UNIVERSITÉ PARIS 8 DES CRÉATIONS

Télédétection

Gaina Mihai
Tadjer Ali

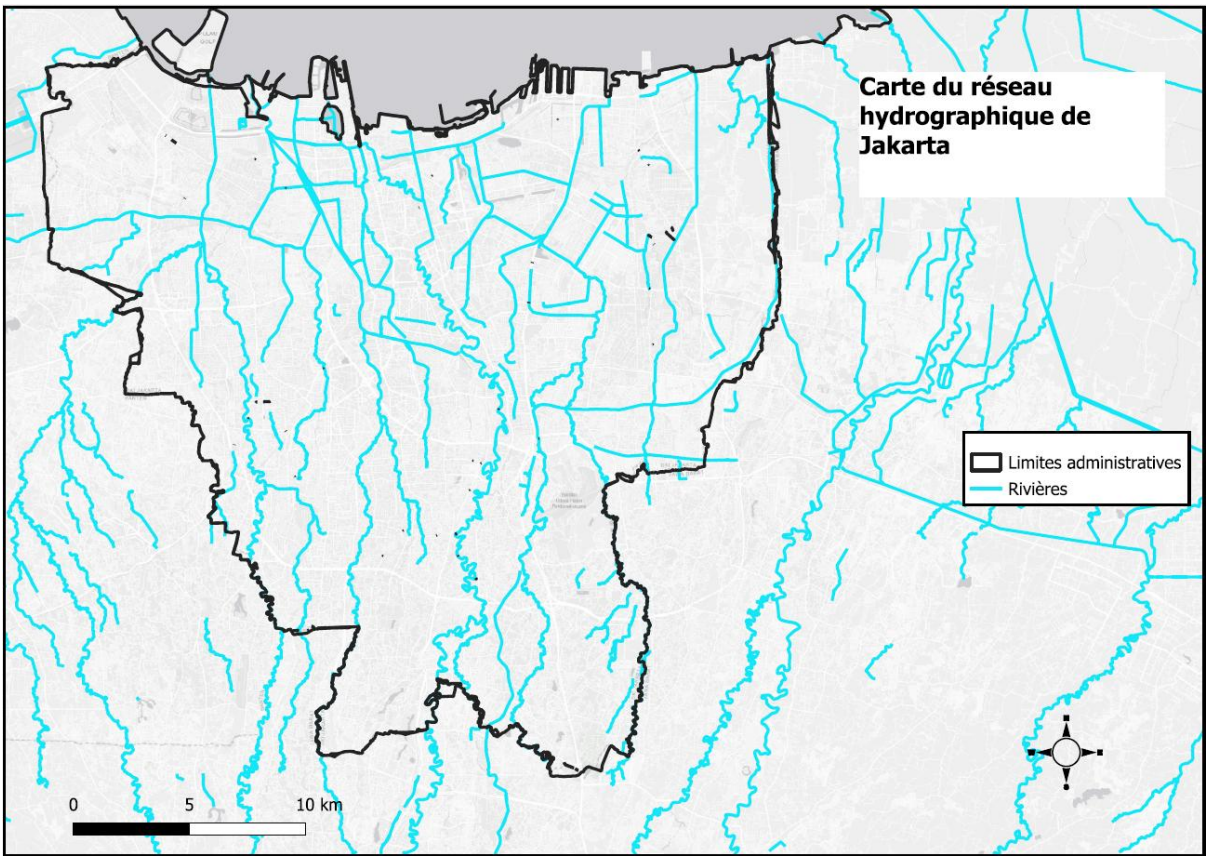
Évaluation de la susceptibilité aux inondations par l'analyse de la perméabilité des sols à Jakarta

Table des matières :

1. Introduction
2. Cadre de l'étude
   2.1 Contexte géographique et climatique Jakarta
   2.2 Pertinence télédétection multi-temporelle (vs relevés terrain impossibles)
   2.3 Question de recherche + hypothèse
3. Données et méthodes
   3.1 Sources : GHSL JRC (1975-2030) et Sentinel-2 (2024-2025)
   3.2 Choix méthodologique du bracketing saisonnier et sélection des dates
   3.3 Pré-traitements et définition de la zone d'étude
   3.4 Indices spectraux et chaîne de traitement automatisée
4. Résultats
   4.1 Évolution urbaine 1975-2030 et justification des seuils morphologiques
   4.2 Cartographie des inondations urbaines de mars 2025
   4.3 Validation méthodologique : bracketing saisonnier versus analyse directe
5. Interprétation et discussion
   5.1 Corrélation urbanisation ↔ inondations
   5.2 Lien avec subsidence (enfoncement 10-15cm/an Jakarta Nord)
   5.3 Limites (résolution, hétérogénéité capteurs, nuages résiduels)
   5.4 Perspectives (Nusantara, politiques adaptation)
6. Conclusion

I. Introduction

Capitale de l'Indonésie et devenue la première mégapole mondiale en 2025, Jakarta a connu un développement urbain sans précédent au cours des dernières décennies. Située sur la côte nord de l'île de Java, la ville s'étend sur une plaine alluviale naturellement vulnérable, au confluent de treize fleuves et de la mer de Java. La cartographie ci-après (voir fig.1) illustre parfaitement bien la densité du réseau hydrographique.



(Fig.1)

Cette configuration géographique, combinée à l'intensité des pluies de mousson, expose la ville à des inondations récurrentes. Toutefois, ces facteurs naturels ne sont plus les seuls responsables de la crise hydrologique actuelle : l'urbanisation fulgurante a transformé la topographie de la ville en une vaste surface imperméable, aggravant ainsi cette problématique. Aujourd'hui, sous l'effet du réchauffement climatique, cette situation géographique place la métropole en première ligne face au risque d'inondation. C'est dans ce contexte d'urgence que notre cabinet, spécialisé dans le traitement d'images satellitaires pour l'aide à la décision, a été missionné. L'enjeu est crucial car l'aggravation des inondations s'explique en partie par l'urbanisation fulgurante de la ville : en moins de cinquante ans, l'imperméabilisation quasi totale des sols passée de 40,9 % à 97 % a brisé l'équilibre hydrologique de la région (Poulain, 2022).

Notre expertise repose sur une analyse multi-temporelle de l'imperméabilisation des sols, à travers une étude de la dynamique de croissance de la tache urbaine. Cette approche permet de quantifier, sur le long terme, le processus de substitution des zones d'absorption naturelle par des surfaces bâties, réduisant les capacités de drainage naturel du territoire.

