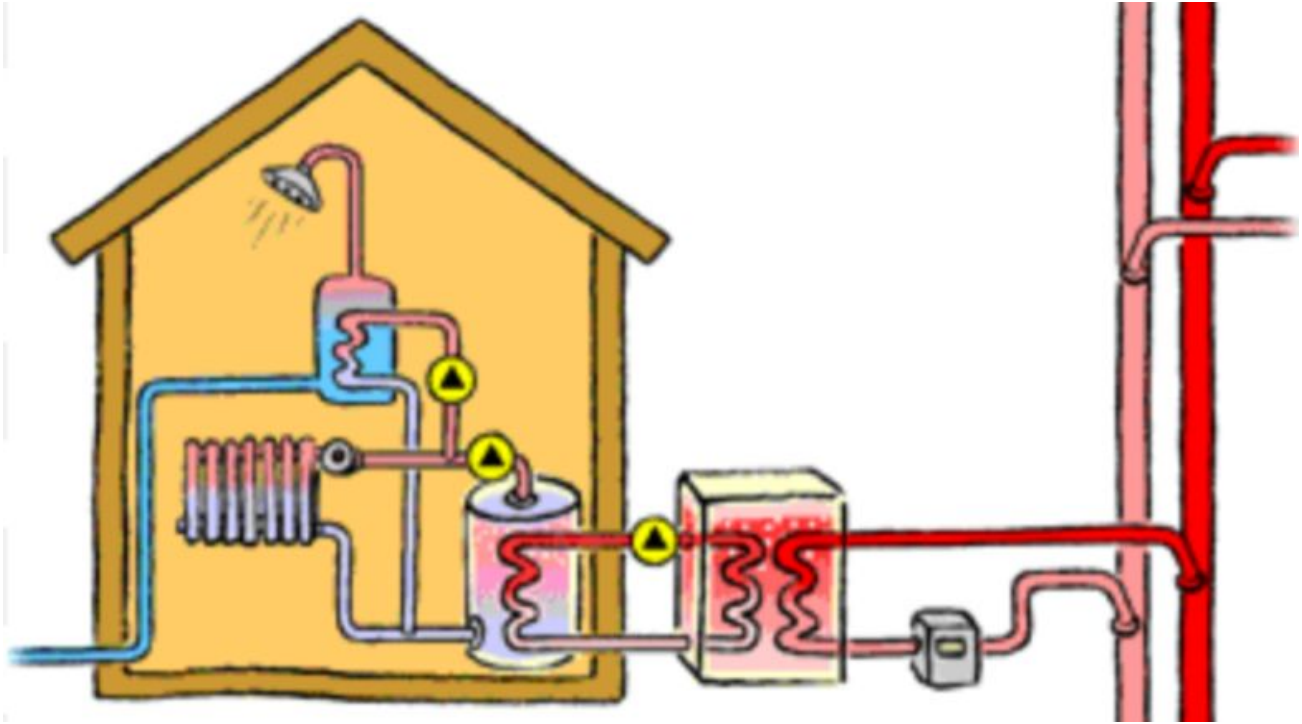
Qu’est-ce qu’un réseau de chaleur urbain ?





Réseau de chaleur de Villepinte
Source : France Chaleur Urbaine

Zoom sur 1 bâtiment



Pourquoi étudier un réseau de chaleur urbain ?

- Prix très attractif par rapport aux autres alternatives de chauffage

- Moyen de chauffage plus sûr que le gaz, le fioul,...

- Empreinte carbone plus faible (réutilisation de chaleur fatale industrielle, data centers…)

Une solution durable

Data center EQUINIX (Saint-Denis)

Centrale biomasse de Gardanne en France

OBJECTIFS :

- Tracer le réseau de chaleur
- Expliciter le besoin énergétique des bâtiments

Démarche expérimentale

1. Etablir un modèle physique du problème
2. Extraire et traiter les données
3. Afficher le réseau à l’aide d’un graphe

Modalités de programmation

- Le code prend en argument une carte et une base de données
- Le réseau doit suivre le plus possible les axes routiers
- Il faut faire apparaître la source et les sous-stations
- Le code doit calculer les diamètres des tuyaux pour le dimensionnement

Hypothèses du modèle

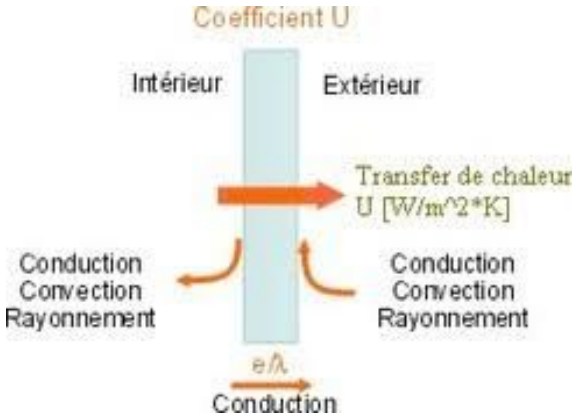
- Vitesse maximale de l'eau : **v_{eau}= 2 m/s** 
- Température intérieure : 19 °C 
- Température extérieure : -7 °C 

