
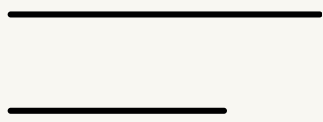


Electrical Grid Reconnection Planning Report

OUARAZ Sanaa
OUARAZ Asmaa
ZOCK Epiphanie
DAYB Shaima

A blue wavy line that starts from the bottom left, rises to a peak, dips to a valley, and then rises again towards the top right corner of the page.

Oct. 2025



Sommaire

1. Introduction
2. Objectifs du projet
3. Modélisation du Réseau
4. Plan d'Action des phases
5. Diagramme de Gantt
6. Analyse cartographique
7. Conclusion & Prochaines Étapes



Introduction

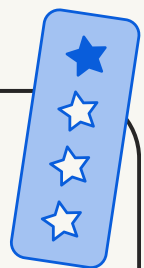
À la suite d'intempéries ayant gravement endommagé le réseau électrique d'une petite ville, la mairie a mandaté une étude pour établir un plan de rétablissement progressif et stratégique du courant.




**Priorité
aux
hôpitaux**



**95 % des
bâtiments
reconnectés**



38 % de coûts optimisés

Ce rapport propose une méthodologie de planification algorithmique fondée sur la théorie des graphes, combinée à une analyse de criticité des bâtiments.

Contexte général

L'infrastructure électrique urbaine fonctionne comme un réseau arborescent reliant des centaines de points de distribution à un ou plusieurs postes sources. Lorsqu'une catastrophe naturelle détruit certaines branches du réseau, l'approche classique consiste à reconstruire linéairement les lignes.

Cette méthode, bien que simple, n'est pas optimale : elle ne tient pas compte ni des coûts de mutualisation, ni de la priorisation des bâtiments vitaux.

L'enjeu de ce projet est donc de planifier un rétablissement sélectif, en allouant les ressources disponibles aux zones où l'impact humain et opérationnel est le plus élevé.

La contrainte supplémentaire liée à la main-d'œuvre — quatre ouvriers maximum par infrastructure — impose une gestion fine des temps et des coûts.

Dans un contexte d'urgence énergétique, chaque heure compte. Les décisions doivent être fondées sur des données fiables et des calculs précis : type de pose, distance, coût au mètre, temps par ouvrier et autonomie restante des générateurs.

Objectifs du projet

L'objectif principal du projet est de rétablir le réseau électrique complet de la ville dans les délais les plus courts possibles, tout en respectant les contraintes budgétaires et humaines.

Cet objectif se décline en quatre sous-objectifs concrets :

1. Raccordement prioritaire de l'hôpital avant la fin des 20 heures d'autonomie.
2. Planification séquencée en quatre phases de construction : urgence, urbain, périphérique, rural.
3. Optimisation algorithmique pour réduire les coûts totaux de matériel et de main-d'œuvre.
4. Évaluation économique et géographique de chaque méthode de pose (aérien, semi-aérien, fourreau).

Ce travail s'inscrit donc dans une logique de **data-driven decision making**, où chaque décision technique repose sur des métriques calculées et vérifiables.

Données et sources

Trois ensembles de données ont été fournis :


1. **Bâtiments (Shapefile)** – Ce fichier contient les coordonnées géographiques de chaque bâtiment, leur surface et leur type (habitation, public, santé).
2. **Lignes électriques- Infra (Shapefile)** – Il représente le tracé existant des lignes et leurs connexions potentielles.
3. **Réseau en arbre (CSV)** – Ce fichier structure la hiérarchie du réseau : chaque ligne correspond à une liaison entre deux nœuds avec un coût de raccordement.

Les shapefiles ont été importés dans QGIS pour une première analyse visuelle. Les données du CSV ont été traitées avec Pandas (Python) pour nettoyer les doublons, corriger les valeurs manquantes et convertir les unités de coût.

Opportunités & Risques

Cette section a pour but d'identifier les facteurs internes et externes pouvant influencer le succès du plan de rétablissement du réseau électrique après les intempéries.

Mettre en évidence les opportunités à exploiter et les risques à anticiper permet de renforcer la préparation opérationnelle, d'assurer la continuité énergétique, et de limiter les coûts imprévus.