Pour illustrer cette évolution, nous avons intégré une étude de cas portant sur les inondations majeures survenues en mars 2025. Cet exemple servira à matérialiser la corrélation directe entre le scellement des sols et la rétention d'eau en milieu urbain dense, fournissant une preuve de l'aggravation de la vulnérabilité face au risque d'inondation

Pour clarifier notre étude de l'évolution de l'urbanisation, nous avons sélectionné quatre dates clés, traitées en saison sèche pour garantir une visibilité optimale. L'année 1975 sert d'état de référence, correspondant au début de la croissance planifiée sous l'ère Soeharto où l'emprise urbaine restait contenue et les zones d'expansion de crue encore fonctionnelles (Poulain, 2022). Le second pivot, en 1990, illustre le « miracle indonésien » et un boom économique sans précédent entraînant une première explosion du bâti vers la périphérie (Dietrich, 2020). Nous avons ensuite sélectionné l'année 2005 comme jalon intermédiaire : cette période marque un seuil de rupture où l'imperméabilisation des sols atteint des niveaux records, annonçant l'incapacité d'absorption des précipitations extrêmes qui conduiront à la catastrophe de 2007 (Texier, 2007). Enfin, nous finirons par une image récente datant de 2020 qui dresse le constat d'une métropole dont l'état de saturation absolue couplé à l'enfoncement du sol justifie aujourd'hui le projet politique de transfert de la capitale vers Bornéo (Dietrich, 2020).

Cette trajectoire historique, marquée par une mutation des états de surface, nous conduit à placer l'anthropisation au centre de cette situation. Dès lors, nous nous demanderons : Dans quelle mesure la transformation radicale du paysage urbain de Jakarta depuis cinquante ans a-t-elle structurellement redéfini la dynamique des crues, faisant de l'imperméabilisation artificielle des sols l'un des moteurs principaux de la vulnérabilité actuelle de la métropole ?

2.1 Cadre de l’étude

2.1. Contexte socio-économique, géographique et climatique

Poumon économique et financier du pays, la métropole de Jakarta concentre les pouvoirs et produit à elle seule environ 17 % du Produit Intérieur Brut (PIB) indonésien, s'imposant ainsi comme la province au revenu par habitant le plus élevé d'Indonésie (Dietrich, 2020). Tirant profit du « miracle asiatique » amorcé dans les années 1970, la ville s'est insérée dans la mondialisation financière, ce qui s'est traduit spatialement par la construction de nombreuses skylines (tours d'affaires) et de gigantesques centres commerciaux, ou malls (Poulain, 2022).

Cependant, cette richesse statistique masque de profondes inégalités socio-économiques. Si le taux de pauvreté officiel de Jakarta est d'environ 4 %, ce qui est largement inférieur à la moyenne nationale (Dietrich, 2020 ; Poulain, 2022), l'indice de Gini dans le centre-ville atteint le score de 1, traduisant des inégalités extrêmes (Poulain, 2022). Le développement de la ville s'apparente en réalité à une « modernisation conservatrice » qui favorise la croissance économique mais perpétue la précarité et la ségrégation des plus démunis (Dietrich, 2020).

La situation sociale se caractérise par des conditions de vie extrêmement contrastées entre ségrégation spatiale et urbaine. L'hyper-centre et les quartiers aisés cohabitent avec de nombreux kampungs (quartiers d'habitat traditionnel) et des quartiers informels ou bidonvilles, qui subissent des expulsions régulières au nom de la modernisation de la ville (Texier, 2007 ; Dietrich, 2020).

On observe également un accès très inégal aux services de base. Les investissements publics dans les infrastructures urbaines ont historiquement été très faibles, représentant moins de 0,5 % du PIB indonésien (Dietrich, 2020). La gestion des services d'eau a favorisé les quartiers aisés solvables tout en excluant les zones informelles, obligeant de nombreux habitants pauvres, sans accès à l'eau courante ni à l'assainissement, à acheter de l'eau en bouteille (Dietrich, 2020).

Jakarta est marquée par une politique d’aides inadaptées et stigmatisantes. Les programmes de lutte contre la pauvreté (comme l'installation de fosses septiques) demandent souvent une participation financière qui exclut de fait les plus démunis (Dietrich, 2020). De plus, les populations pauvres subissent une stigmatisation de la part des autorités et des ONG, qui jugent leurs pratiques quotidiennes comme « non urbaines » et cherchent à les « éduquer » pour en faire de « bons urbains » (Dietrich, 2020).

Enfin, la vulnérabilité environnementale aggrave la pauvreté. Les populations précaires, souvent installées sur les berges des rivières et canaux, sont les premières victimes des inondations chroniques (Texier, 2007), Les constructions lourdes destinées aux classes aisées (comme les malls) imperméabilisent les sols et renvoient les eaux de ruissellement vers les quartiers pauvres situés en contrebas (Texier, 2007). Lors des crues, ces habitants subissent des pertes économiques dramatiques, telles que la destruction de leurs habitations ou la perte de leurs outils de travail comme les motos ou les échoppes (Texier, 2007). Pour s'adapter, ils sont contraints de financer eux-mêmes la surélévation de leur plancher, réduisant ainsi leur espace vital, certains finissant par vivre sous moins d'1,50 mètre de hauteur de plafond (Texier, 2007).

La géographie de Jakarta se caractérise par une configuration naturelle extrêmement complexe qui, combinée aux dynamiques climatiques, en fait un territoire particulièrement vulnérable.

La ville de Jakarta se situe sur la côte nord de l'île de Java (Ariyora et al., 2015). Elle s'étend sur une plaine alluviale et d'anciens marécages (Poulain, 2022). Elle possède une topographie déprimée (en forme de cuvette). Elle se trouve au point de convergence des pentes du complexe volcanique de Pangrango-Salak (culminant à plus de 3 000 mètres au sud de Bogor) qui descend vers la zone urbaine (Texier, 2007). Actuellement, près de 40 % de la superficie de la ville se situe sous le niveau de la mer (Ariyora et al., 2015). De plus, la ville est située au cœur de la « ceinture de feu du Pacifique », sur une zone de subduction où la plaque océanique plonge sous la plaque continentale, ce qui l'expose à une forte activité sismique (Fau, 2018, cité par Poulain, 2022, p. 21).

C’est également un carrefour hydrologique complexe car traversé par 13 rivières et la présence de la mer. La ville est construite sur une formation deltaïque où 13 fleuves et rivières se rejoignent pour se jeter dans la baie de Jakarta (Texier, 2007). Parmi ces cours d'eau, le fleuve Ciliwung est le plus important (avec un bassin versant de 347 km²) et le principal contributeur au risque d'inondation (Mahfudz et al., 2024). À ce réseau naturel dense s'ajoute un vaste réseau de canaux artificiels, construits sous l'époque coloniale hollandaise et connectés aux drains naturels.