Échange thermique au niveau des bâtiments

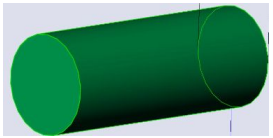
$$P_{canalisations} = \rho * v_{eau} * \pi * (D^2/4) * C_P * \Delta T_{eau}$$

$$P_{bâtiment} = (U_{mur} * S_{mur} + (U_{haut} + U_{bas}) * S_{sol}) * \Delta T_{extérieur/intérieur}$$

coefficient de transmission thermique en W/m²/K



Pour calculer le débit **puis le diamètre D**, on écrit : $P_{canalisations} = P_{bâtiment}$



Première tentative infructueuse :

Solution de remplacement :

Extraction et traitement des données

Module **OSNMX**

```
G = ox.graph_from_place(ville + ", France", simplify=False)
M = ox.convert.to_undirected(G)
```

“Contexte spatial” pris en compte :

```
ville = "Aubervilliers"
coords_source = [48.912, 2.386]
liste_adresses = ['12 rue du colonel fabien', '117 rue de saint denis',
       '105 avenue jean jaures', '31 rue ferragus', '43 rue heurtault',
       '3 rue pierre curie', '14 rue emile augier',
       '19 B chemin du haut saint denis', '21 passage machouart',
       '27 passage machouart', '28 rue claude bernard', '32 B rue bisson',
       '17 rue alphonse daudet', '29 rue alphonse daudet',
       '37 rue alphonse daudet', '20 rue alphonse daudet',
       '6 passage de la justice', '10 rue gaetan lamy',
       '3 rue cesaria evora', '23 rue gaetan lamy', '72 rue du landy',
       '14 rue gaetan lamy']
dic_coords_puis = {(48.913247,2.395552):30, (48.914171, 2.394372): 50}
```

Extraction et traitement des données

Récupération des données de la **BDNB** :

```
df_adr = pd.read_csv('adresse.csv')
df_bat_adr = pd.read_csv('batiment_groupe_adresse.csv')
df_dpe = pd.read_csv('batiment_groupe_dpe_logtype.csv')
df_constr = pd.read_csv('batiment_construction.csv')
```

```
df = pd.merge(df_dpe, df_bat_adr, on = 'batiment_groupe_id')
df = pd.merge(df, df_adr, left_on = 'cle_interop_adr_principale_ban', right_on = 'cle_interop_adr')
df = pd.merge(df, df_constr, on = 'batiment_groupe_id', suffixes=('', 'constr'))
```

Extraction et traitement des données

On ne garde que les bâtiments qui nous intéressent pour la construction du réseau, et on ne garde que les informations utiles pour la suite :

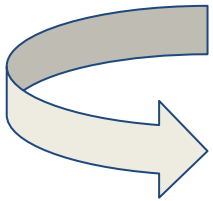
```
df = df[df['libelle_commune'] == ville]
df['adresse'] = df['libelle_adr_principale_ban'].str.split(',').str[0]
df = df[df['adresse'].isin(liste_adresses)]
df = df[['WKT', 'periode_construction', 'mur_u_ext', 'pb_u', 'ph_u','WKTconstr', 'hauteur', 'ch_type_ener_corr', 'adresse']]
```

Création des colonnes “*surface*” et “*périmètre*” :

```
df['surface'] = None
df['perimetre'] = None
for i in df.index:
    a = df['WKTconstr'].loc[i]
    geom = wkt.loads(a)
    df.loc[i, 'surface'] = geom.area
    df.loc[i, 'perimetre'] = geom.length
```

Extraction et traitement des données

Pb : données manquantes (coefficients de transmission thermique)



Année de construction ou d'isolation	H1		H2		H3	
	Effet joule	Autres	Effet joule	Autres	Effet joule	Autres
≤74 ou inconnu	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
75-77	1	1	1,05	1,05	1,11	1,11
78-82	0,8	1	0,84	1,05	0,89	1,11
83-88	0,7	0,8	0,74	0,84	0,78	0,89
89-00	0,45	0,5	0,47	0,53	0,5	0,56
01-05	0,4	0,4	0,4	0,4	0,47	0,47
06-12	0,36	0,36	0,36	0,36	0,4	0,4
≥13	0,23	0,23	0,23	0,23	0,25	0,25