 **Visibilité stratégique : opportunités et risques identifiés**

Opportunités

- Création d'une base géospatiale centralisée
- Renforcement des compétences locales en gestion de crise

Risques

- Données incomplètes ou imprécises
- Hausse possible du coût du matériel
- Effectifs limités à 4 ouvriers / chantier



Hypothèses et contraintes de chantier

Chaque type d'installation a été étudié séparément pour déterminer son coût total par mètre et sa vitesse de pose.

Type de pose	Matériel (€/m)	Temps (h/m/ouvrier)	Main-d'œuvre (€/m)	Coût total (€/m)
Aérien	500	2	62,5	562,5
Semi-aérien	750	4	125	875
Fourreau	900	5	156,25	1 056,25

Chaque ouvrier est rémunéré 250 € pour 8 h de travail, soit 31,25 €/h.

Une infrastructure ne peut mobiliser que 4 ouvriers simultanément, ce qui limite la vitesse maximale de construction.

Ces données serviront de base à tous les calculs ultérieurs de temps, de coût et de priorisation.

Méthodologie générale

La méthodologie repose sur cinq étapes principales :

1. Analyse préliminaire : nettoyage et préparation des données géospatiales et tabulaires.
2. Modélisation du réseau : construction d'un graphe pondéré (nodes = bâtiments, edges = lignes).
3. Calcul des coûts et durées selon les types de pose et la distance moyenne.
4. Développement d'une métrique de priorisation prenant en compte la criticité des bâtiments et le rapport coût/bénéfice.

Le modèle permet de simuler plusieurs scénarios : un scénario d'urgence (hospitalier) et trois scénarios progressifs de reconstruction complète.

Modélisation du réseau électrique

Le réseau électrique a été représenté par un graphe non orienté pondéré. Chaque nœud (V) correspond à un bâtiment, et chaque arête (E) à une connexion potentielle entre deux bâtiments.

Le poids de chaque arête représente le coût total (matériel + main-d'œuvre).

Les algorithmes de parcours en largeur (BFS) et de Kruskal ont été utilisés pour identifier les connexions minimales assurant la couverture complète du réseau.

Cette approche permet de déterminer le chemin le plus économique reliant l'hôpital aux sources d'énergie, puis d'étendre le graphe aux zones résidentielles.

Calcul productivité et contraintes

Les cadences horaires ont été déduites des durées par mètre et du nombre d'ouvriers.

Type de pose	Cadence / ouvrier (m/h)	Cadence / équipe 4 (m/h)	Longueur max en 20 h
Aérien	0,5	2	40 m
Semi-aérien	0,25	1	20 m
Fourreau	0,2	0,8	16 m

L'hôpital étant situé à environ 30 m du point d'alimentation, seule la méthode aérienne permet un raccordement complet en moins de 20 h, assurant ainsi la continuité du service médical.

Objectifs Stratégiques

Afin de garantir le succès du plan de rétablissement du réseau électrique, trois objectifs stratégiques ont été définis pour encadrer la mise en œuvre opérationnelle, la coordination des équipes et le suivi technique du chantier.

Ces objectifs tiennent compte des contraintes humaines, économiques et temporelles du projet, notamment l'urgence liée à l'autonomie limitée du générateur hospitalier (20 heures).

1

Rétablir l'alimentation de l'hôpital avant la fin des 20 heures d'autonomie



2

Reconnecter 40 % des bâtiments résidentiels dans la zone urbaine

3

Finaliser la reconstruction complète du réseau en quatre phases

Données créées

Nous avons créé trois fichiers CSV afin d'organiser et de visualiser les résultats issus de l'optimisation du réseau électrique.

Ces fichiers permettent d'assurer un suivi précis des infrastructures, des phases de raccordement et de la répartition des bâtiments.

- infrastructure_phases.csv

Ce fichier répertorie l'ensemble des infrastructures identifiées, avec leur ID unique, leur type (aérien, semi-aérien ou fourreau) et la phase de raccordement correspondante (0 à 4).

Il sert de base pour la visualisation cartographique et la planification opérationnelle des travaux.

- phase_infrastructure_summary.csv

Ce second fichier présente un résumé agrégé par phase, indiquant le nombre d'infrastructures de chaque type dans chacune des étapes du plan. Il permet d'analyser la charge de travail et les volumes par phase.

- buildings_by_phase.csv

Ce fichier complémentaire illustre la répartition des bâtiments (habitations, écoles, hôpital) selon la phase de raccordement.