Jakarta est soumis à un climat tropical humide de mousson (Texier, 2009). Ce climat apporte de manière saisonnière des précipitations dont la moyenne atteint 4 500 mm par an sur l'île de Java. Lors de la saison des pluies, qui s'intensifie souvent entre décembre et février, les précipitations se démarquent par leur violence et leur forte intensité (Poulain, 2022). À titre d'exemple, lors des inondations catastrophiques de janvier 2020, les précipitations ont atteint le record historique de 377 mm en une seule journée (Mahfudz et al., 2024).

L'une des plus grandes spécificités géographiques actuelles de Jakarta est sa géomorphologie instable, lourdement aggravée par l'activité humaine. La frange littorale de la ville compte parmi les zones les plus subsidentes au monde (Dietrich, 2020). Sous l'effet combiné du poids écrasant de la métropole (verticalisation, infrastructures lourdes) et du pompage massif des eaux dans les nappes souterraines profondes, le sol de Jakarta s'affaisse. Dans certaines zones, la ville s'enfonce à une vitesse vertigineuse de 25 cm par an (Dietrich, 2020).

Aujourd'hui, l'imperméabilisation des sols empêche l'eau des moussons de s'infiltrer et la précipite vers cette cuvette urbaine, tandis que la mer de Java s'engouffre sur les côtes affaissées lors des grandes marées (Dietrich, 2020). En raison de ces spécificités géographiques et de l'enfoncement continu du sol, les projections estiment qu'en 2050, 95 % de la superficie de Jakarta se trouvera au niveau de la mer ou en dessous (Poulain, 2022).

2.2 Pertinence d’une analyse multi-temporelle via la télédétection

L'étude des dynamiques urbaines et environnementales d'une métropole aussi vaste et complexe que Jakarta impose des défis méthodologiques que les relevés de terrain classiques ne peuvent relever seuls. La difficulté majeure réside dans l'impossibilité d'effectuer des observations directes et exhaustives sur une surface de plusieurs centaines de kilomètres carrés de manière régulière. L'accès à certaines zones, notamment les

quartiers informels ou les berges densément bâties, rendant la collecte de données à la fois difficile et coûteuse.
Dans ce contexte, la télédétection s'impose comme une alternative indispensable, offrant une vision synoptique et répétitive du territoire (Poulain, 2022). Elle permet d'observer l'espace urbain dans sa globalité et de s'affranchir des obstacles physiques au sol, tout en fournissant des mesures homogènes et comparables sur l'ensemble du territoire étudié.
L'intérêt principal de cette technologie pour notre mission réside dans sa capacité à réaliser des analyses multi-temporelles. En comparant des images satellitaires acquises à plusieurs décennies d'intervalle, nous pouvons reconstituer avec précision la trajectoire de l'artificialisation des sols, là où les archives administratives ou cartographiques sont parfois incomplètes ou hétérogènes. Cette profondeur historique est essentielle pour quantifier le passage d'un sol perméable à une surface bétonnée à 97 %, transformant ainsi une évolution spatiale visible en une donnée statistique rigoureuse au service de l'analyse des risques (Poulain, 2022).
Au-delà de la simple observation du bâti, la télédétection permet de caractériser finement les changements d'états de surface par le biais d'indices spectraux spécifiques. L'usage de l'imagerie satellitaire, avec le programme Landsat pour l'aspect historique ou Sentinel pour la précision actuelle, offre la possibilité de distinguer les zones étudiées avec précision.
Cette approche scientifique permet de mettre en évidence la corrélation directe entre l'étalement urbain incontrôlé et l'obstruction des couloirs naturels d'évacuation des eaux (Texier, 2007). En somme, la télédétection multi-temporelle ne se contente pas de cartographier la ville ; elle devient un outil de diagnostic dynamique capable d'illustrer la rupture des équilibres hydrologiques et de fournir des preuves objectives de l'aggravation de la vulnérabilité de Jakarta face aux inondations récurrentes (Mahfudz et al., 2024).

2.3 Hypothèses et questions de recherche

En nous appuyant sur la littérature scientifique décrivant une mutation brutale de l'occupation du sol à Jakarta, nous formulons l'hypothèse que l'expansion massive du bâti constitue l’un des facteurs clés de l'aggravation des inondations. Nous supposons que le territoire a perdu sa fonction naturelle d'absorption, transformant chaque précipitation en un ruissellement immédiat que les réseaux de drainage ne peuvent plus contenir. L’utilisation des outils d'observation spatiale nous permettra alors de quantifier avec précision la trajectoire de l'étalement urbain afin de démontrer que cette réalité se manifeste concrètement lors de l'épisode de mars 2025. Nous postulons que la stagnation des eaux sera directement corrélée aux zones à forte densité urbaine, prouvant ainsi que l'urbanisation est devenue le moteur principal de la vulnérabilité de la métropole.

3. Données et méthodes

3.1 Sources : GHSL JRC (1975-2030) et Sentinel-2 (2024-2025)

Notre étude mobilise deux jeux de données complémentaires, articulés autour d'un même objectif : documenter la trajectoire de l'urbanisation de Jakarta sur le temps long et caractériser sa vulnérabilité actuelle aux inondations. Le premier jeu, qui constitue notre fond historique, est le produit GHS-BUILT-S R2023 A du Global Human Settlement Layer (Pesaresi & Politis, 2023), élaboré par le Joint Research Centre de la Commission Européenne. Cette base de données fournit, à l'échelle mondiale et à une résolution de 100 mètres, la surface bâtie au sol exprimée en mètres carrés par pixel. Sa profondeur temporelle constitue son atout majeur : nous disposons de cinq millésimes (1975, 1990, 2005, 2020 et une projection 2030) sur une grille spatiale rigoureusement identique, ce qui permet une comparaison sans biais cartographique sur cinquante-cinq ans. Les époques antérieures à 2020 sont issues de l'imagerie Landsat à 30 mètres, tandis que la couche 2020 mobilise Sentinel-2 à 10 mètres ; la projection 2030 est produite par modélisation à partir de la trajectoire observée.

Le second jeu de données est constitué de scènes Sentinel-2 acquises dans le cadre de la mission Copernicus opérée par l'Agence Spatiale Européenne (Drusch et al., 2012). Le capteur MultiSpectral Instrument (MSI) embarqué sur les satellites Sentinel-2A et Sentinel-2B délivre treize bandes spectrales à des résolutions comprises entre 10 et 60 mètres, avec un temps de revisite de cinq jours pour la constellation complète. Pour notre analyse de l'événement de mars 2025, nous mobilisons cinq bandes : le bleu (B2), le vert (B3), le rouge (B4), le proche infrarouge (B8) et le moyen infrarouge SWIR1 (B11). Ces bandes permettent à la fois la production de compositions colorées d'interprétation et le calcul des indices spectraux décrits en section 3.4. Les images sont téléchargées au niveau de produit L2A, soit après correction atmosphérique automatique délivrant des valeurs de réflectance de surface.