Source : arrêté DPE

```
mat_u_mur = [[2.5,2.5],[2.5,2.5],[1.25,1.33],[0.45,0.5],[0.4,0.4],[0.36,0.36],[0.23,0.23]]
mat_u_bas = [[2,2],[2,2],[1.05,1.16],[0.55,0.5],[0.3,0.3],[0.27,0.27],[0.23,0.23]]
mat_u_haut = [[2.5,2.5],[2.5,2.5],[0.94,0.94],[0.25,0.25],[0.23,0.23],[0.2,0.2],[0.14,0.14]]
dico_annee = {"<1948":0,"1949-1970":1,"1970-1988":2,"1989-1999":3,"2000-2005":4,"2006-2012":5,">2012":6}
```

Extraction et traitement des données

Attribution du “*débit*” :

```
def calcul_debit(surface, perimetre, hauteur, u_mur, u_haut, u_bas):
  puissance = delta_T*(perimetre*hauteur*u_mur+surface*(u_haut+u_bas))
  debit = puissance/(c_p*T*rho)
  return(debit)
```

```
for i in df.index:
    s = df.loc[i,"surface"]
    p = df.loc[i,"perimetre"]
    h = df.loc[i,"hauteur"]
    u_mur = df.loc[i,"mur_u_ext"]
    u_haut = df.loc[i,"ph_u"]
    u_bas = df.loc[i,"pb_u"]
    df.loc[i,"debit"] = calcul_debit(s,p,h,u_mur,u_haut,u_bas)
```

Regroupement des bâtiments par adresse :

```
df = df[["WKT","adresse","debit"]]
df = df.groupby(["WKT","adresse"], as_index= False).sum()
```

Extraction et traitement des données

Pb : les coordonnées sont en Lambert-93

Conversion des coordonnées dans le système des coordonnées usuelles :

```
def conversion (bat):
    a = df['WKT'].loc[bat]
    geom = wkt.loads(a)
    lon, lat = transform(src_crs, dst_crs, geom.x, geom.y)
    return (lat, lon, ox.distance.nearest_nodes(G,lon,lat))
```

```
df['nodes'] = None
for i in df.index:
   lat, lon, node = conversion(i)
   df.loc[i, 'lat'] = lat
   df.loc[i, 'lon'] = lon
   df.loc[i, 'nodes'] = node
df.drop(columns =['WKT'], inplace = True)
lat, lon = coords_source
source =  ox.distance.nearest_nodes(G,lon,lat)
```

Création de l’arbre principal

1. Calcul des plus courts chemins entre les bâtiments et la source
2. Suppression des noeuds en double
3. Simplification de l’arbre
4. Calcul des débits
5. Affichage de la carte

Pondérations du graphe :

Longueur des arêtes **X**

Autoroutes : 1
Nationales : 1,2
Départementales : 1,5
Petites routes ou rue : 1,8
Route de desserte : 2
Autres routes : 2,2