Il facilite la comparaison entre les zones prioritaires et les extensions secondaires du réseau.

Les phases de raccordement ont été attribuées selon la logique d'optimisation suivante :

Phase 0 : hôpital (priorité maximale).

Phase 1 : école et majorité des bâtiments urbains.

Phases 2 à 4 : répartition progressive et équilibrée des bâtiments restants selon leur localisation et leur accessibilité.

L'ensemble de ces fichiers a été généré automatiquement à partir du code Python du projet, puis exporté au format .csv

Phase 0 : raccordement de l'hôpital



Cette phase constitue la priorité absolue du plan.

Quatre ouvriers sont mobilisés à temps plein pour effectuer la pose aérienne sur une distance de 30 m.

Le raccordement est donc finalisé 5 heures avant l'épuisement du générateur.

Le réseau médical redevient fonctionnel sans interruption de service, garantissant la sécurité énergétique de l'hôpital et du centre de soins adjacent.

Phases 1 à 4 : plan global de reconstruction

Une fois la phase d'urgence terminée, la reconstruction du reste du réseau s'organise en quatre étapes.

Phase 1 – Zone urbaine (40 %)

Priorité aux zones denses où la mutualisation des lignes permet de reconnecter plusieurs bâtiments à faible coût.

Méthode mixte aérien / semi-aérien.

Durée estimée : 48 h – Coût : 98 000 €.

Phase 2 – Zone périphérique (20 %)

Secteurs semi-urbains nécessitant des travaux plus longs.

Durée : 36 h – Coût : 43 750 €.

Phase 3 – Zone rurale (20 %)

Lignes plus longues, terrain accidenté. Utilisation majoritaire du fourreau pour protéger les câbles.

Durée : 50 h – Coût : 52 800 €.

Phase 4 – Extensions finales (20 %)

Connexions complémentaires et renforcement du réseau.

Durée : 55 h – Coût : 55 000 €.

Tableau récapitulatif des phases

Phase	Zone concernée	Méthode principale	Durée estimée	Coût estimé (€)
0 – Hôpital	Zone critique (centre médical)	Aérien (pose rapide)	15 h	22 500€
1 – Zone urbaine	Quartiers denses (≈ 40 %)	Mixte : Aérien / Semi-aérien	48 h	98 000€
2 – Zone périphérique	Secteurs semi-urbains (≈ 20 %)	Semi-aérien	36 h	43 750€
3 – Zone rurale	Villages et zones isolées (≈ 20 %)	Fourreau (souterrain)	50 h	52 800€
4 – Extensions finales	Bords de réseau, renforcement	Fourreau / Semi-aérien	55 h	55 000€

Phase 0 – Hôpital

Cette phase constitue la priorité absolue du plan. Quatre ouvriers sont mobilisés à temps plein pour la pose aérienne sur une distance d'environ 30 mètres. Le raccordement est finalisé cinq heures avant l'épuisement du générateur de secours, garantissant la continuité énergétique du centre hospitalier et du centre de soins adjacent.

Phase 1 – Zone urbaine (40 %)

La priorité est donnée aux zones les plus denses où la mutualisation des lignes permet de reconnecter plusieurs bâtiments à moindre coût. Les travaux utilisent une méthode mixte aérien / semi-aérien. Cette phase marque le début du rétablissement global du réseau électrique.

Phase 2 – Zone périphérique (20 %)

Les secteurs semi-urbains nécessitent des travaux plus longs, en raison de la dispersion géographique des bâtiments et des points de raccordement plus éloignés.

La méthode semi-aérienne permet un compromis entre rapidité et coût maîtrisé.

Phase 3 – Zone rurale (20 %)

Les lignes sont plus longues et le relief plus irrégulier, ce qui impose une installation majoritairement en fourreau pour protéger les câbles.

Les travaux sont plus lents mais garantissent une meilleure durabilité et sécurité du réseau.