L'articulation des deux sources est cohérente avec notre problématique. Le GHSL fournit la trajectoire historique de l'urbanisation, indispensable pour caractériser l'imperméabilisation progressive du territoire ; Sentinel-2, avec sa résolution fine et sa fréquence de revisite, permet la détection cartographique de l'événement d'inondation et son rapprochement immédiat avec le tissu urbain bâti.

3.2 Choix méthodologique du bracketing saisonnier et sélection des dates

Le caractère optique passif de Sentinel-2 implique une limitation structurelle pour notre étude : la présence de nuages bloque toute observation de la surface. Or, Jakarta est soumise à un climat tropical équatorial dont la saison humide, particulièrement marquée entre novembre et mars, se caractérise par une couverture nuageuse fréquemment supérieure à cinquante pour cent du territoire (Texier, 2009). Les images Sentinel-2 acquises dans la fenêtre temporelle immédiate de l'événement du 14 mars 2025 sont, de fait, inexploitables : aucune scène disponible pour la période février-mars 2025 ne présente une couverture nuageuse inférieure à cinquante pour cent sur la zone d'intérêt. Une approche directe, consistant à comparer une image immédiatement antérieure à une image immédiatement postérieure à l'inondation, ne peut donc pas être conduite dans des conditions radiométriques satisfaisantes.

Face à cette contrainte, nous avons retenu une stratégie alternative dite de bracketing saisonnier, qui consiste à comparer une image acquise avant la saison humide à une image acquise après celle-ci. Cette approche modifie la nature du signal mesuré : nous ne capturons plus l'emprise instantanée d'une crue mais l'ensemble des surfaces où l'eau persiste plusieurs semaines après la décrue. Ce déplacement méthodologique est, dans le contexte de notre problématique, plus fécond qu'il ne paraît : il nous permet d'identifier les zones de vulnérabilité hydrique chronique, c'est-à-dire les secteurs où le drainage est structurellement déficient et où une intervention publique d'aménagement serait prioritaire. Pour un objectif d'aide à la décision, cette information opérationnelle est plus utile que la simple cartographie d'un événement instantané.

Deux scènes Sentinel-2 ont été retenues sur la tuile T48MYU, qui couvre intégralement Jakarta et son aire métropolitaine. La première, datée du 25 octobre 2024, correspond à la fin de la saison sèche précédant l'événement et présente une couverture nuageuse inférieure à dix pour cent sur la zone d'intérêt ; elle constitue notre état de référence. La seconde, datée du 28 mai 2025, correspond au début de la saison sèche suivante, soit environ deux mois après le pic d'inondation du 14 mars ; sa couverture nuageuse est également inférieure à dix pour cent. L'écart de sept mois entre les deux acquisitions encadre l'intégralité de la saison humide 2024-2025 et permet, par différence, de mettre en évidence les surfaces transformées de non-eau à eau persistante.

3.3 Pré-traitements et définition de la zone d'étude

Les scènes Sentinel-2 sont acquises au niveau de produit L2A, ce qui signifie qu'elles ont déjà fait l'objet d'une correction atmosphérique automatique par l'algorithme Sen2Cor déployé par l'ESA. Les valeurs radiométriques disponibles sont donc des réflectances de surface, directement exploitables pour le calcul d'indices spectraux. Aucun pré-traitement atmosphérique supplémentaire n'a été appliqué.

Trois opérations préparatoires ont néanmoins été conduites pour homogénéiser les données, conformément à la méthodologie enseignée dans le cadre du cours de télédétection (Dupayas, 2026). Tout d'abord, la bande B11 (SWIR1), nativement à vingt mètres de résolution, a été rééchantillonnée à dix mètres par interpolation bilinéaire afin de pouvoir être empilée avec les bandes du visible et du proche infrarouge nativement à dix mètres. Cette opération ne crée pas d'information nouvelle mais conditionne la possibilité d'effectuer des opérations algébriques pixel à pixel sur l'ensemble de la pile multi-bandes. Ensuite, les cinq bandes retenues (B2, B3, B4, B8, B11) ont été concaténées en un raster GeoTIFF multi-bandes par date, ce qui produit deux piles homogènes de cinq bandes chacune. Enfin, ces piles ont été clippées sur l'emprise de notre zone d'étude.

Cette zone d'étude (Region of Interest) a été définie comme un rectangle de quarante kilomètres sur quarante centré sur le centre historique de Jakarta, soit une superficie d'environ mille cent quatre-vingt-six kilomètres carrés. Elle englobe le port de Tanjung Priok au nord, le centre administratif de Menteng au sud-est, et les franges urbaines vers Tangerang à l'ouest et Depok au sud, couvrant ainsi une portion représentative de l'agglomération Jabodetabek. Le système de référence retenu pour les traitements est l’EPSG :32748 (UTM Zone 48 Sud), conforme aux préconisations cartographiques pour cette latitude. La réduction du volume de données à environ cent cinquante mégaoctets par scène a permis d'accélérer significativement l'ensemble des calculs ultérieurs.

3.4 Indices spectraux et chaîne de traitement automatisée

Le cœur de notre méthodologie repose sur le calcul de cinq indices radiométriques qui exploitent les contrastes de réflectance entre bandes pour isoler des objets thématiques spécifiques. Le premier, l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), proposé par Rouse et al. (1974), exploite l'opposition entre la forte réflectance végétale dans le proche infrarouge et l'absorption chlorophyllienne dans le rouge ; il constitue l'indice de référence pour la cartographie de la végétation. Le second, le NDWI de McFeeters (1996), s'appuie sur l'absorption forte de l'eau dans le proche infrarouge pour discriminer les surfaces aquatiques des surfaces terrestres. Le troisième, le SAVI proposé par Huete (1988), corrige le NDVI dans les zones où la couverture végétale est partielle et où la réflectance du sol nu influence le signal.

Ces trois indices classiques présentent une limite bien documentée pour l'analyse des inondations en milieu urbain dense : la forte réflectance des surfaces bâties dans le proche infrarouge conduit à une confusion fréquente entre eau et bâti dans le NDWI. Pour contourner cette difficulté, Xu (2006) a proposé une modification de l'indice consistant à substituer la bande SWIR à la bande NIR. Le MNDWI (Modified NDWI) qui en résulte exploite la très faible réflectance des surfaces minérales urbaines dans le SWIR, ce qui restaure le contraste entre l'eau et le tissu urbain et autorise une cartographie fiable des étendues d'eau urbaines, y compris turbides — situation typique des inondations tropicales. Cette propriété justifie le choix du MNDWI comme indice principal pour notre cartographie des zones inondées de Jakarta. Enfin, le NDBI (Zha et al., 2003) inverse la logique du NDVI en exploitant la réflectance SWIR supérieure à la réflectance NIR des surfaces bâties ; il est mobilisé en aval de notre pipeline pour filtrer les surfaces inondées appartenant au tissu urbain.