= Poids des arêtes pour le calcul

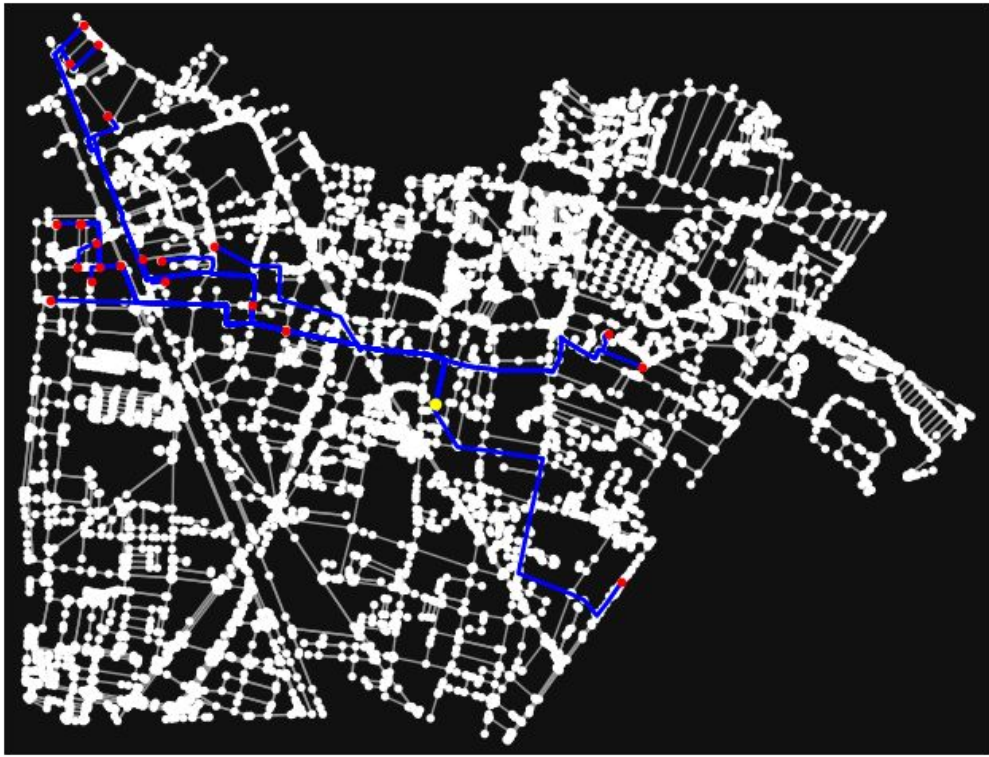
Calcul des plus courts chemins

Pour chaque noeud final, on trouve le plus court chemin grâce à Dijkstra.

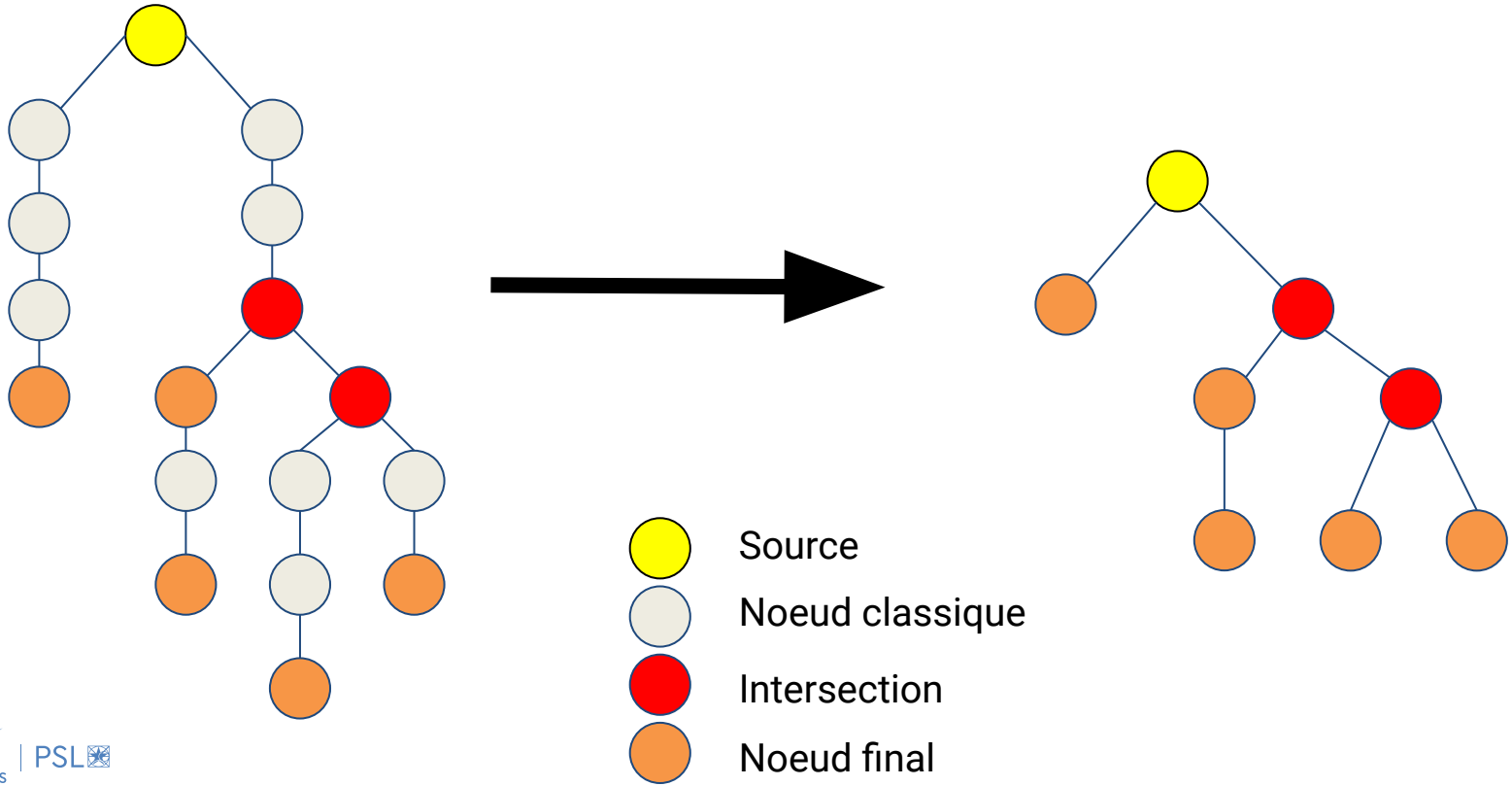
On crée une liste contenant tous les chemins.

Ces chemins passent par les routes (donc aussi par les ponts).