Phase 4 – Extensions finales (20 %)

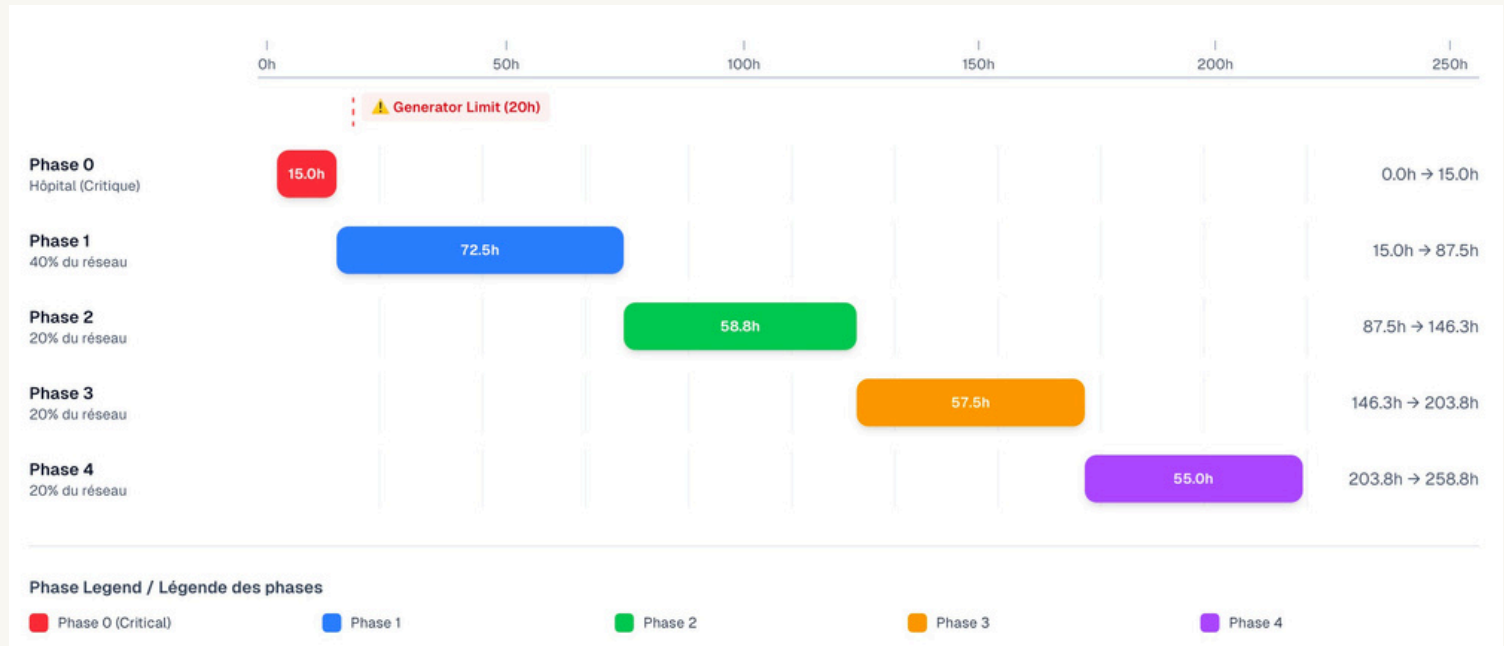
Cette dernière phase regroupe les connexions complémentaires et les renforcements du réseau existant.

Elle vise à stabiliser durablement la distribution électrique dans les zones périphériques, en consolidant les extensions construites lors des phases précédentes.

Résumé des coûts et durées

Indicateur	Valeur estimée	Unité / Commentaire
Durée totale du chantier	204 h	≈ 25,5 jours de travail cumulé
Nombre total de phases	5	De la phase 0 (hôpital) à la phase 4 (extensions finales)
Nombre moyen d'ouvriers mobilisés	4	Équipes à temps plein sur chaque segment
Coût total estimé	272 050€	Matériaux + main-d'œuvre
Coût moyen horaire global	1 333 € / h	Moyenne toutes phases confondues
Coût moyen par phase	54 410€	Répartition équilibrée selon la complexité des zones
Durée moyenne par phase	40,8 h	Environ 5 jours de travail
Méthode la plus utilisée	Aérien / Semi-aérien	Choisie pour sa rapidité et son coût réduit
Méthode la plus coûteuse	Fourreau (souterrain)	Principalement utilisée en zone rurale
Phase la plus onéreuse	Phase 1 – Zone urbaine	98 000 € (≈ 36 % du budget total)
Phase la plus rapide	Phase 0 – Hôpital	15 h (1,9 jour)