L'enchaînement complet des traitements appliqués à chacune des deux dates Sentinel-2 se compose de sept étapes, calé sur la méthodologie des travaux dirigés sur Yilou (Burkina Faso) et Vitrolles (Bouches-du-Rhône) réalisés au cours du semestre (Dupayas, 2026). Après le rééchantillonnage de la bande SWIR et la concaténation des cinq bandes, la pile est découpée sur la zone d'étude. Trois compositions colorées sont alors produites pour interprétation visuelle : une composition vraies couleurs (R-V-B = B4-B3-B2), une composition infrarouge couleur (R-V-B = B8-B4-B3) qui fait apparaître la végétation en rouge vif et l'eau en noir profond, et une composition infrarouge agriculture (R-V-B = B11-B8-B4) qui maximise la discrimination entre sol nu, végétation et eau. Les cinq indices sont ensuite calculés, puis les différences temporelles (delta-MNDWI et delta-NDBI) sont dérivées par soustraction pixel à pixel entre les deux dates. La dernière étape consiste en une classification supervisée par algorithme Random Forest, implémentée via la chaîne Orfeo Toolbox, qui produit une carte d'occupation du sol en quatre classes (eau, végétation, urbain, sol nu) à partir d'un échantillon d'entraînement de cinquante polygones par classe digitalisés manuellement.

L'ensemble du pipeline a été automatisé en langage Python via les API PyQGIS et Orfeo Toolbox, ce qui garantit la reproductibilité bout-en-bout du calcul. Cette automatisation est un atout méthodologique : elle permet d'appliquer la même chaîne de traitement à de nouvelles dates sans intervention manuelle, ouvrant la voie à un suivi annuel régulier de la vulnérabilité post-événement.

4. Résultats

4.1 Évolution urbaine 1975-2030 et justification des seuils morphologiques

L'analyse de la dynamique d'urbanisation de Jakarta repose sur le traitement des cinq millésimes du produit GHS-BUILT-S R2023 A. Pour chacune des cinq dates retenues (1975, 1990, 2005, 2020 et 2030), nous avons appliqué une chaîne de traitement raster complète : téléchargement des tuiles natives, découpe sur l'emprise de Jakarta, reclassification du raster continu en cinq classes morphologiques, conversion en vecteur par polygonisation, calcul des statistiques zonales par classe et par millésime, dérivation des taux annuels d'évolution, et production cartographique. Soit, au total, sept étapes par millésime, appliquées à cinq époques.

La question de la définition des classes morphologiques mérite un développement spécifique, car elle conditionne directement l'interprétation des résultats. La donnée GHSL native est un raster continu dont les valeurs représentent la surface bâtie en mètres carrés par pixel de cent mètres sur cent. Pour produire des classes interprétables, il est nécessaire de définir des seuils. Deux approches ont été conjuguées. La première, statistique, consiste à appliquer la méthode des ruptures naturelles de Jenks (Jenks, 1967), qui identifie les discontinuités significatives dans la distribution observée des valeurs ; cette méthode est défendable scientifiquement car elle s'ajuste à la réalité empirique du territoire étudié. La seconde, réglementaire, consiste à valider les seuils ainsi obtenus par référence au cadre officiel d'aménagement urbain de Jakarta, formalisé dans le Pergub no 31 de 2022 (Gubernur DKI Jakarta, 2022). Ce règlement structure le zonage de la métropole autour du Coefficient d'Emprise au Sol (KDB), qui correspond exactement à la métrique mesurée par GHS-BUILT-S, et définit plusieurs paliers réglementaires : zones d'espaces verts (RTH) avec un KDB inférieur à quinze pour cent, zones de transports et d'équipements (TR, KT) autour de trente à quarante pour cent, zones de logement haute densité (R-2) entre quarante et soixante pour cent, et zones de logement très haute densité (R-1) au-delà de soixante pour cent, pouvant atteindre cent pour cent dans le centre historique sur les parcelles de petite taille. Notre classification finale en cinq paliers — non bâti, bâti diffus, urbain moyen, urbain dense, très dense — correspond ainsi à la fois à la méthode statistique de Jenks et aux paliers réglementaires du Pergub, ce qui en garantit la solidité méthodologique.

Les résultats cartographiques mettent en évidence une trajectoire spatiale en deux phases. En 1975, Jakarta présente une agglomération encore relativement contenue, organisée autour d'un noyau urbain dense au nord, à proximité du port et du centre historique, avec des satellites identifiables comme Tangerang à l'ouest et Depok au sud. En 1990, l'expansion spatiale est massive : les villes-satellites se sont fortement étendues et les espaces interstitiels commencent à se combler. En 2005, la mégapole est constituée et le tissu urbain est continu sur plusieurs dizaines de kilomètres. À partir de cette date, la trajectoire change de nature : les surfaces bâties additionnelles deviennent marginales par rapport à la densification interne du tissu déjà en place. La carte 2020 confirme cette tendance, et la projection 2030 montre une métropole qui a presque entièrement comblé ses interstices.

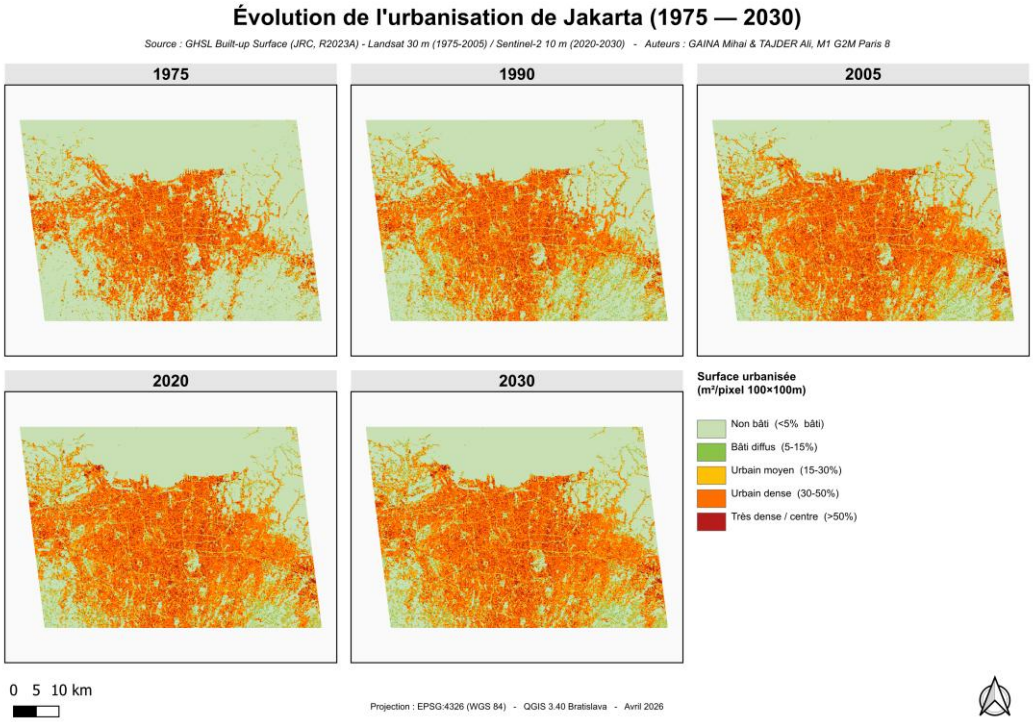


Figure 2 — Évolution observable et projetée de l'urbanisation de Jakarta — 1975-2030 (GHS-BUILT-S R2023 A, JRC).