Premier affichage :



Arbre du réseau de chaleur



Simplification de l’arbre et calcul des débits

Nous avons :

- Créé une fonction pour calculer les distances entre deux noeuds.
- Mémorisé chaque longueur des nouvelles arêtes.
- Utilisé une fonction récursive avec une disjonction de cas selon le type de noeud.

Pour les débits :

- Fonction récursive
- Si c’est un noeud final -> débit indiqué dans le dataframe (+ la somme des débits enfants)
- Sinon -> somme des débits enfants

Affichage

- Utilisation de folium
- Fonctions pour trouver la puissance et le diamètre des tuyaux à partir du débit
- Fonction récursive
- Disjonction de cas selon le type de noeud
- Relier le noeud à ces enfants et afficher les données lorsqu'il y a besoin
- Relier tous les noeuds finaux aux bâtiments correspondants

Conclusion

- Cahier des charges rempli
- Affichage lisible

Limites

- Dijkstra cherche le plus court chemin sans prendre en compte les autres noeuds finaux.
- Problèmes de données en entrée lorsqu'on change de zone.

Annexe : code

```python
import osmnx as ox
import pandas as pd
import networkx as nx
import matplotlib.pyplot as plt
from shapely import wkt
from shapely.geometry import Polygon
from pyproj import Proj, transform
import folium
import numpy as np
```

[1] ✓ 10.7s Python

```python
vitesse = 2 # en m/s, représente la vitesse de l'eau dans les tuyaux
delta_T = 26 # en Kelvin, représente l'écart de température intérieur/extérieur qui est pris dans les normes énergétiques
T = 60 # en Kelvin, repésente la température de l'eau dans les tuyaux
rho = 1000 # en kg/m3, représente la masse volumique de l'eau
c_p = 4.18 # en kJ/K/kg, représente la capacité massique de l'eau

# Ici, on a pris arbitrairement la ville d'Aubervilliers, mais tout le paragraphe du dessous est modifiable. On définit la source par ses coordonnées,
# et on définit les bâtiments soit par leurs coordonnées, soit par leur adresse. On peut aussi définir arbitrairement des bâtiments avec des débit fixés en amont
# du calcul réalisé fait par le programme

ville = "Aubervilliers"
coords_source = [48.912, 2.386]
liste_adresses = ['12 rue du colonel fabien', '117 rue de saint denis',
       '105 avenue jean jaures', '31 rue ferragus', '43 rue heurtault',
       '3 rue pierre curie', '14 rue emile augier',
       '19 B chemin du haut saint denis', '21 passage machouart',
       '27 passage machouart', '28 rue claude bernard', '32 B rue bisson',
       '17 rue alphonse daudet', '29 rue alphonse daudet',
       '37 rue alphonse daudet', '20 rue alphonse daudet',
       '6 passage de la justice', '10 rue gaetan lamy',
       '3 rue cesaria evora', '23 rue gaetan lamy', '72 rue du landy',
       '14 rue gaetan lamy']
dic_coords_puis = {(48.913247,2.395552): 30, (48.914171, 2.394372): 50}
```

[2] ✓ 0.0s Python

```python
# Avec le module OSNMX, on importe le graphe de la ville en question, et on enlève "la directionnalité" des chemins (dans le projet, on n'a pas besoin de savoir le sens

G = ox.graph_from_place(ville + ", France", simplify=False)
M = ox.convert.to_undirected(G)
```

[3] ✓ 14.9s Python

```python
# On récupère de manière distincte les noeuds et les arrêtes du graphe pour plus tard

gdf_nodes, gdf_edges = ox.graph_to_gdfs(M)
```

[4] ✓ 0.4s Python

```python
# On instaure 3 matrices de coefficient de transmission thermique, qui retourne le coefficient de transmission thermique adapté en fonction
# de l'année de construction et du moyen de chauffage du bâtiment

mat_u_mur = [[2.5,2.5],[2.5,2.5],[1.25,1.33],[0.45,0.5],[0.4,0.4],[0.36,0.36],[0.23,0.23]]
mat_u_bas = [[2,2],[2,2],[1.05,1.16],[0.55,0.5],[0.3,0.3],[0.27,0.27],[0.23,0.23]]
mat_u_haut = [[2.5,2.5],[2.5,2.5],[0.94,0.94],[0.25,0.25],[0.23,0.23],[0.2,0.2],[0.14,0.14]]
dico_annee = {"<1948":0,"1949-1970":1,"1970-1988":2,"1989-1999":3,"2000-2005":4,"2006-2012":5,">2012":6}
```