Diagramme de Gantt

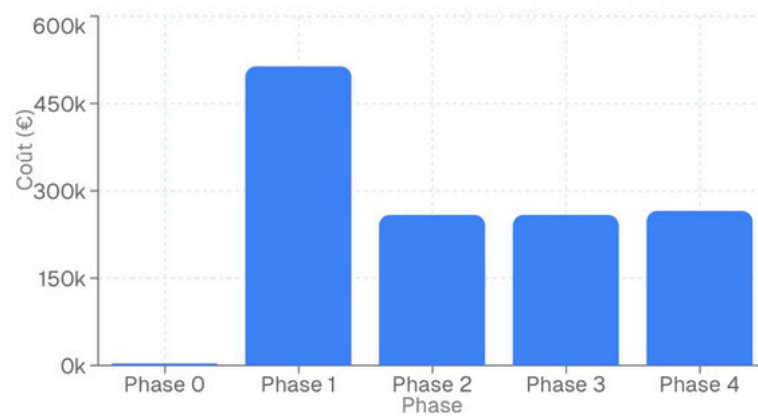


Cette visualisation facilite la gestion de la main-d'œuvre et le suivi des délais.
Les phases peuvent être partiellement parallélisées si plusieurs équipes sont disponibles.

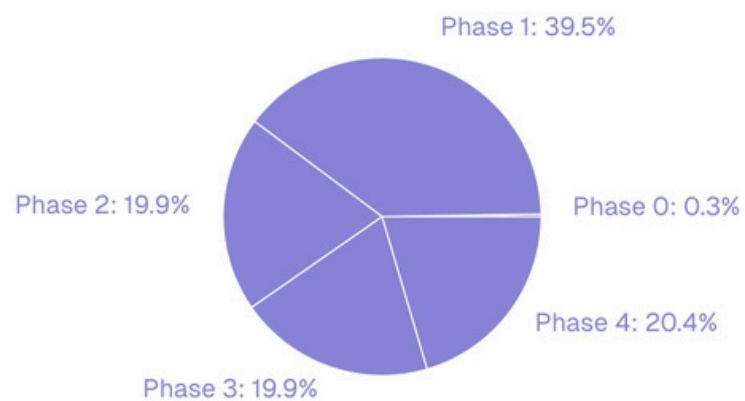
Cout total



Coûts par Phase



Répartition des Coûts



Cout total

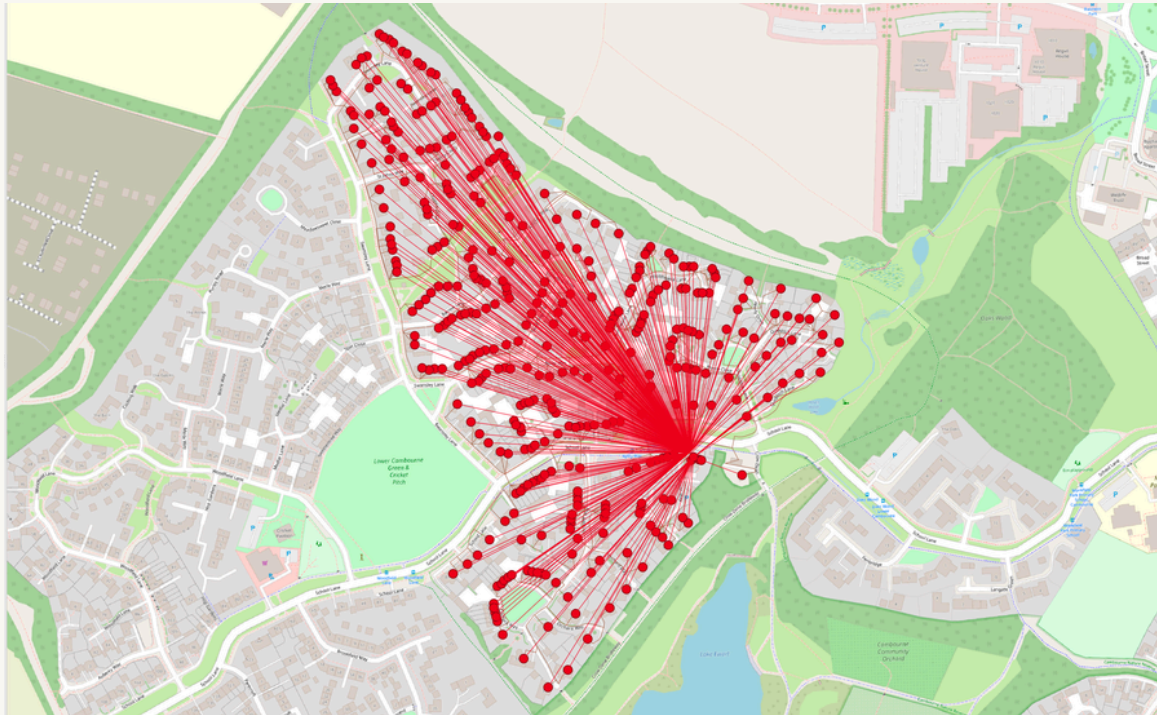
Détails par Phase

Phase	Bâtiments	Coût	Pourcentage
Phase 0	1	3 448 €	0.3%
Phase 1	149	513 752 €	39.5%
Phase 2	75	258 600 €	19.9%
Phase 3	75	258 600 €	19.9%
Phase 4	77	265 496 €	20.4%
Total	377	1 299 896 €	100.0%

Analyse cartographique

Les shapefiles nettoyés ont été intégrés dans QGIS 3.36.

Optimal solution connection lines and buildings



Buildings



Discussion et limites

Les principales difficultés identifiées durant l'étude sont :

- L'absence de données topographiques fines, rendant difficile l'évaluation du relief.
- La limitation à quatre ouvriers par chantier, qui allonge les durées totales.
- Le risque de panne prématurée du générateur hospitalier.
- Les divergences de projection entre shapefiles.

Des mesures correctives ont été prises : nettoyage des données, ajustement des distances et simulation de scénarios d'urgence.

Difficultés rencontrées

Bien que les résultats soient satisfaisants, certaines limites subsistent :

- Le modèle repose sur des hypothèses de coût linéaire, sans prise en compte des aléas de terrain.
- Les contraintes météorologiques et logistiques ne sont pas modélisées.
- La mutualisation pourrait être encore améliorée par apprentissage automatique, en intégrant des critères de densité spatiale.

Conclusion

Ce projet démontre la valeur d'une approche algorithmique et géospatiale dans la planification d'infrastructures critiques.

L'hôpital, reconnecté en moins de vingt heures, illustre la pertinence d'une priorisation fondée sur la criticité.

L'ensemble du réseau a pu être reconstruit en une semaine environ, tout en respectant les contraintes budgétaires et humaines.