Les chiffres consolidés par classe et par millésime illustrent quantitativement cette trajectoire. La surface bâtie totale, qui s'élevait à 382,8 kilomètres carrés en 1975, a progressé à 454,9 kilomètres carrés en 1990, soit une augmentation de 18,8 % ; elle atteint 541,8 kilomètres carrés en 2005 (plus 11,5 %), 580,8 kilomètres carrés en 2020 (plus 7,2 %), et la projection 2030 la situe à 587,6 kilomètres carrés, soit seulement plus 1,2 % par rapport à 2020. Exprimés en taux annuels, ces chiffres révèlent une décélération nette : 1,16 % par an entre 1975 et 1990, 1,17 % par an entre 1990 et 2005, 0,46 % par an entre 2005 et 2020, et seulement 0,12 % par an pour la décennie 2020-2030. En vingt ans, le rythme d'expansion spatiale a été divisé par dix.

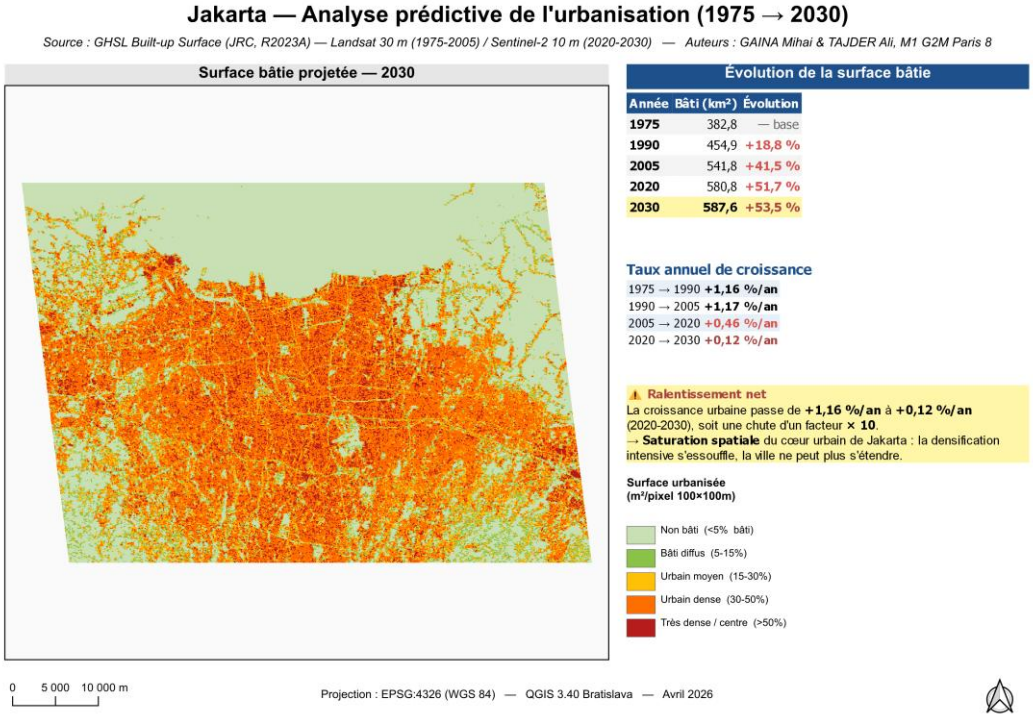


Figure 3 — Surface bâtie projetée à 2030 et taux annuels de croissance par période, mettant en évidence la saturation spatiale.

Cette décélération mathématique correspond, sur le terrain, à un phénomène que nous nommons saturation spatiale : la métropole de Jakarta a atteint ses limites, qu'elles soient administratives, topographiques (avec la mer de Java au nord et les reliefs volcaniques au sud) ou foncières. La ville ne peut plus s'étendre horizontalement de manière significative ; ce qu'elle fait à la place, c'est densifier le bâti existant. Or cette densification, loin d'être neutre vis-à-vis du risque hydrologique, accroît mécaniquement l'imperméabilisation des sols et donc la vulnérabilité aux épisodes pluvieux extrêmes. Cette articulation entre saturation spatiale et densification constitue la transition logique vers notre seconde partie d'analyse.

4.2 Cartographie des inondations urbaines de mars 2025

L'analyse des inondations de mars 2025 produit trois cartes de résultats, issues du traitement des deux scènes Sentinel-2 du 25 octobre 2024 et du 28 mai 2025 selon le pipeline présenté en section 3.4.

La première carte cartographie l'ensemble des surfaces inondées sur la zone d'étude. La règle de détection est binaire : un pixel est considéré comme inondé si son MNDWI est positif sur l'image post-événement et négatif sur l'image pré-événement. Le seuil de zéro pour le MNDWI est validé par la littérature scientifique pour les eaux turbides tropicales (Xu, 2006), ce qui évite le recours à un seuillage empirique non reproductible. Le résultat global est de 120,65 kilomètres carrés inondés, soit 10,17 % de la zone d'étude. Ce chiffre intègre cependant des surfaces hétérogènes : zones agricoles inondables au sud, marais côtiers au nord, bras de fleuves élargis, et zones urbanisées. Pour répondre à notre problématique — l'articulation entre densification urbaine et vulnérabilité — un filtrage supplémentaire est indispensable.