[5] ✓ 0.0s Python

```python
# On récupère dans les données de la BDNB de la Seine-Saint-Denis (où se situe Aubervilliers) et on  en garde 4 tableaux de données CSV

df_adr = pd.read_csv('adresse.csv')
df_bat_adr = pd.read_csv('batiment_groupe_adresse.csv')
df_dpe = pd.read_csv('batiment_groupe_dpe_logtype.csv')
df_constr = pd.read_csv('batiment_construction.csv')
```

[6] ✓ 3.7s Python

```python
# On merge ces 4 DataFrame en 1 seul

df = pd.merge(df_dpe, df_bat_adr, on = 'batiment_groupe_id')
df = pd.merge(df, df_adr, left_on = 'cle_interop_adr_principale_ban', right_on = 'cle_interop_adr')
df = pd.merge(df, df_constr, on = 'batiment_groupe_id', suffixes=('', 'constr'))
```

[7] ✓ 0.8s Python

```python
# On sélectionne uniquement les bâtiments de notre réseau, et on ne garde que les colonnes qui nous intéressent pour la suite

df = df[df['libelle_commune'] == ville]
df['adresse'] = df['libelle_adr_principale_ban'].str.split(',').str[0]
df = df[df['adresse'].isin(liste_adresses)]
df = df[['WKT', 'periode_construction', 'mur_u_ext', 'pb_u', 'ph_u','WKTconstr', 'hauteur', 'ch_type_ener_corr', 'adresse']]
```

[8] ✓ 0.0s Python

```python
# A partir de la colonne 'WKTconstr', on détermine la surface ainsi que le périmètre du bâtiment qui seront utiles pour le calcul du débit nécessaire

df['surface'] = None
df['perimetre'] = None
for i in df.index:
    a = df['WKTconstr'].loc[i]
    geom = wkt.loads(a)
    df.loc[i, 'surface'] = geom.area
    df.loc[i, 'perimetre'] = geom.length
```

[9] ✓ 0.0s Python

```python
# On attribue à chacun des bâtiments dont les coefficients de transmission thermique sont inconnus une valeur déterminée par
# l'année de construction et le type de chauffage du bâtiment

df = df.fillna("Non identifie")
for i in df.index:
    type_chauff = df.loc[i,"ch_type_ener_corr"]
    plage_periode = dico_annee[df.loc[i,"periode_construction"]]
    if df.loc[i,"mur_u_ext"] == "Non identifie":
        if type_chauff == "electricite":
            df.loc[i,"mur_u_ext"] = mat_u_mur[plage_periode][0]
        else:
            df.loc[i,"mur_u_ext"] = mat_u_mur[plage_periode][1]
    if df.loc[i,"pb_u"] == "Non identifie":
        if type_chauff == "electricite":
            df.loc[i,"pb_u"] = mat_u_bas[plage_periode][0]
        else:
            df.loc[i,"pb_u"] = mat_u_bas[plage_periode][1]
    if df.loc[i,"ph_u"] == "Non identifie":
        if type_chauff == "electricite":
            df.loc[i,"ph_u"] = mat_u_haut[plage_periode][0]
        else:
            df.loc[i,"ph_u"] = mat_u_haut[plage_periode][1]
```

[10] ✓ 0.0s Python

```
# On créé les colonnes "latitude" et "longitude"

src_crs = Proj(init='epsg:2154')
dst_crs = Proj(init='epsg:4326')
df['lon'] = None
df['lat'] = None
```

[14] ✓ 0.0s Python

```
# Les coordonnées de la BDNB étant en Lambert 93 et pas dans les coordonnées géographiques classiques, il faut les convertir

def conversion (bat):
    a = df['WKT'].loc[bat]
    geom = wkt.loads(a)
    lon, lat = transform(src_crs, dst_crs, geom.x, geom.y)
    return (lat, lon, ox.distance.nearest_nodes(G,lon,lat))
```

[15] ✓ 0.0s Python

```
# On rajoute une colonne "node" qui répertorie le noeud du graphe le "plus proche" de chacune des adresses,
# et on remplit les colonnes "latitude" et "longitude"

df['nodes'] = None
for i in df.index:
   lat, lon, node = conversion(i)
   df.loc[i, 'lat'] = lat
   df.loc[i, 'lon'] = lon
   df.loc[i, 'nodes'] = node
df.drop(columns =['WKT'], inplace = True)
lat, lon = coords_source
source =  ox.distance.nearest_nodes(G,lon,lat)
```

[16] ✓ 1.3s Python

```python
# On crée un DataFrame avec les mêmes données que le précédent pour les bâtiments pour lesquels on a rentré les coordonnées et la puissance.

df1 = pd.DataFrame(index=range(len(dic_coords_puis)), columns=df.columns)
i = 0
for coords in dic_coords_puis.keys():
    lat, lon = coords
    node = ox.distance.nearest_nodes(G,lon,lat)
    puissance = dic_coords_puis[coords]
    debit = puissance/(c_p*T*rho)
    df1.iloc[i] = [str(coords), debit, lon, lat, node]
    i+=1

df = pd.concat([df, df1], ignore_index=True)
```