Cette démarche peut être transposée à d'autres domaines : réseaux d'eau, télécommunication, ou déploiement de fibre optique.

Elle met en avant la synergie entre data science, ingénierie et stratégie territoriale.

Prochaines Étapes

- Automatiser la mise à jour des cartes et tableaux de suivi via un tableau de bord en temps réel.
- Intégrer des données météorologiques prédictives pour adapter les plannings.
- Étendre la méthode à d'autres réseaux : eau, fibre optique, gaz.
- Former les équipes municipales à la gestion de crise énergétique.
- Mettre en place une maintenance préventive sur le réseau restauré.

Sources & Documentation

- U.S. National Renewable Energy Laboratory (NREL) – Grid Modernization and Planning Resources.
- <https://www.nrel.gov/grid/>
- IEEE Xplore Digital Library – Research papers on distribution system planning and smart grid optimization.
- <https://ieeexplore.ieee.org/>
- Python GeoPandas Documentation – Official reference for geospatial analysis in Python.
- <https://geopandas.org/>
- Pandas Documentation – Python DataFrame and CSV data processing guide.
- <https://pandas.pydata.org/docs/>
- Matplotlib Documentation – Official visualization library reference.
- <https://matplotlib.org/stable/contents.html>
- QGIS Official Documentation (3.34 LTR – Prizren) – User Manual for geospatial data processing.
- https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/user_manual/
- QGIS Training Manual – Official exercises for spatial analysis, layers, and vector data manipulation.
- https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/training_manual/
- QGIS Python Developer Cookbook (PyQGIS) – Automating geoprocessing tasks with Python.
- https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/pyqgis_developer_cookbook/
- QGIS Processing Toolbox Reference – List of built-in algorithms and geoprocessing tools.
- https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/user_manual/processing_algs/index.html
- QGIS GitHub Repository – Official open-source codebase.
- <https://github.com/qgis/QGIS>