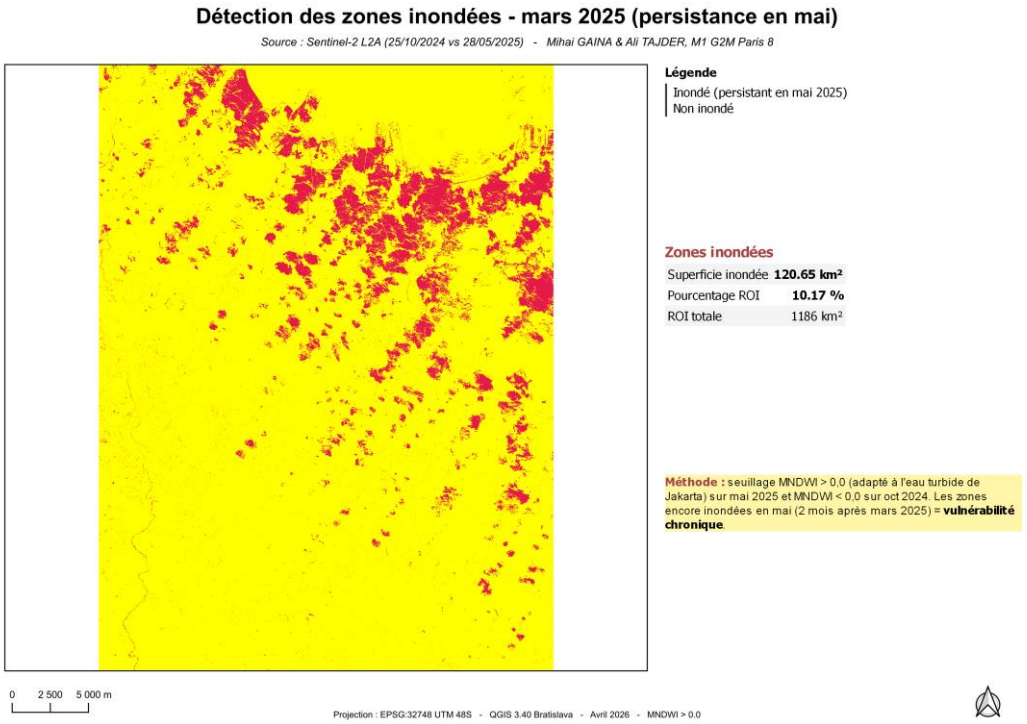


Figure 4 — Carte 1 — Surfaces inondées totales identifiées par différence MNDWI (Sentinel-2, 25/10/2024 vs 28/05/2025).

La seconde carte, qui constitue le résultat central de notre analyse, restreint la cartographie aux surfaces qui étaient à la fois inondées en mai 2025 et bâties avant l'événement. Le filtrage urbain repose sur la combinaison NDBI supérieur à zéro et NDVI inférieur à 0,3 sur l'image du 25 octobre 2024. Une nuance méthodologique critique mérite d'être soulignée : le NDBI utilisé pour le masque urbain est nécessairement celui calculé sur l'image antérieure à l'inondation. Si l'on utilisait le NDBI de l'image post-événement, la présence d'eau à la surface du bâti écraserait la signature spectrale urbaine et provoquerait une sous-estimation systématique des surfaces ciblées. Ce point méthodologique, technique mais déterminant, conditionne la fiabilité du résultat.

Le résultat obtenu est de 87,68 kilomètres carrés de bâti inondé, soit 14,61 % du tissu urbain total de Jakarta. Une autre lecture du même résultat est révélatrice : 72,7 % du volume total de surfaces inondées détecté dans la première carte tombe en zone urbaine, alors même que l'urbain ne couvre que 47,3 % de la zone d'étude. Cette concentration disproportionnée confirme avec force notre hypothèse de travail formulée en section 2.3 : la densification urbaine de Jakarta concentre mécaniquement l'exposition au risque d'inondation, ce qui valide la corrélation que nous postulions entre transformation anthropique du paysage et redéfinition de la vulnérabilité hydrologique.

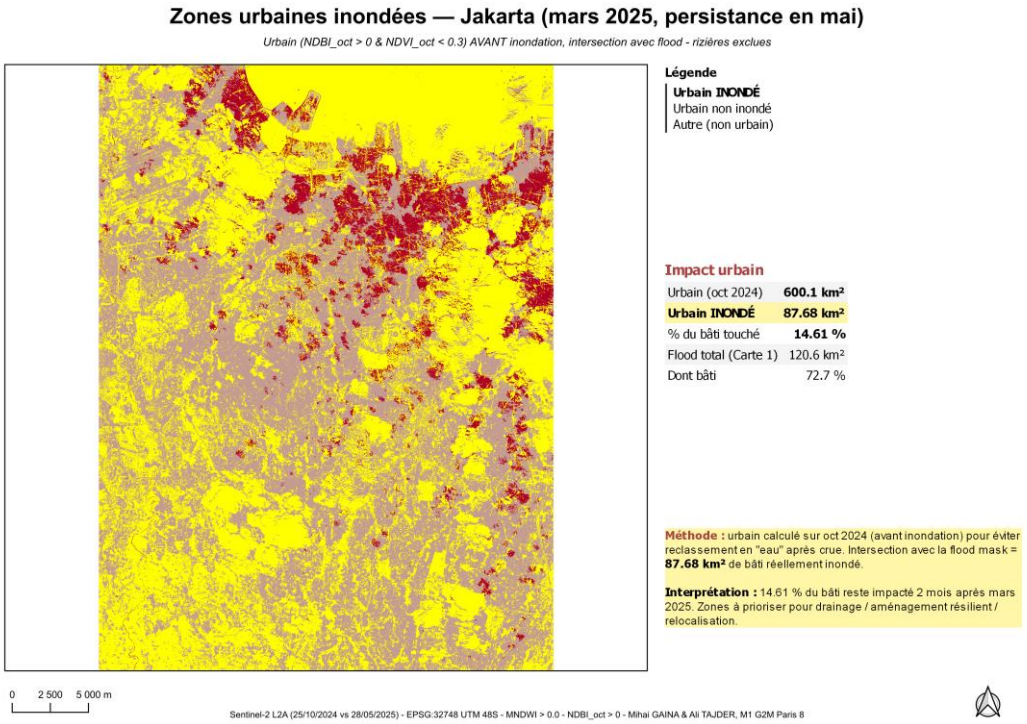


Figure 5 — Carte 1b — Inondation urbaine filtrée : intersection des surfaces inondées et du tissu bâti pré-événement (NDBI > 0 et NDVI < 0,3 sur l'image du 25/10/2024).

La troisième carte complète ce diagnostic en proposant une cartographie classique de l'occupation du sol post-événement, produite par classification supervisée Random Forest sur la scène du 28 mai 2025. La répartition des quatre classes est la suivante : eau pour 22,4 % (incluant la mer de Java au nord, le réseau hydrographique et les zones encore inondées), végétation pour 12,2 %, urbain pour 47,3 % et sol nu ou autre pour 18,1 %. Cette répartition confirme que la zone d'étude est très majoritairement bâtie, ce qui justifie a posteriori d'avoir mesuré la vulnérabilité en pourcentage du tissu urbain (carte 1b) plutôt qu'en pourcentage brut de la zone d'étude.