[17] ✓ 0.0s Python

```python
# On choisit une pondération pour chaque type de route et on crée une longueur pondérée pour chaque arrête (afin de privilégier les gros axes)

pond = {"motorway" : 1, "motorway_link":1, "service" : 2, "primary" : 1.2, "primary_link" : 1.2, "secondary" : 1.5, "secondary_link" :1.5, "tertiary" : 1.8, "tertiary_
gdf_edges['length_pond'] = None
for i in gdf_edges.index:
    gdf_edges['length_pond'].loc[i] = gdf_edges['length'].loc[i] * pond.get(gdf_edges['highway'].loc[i], 2.2)
```

[18] ✓ 2.8s Python

```python
# On récupère les chemins construits grâce à Dijkstra entre tous les noeuds des bâtiments et la source
N = len(df)
shortest_path_edges = []
fig, ax = ox.plot_graph(G, show=False, close=False)
for i in range(N):
    path = nx.shortest_path(M, df['nodes'].iloc[i], source, weight='length_pond')
    path_xs = [gdf_nodes['x'].loc[node] for node in path]
    path_ys = [gdf_nodes['y'].loc[node] for node in path]
    ax.plot(path_xs, path_ys, color='blue', linewidth=2, zorder=4)
    shortest_path_edges.append(path)
# On affiche tous les bâtiments
for i in df['nodes']:
    ax.scatter (gdf_nodes['x'].loc[i], gdf_nodes['y'].loc[i], color='red', s = 10, zorder = 8)
ax.scatter (gdf_nodes['x'].loc[source], gdf_nodes['y'].loc[source], color='yellow', s = 20, zorder = 10)
```

[19] ✓ 2.8s Python

```python
# On crée un arbre qui représente le réseau : la source est la racine, et les enfants de chaque noeud correspondent aux noeux suivants dans le réseau
# (entre le noeud et les bâtiments finaux).
# Chaque apparaît au maximum une seule fois.
dic_arbre = {}
for l in shortest_path_edges:
    for i in range (len(l)-1, 0,-1):
        if l[i] in dic_arbre:
            if not (l[i-1] in dic_arbre[l[i]]):
                dic_arbre[l[i]].append(l[i-1])
        else:
            dic_arbre[l[i]] = [l[i-1]]
```

[20] ✓ 0.0s Python

```python
# On mémorise toutes les distances entre deux noeuds voisins qui sont dans l'arbre
def distance(noeud1, noeud2):
    id = tuple([noeud1,noeud2, 0])
    if id in gdf_edges.index: # On réalise ce test car l'arrête peut aussi bien s'appeler (noeud1, noeud2) que (noeud2, noeud1)
        return gdf_edges['length'].loc[id]
    else :
        id = tuple([noeud2,noeud1, 0])
        return gdf_edges['length'].loc[id]
```

[21] ✓ 0.0s Python

```python
# On simplifie l'arbre en supprimant tous les noeuds qui ne sont ni des intersections (un point ou le réseau se sépare en deux, il y a donc trois branches), ni la sour
def simplifie ():
    dic_simp = {}
    dic_dist = {} # On va devoir mémoriser les distances
    def rec(noeud, parent, dist): # On utilise une fonction récursive pour parcourir tout l'arbre
        if noeud in df['nodes'].unique():# si c'est un noeud final
            dic_simp[parent] = dic_simp.get(parent, []) + [noeud]
            dic_dist[noeud] = dist
            l = dic_arbre.get(noeud, [])
            p = noeud
            for e in l:
                    dist = distance(noeud, e)
                    rec(e, p, dist)
        else: # si c'est une intersection (noeud final ou non)
            l = dic_arbre[noeud]
            if len(l) > 1:
                if noeud != parent:
                    dic_simp[parent] = dic_simp.get(parent, []) + [noeud]
                dic_dist[noeud] = dist
                p = noeud
                for e in l:
                    dist = distance(noeud, e)
                    rec(e, p, dist)
            else :
                p = parent
                suivant = l[0]
                dist += distance(noeud, suivant)
                rec(suivant, p, dist)
        return None
    rec(source, source, 0)
    return (dic_simp, dic_dist)
dic_arbre_simplifie, dic_dist = simplifie()
```

[22] ✓ 0.0s Python

```python
# On calcule le débit nécessaire dans chaque arête
dic_debit = {}
def debit (noeud):
    if noeud in df['nodes'].unique(): # si c'est un noeud final
        d = df[df['nodes'] == noeud]["debit"].sum()
        for i in dic_arbre_simplifie.get(noeud, []):
            d += debit(i) # on additionne tous les débits des arêtes "filles"
        dic_debit[noeud] = d
    else :
        d = 0
        for i in dic_arbre_simplifie[noeud]:
            d += debit(i)
        dic_debit[noeud] = d
    return d

debit(source)
```

[23] ✓ 0.0s Python

```
4.710747414085943
```

```python
# On crée des fonctions qui en fonction du débit, retourne le diamètre de la canalisation (en m) et
# la puissance dans la canalisation (en kW) associés

def diametre (debit):
  return (np.sqrt(debit/(np.pi*vitesse)))
def puissance (debit):
  return(debit*c_p*T*rho*10**(-3))
```

[24] ✓ 0.0s Python

```
from math import *
# On réalise maintenant le tracé du réseau sur la carte, on utilise encore une fois une fonction récursive.

coords_source = [gdf_nodes['y'].loc[source], gdf_nodes['x'].loc[source]]
map = folium.Map(location=coords_source,zoom_start=15)
def trace (noeud):
    if noeud in df['nodes'].unique(): # si c'est le noeud à côté d'un bâtiment final
        coords = [gdf_nodes['y'].loc[noeud], gdf_nodes['x'].loc[noeud]]
        affichage = 'La puissance nécessaire est de ' + str(round(puissance(dic_debit[noeud]),1)) +'kW. \n Soit un débit de ' + str(round(dic_debit[noeud],2)) +'m3/s. '
        folium.Marker(coords, popup = affichage, icon=folium.Icon(color="purple")).add_to(map)
        folium.CircleMarker(location=coords, radius=2, weight=5, color = 'red').add_to(map)
        for suivant in dic_arbre.get(noeud, []):
            sui_coords = [gdf_nodes['y'].loc[suivant], gdf_nodes['x'].loc[suivant]]
            folium.PolyLine([coords, sui_coords], color = 'blue').add_to(map)
            trace(suivant)
    elif not (noeud in dic_arbre_simplifie): # si ce n'est pas une intersection ou pas un bâtiment final
        coords = [gdf_nodes['y'].loc[noeud], gdf_nodes['x'].loc[noeud]]
        suivant = dic_arbre[noeud][0]
        sui_coords = [gdf_nodes['y'].loc[suivant], gdf_nodes['x'].loc[suivant]]
        folium.PolyLine([coords, sui_coords], color = 'blue').add_to(map)
        trace(suivant)
    elif noeud == source: # si c'est la source
        affichage = 'La puissance nécessaire est de ' + str(round(puissance(dic_debit[noeud]),1)) +'kW. \n Soit un débit de ' + str(round(dic_debit[noeud],2)) +'m3/s. '
        folium.Marker(coords_source, popup = affichage, icon=folium.Icon(color="blue")).add_to(map)
        folium.CircleMarker(location=coords_source, radius=4, weight=5, color = 'green').add_to(map)
        for suivant in dic_arbre[noeud]:
            sui_coords = [gdf_nodes['y'].loc[suivant], gdf_nodes['x'].loc[suivant]]
            folium.PolyLine([coords_source, sui_coords], color = 'blue').add_to(map)
            trace(suivant)
    else : # si une intersection
        coords = [gdf_nodes['y'].loc[noeud], gdf_nodes['x'].loc[noeud]]
        affichage = 'La puissance nécessaire est de ' + str(round(puissance(dic_debit[noeud]),1)) +'kW. \n Soit un débit de ' + str(round(dic_debit[noeud],2)) +'m3/s. '
        folium.Marker(coords, popup = affichage, icon=folium.Icon(color="green")).add_to(map)
        folium.CircleMarker(location=coords, radius=2, weight=5, color = 'red').add_to(map)
        for suivant in dic_arbre[noeud]:
            sui_coords = [gdf_nodes['y'].loc[suivant], gdf_nodes['x'].loc[suivant]]
            folium.PolyLine([coords, sui_coords], color = 'blue').add_to(map)
            trace(suivant)
    return None
trace(source)
```

```python
# Pour tous les noeuds d'un bâtiment final, on affiche aussi le bâtiment final ainsi que le trajet entre les deux.
for id in df.index:
    coords = [df.loc[id, 'lat'], df.loc[id, 'lon']]
    folium.CircleMarker(location=coords, radius=3, weight=5, color = 'yellow').add_to(map)
    node = df.loc[id, 'nodes']
    coords_node = [gdf_nodes['y'].loc[node], gdf_nodes['x'].loc[node]]
    folium.PolyLine([coords, coords_node], color = 'green').add_to(map)
map.save('carte_reseau_chaleur.html')
```

[25] ✓ 0.3s Python

Répartition des tâches

- Tom : Recherche d’informations de données physiques et numériques
- Mathis : Traitement des données
- Valentin : Création du réseau et affichage du résultat