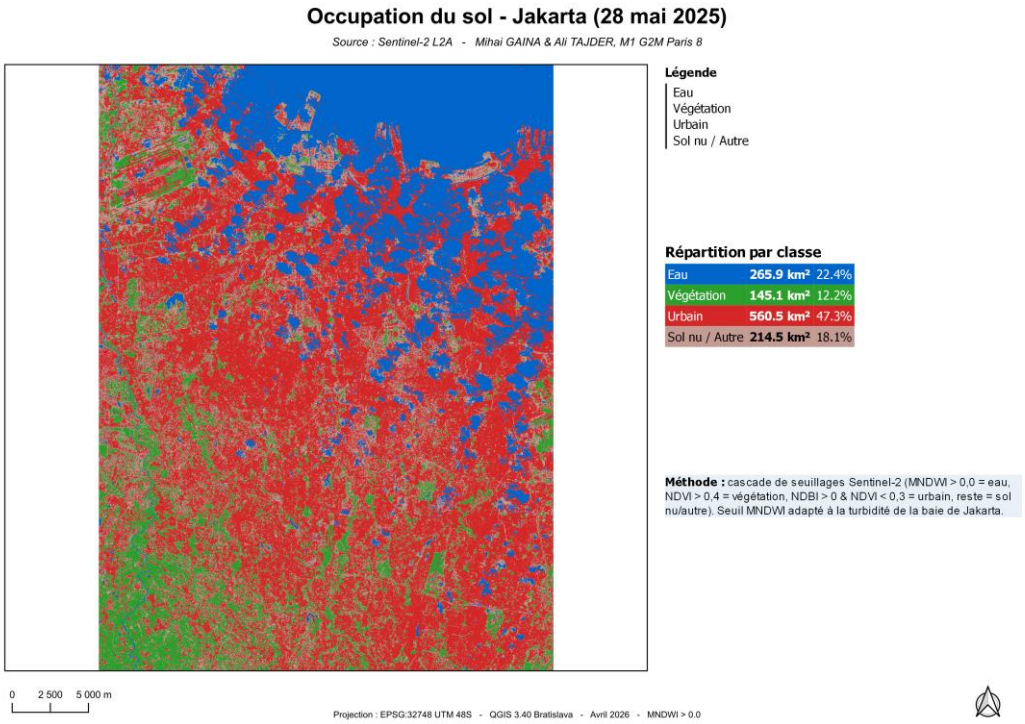


Figure 6 — Carte 2 — Occupation du sol post-événement (classification supervisée Random Forest, OTB, image Sentinel-2 du 28/05/2025).

4.3 Validation méthodologique : bracketing saisonnier versus analyse directe

Pour évaluer la robustesse du choix méthodologique présenté en section 3.2, une approche directe a été testée à titre de comparaison. Cette approche consiste à appliquer la même méthode de détection (différence MNDWI seuillée à zéro) à deux scènes Sentinel-2 acquises le plus près possible de l'événement du 14 mars 2025. Les images les moins nuageuses disponibles sur cette période sont datées du 27 février 2025 et du 14 mars 2025.

La limite principale de cette approche directe apparaît dès le diagnostic préalable des scènes : la couverture nuageuse cumulée sur les deux dates atteint plus de 35 % de la zone d'étude. Sur ces 35 %, la méthode ne peut produire aucune information, ni positive ni négative, car les pixels sont masqués au capteur. Sur les 65 % restants exploitables, la détection identifie 107,05 kilomètres carrés inondés.

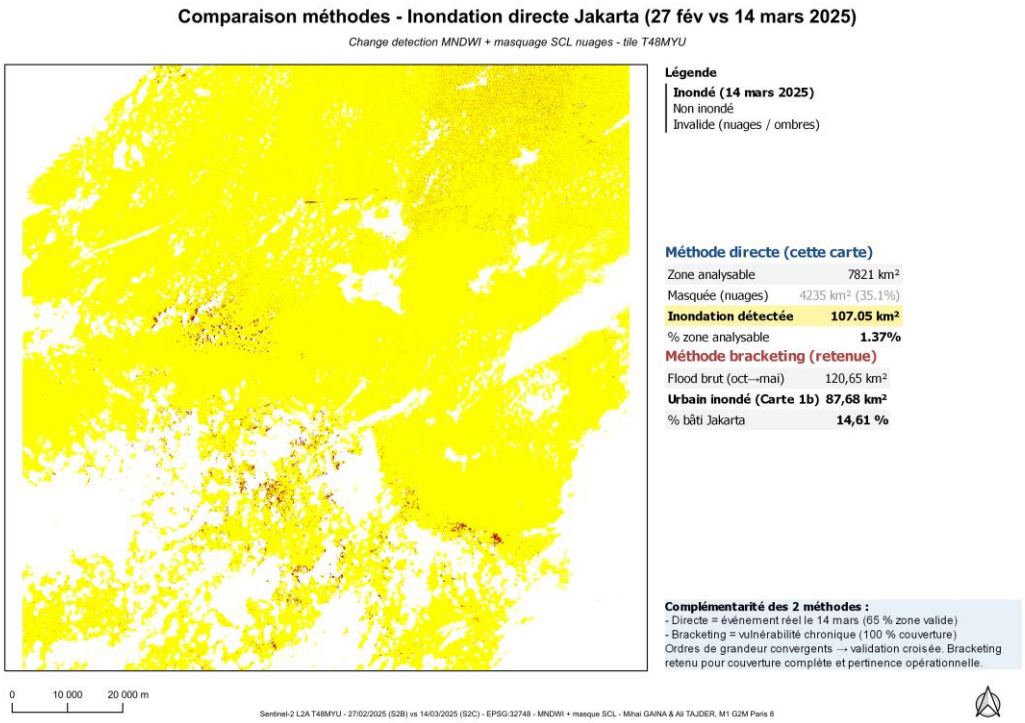


Figure 7 — Carte de validation méthodologique — Approche directe (Sentinel-2, 27/02/2025 vs 14/03/2025) avec masque de couverture nuageuse résiduelle (35 % de la zone d'étude).

La comparaison des deux approches est instructive. Le bracketing saisonnier détecte 87,68 kilomètres carrés en zone urbaine sur une couverture intégrale (100 %) du territoire ; l'approche directe détecte 107,05 kilomètres carrés sur une couverture partielle (65 %). Les ordres de grandeur convergent, ce qui constitue une validation croisée mutuelle des deux méthodes. Cependant, les deux approches ne mesurent pas exactement le même phénomène : l'analyse directe capture l'emprise instantanée de l'événement du 14 mars, tandis que le bracketing saisonnier capture la persistance des surfaces en eau plusieurs semaines après la décrue.

Pour répondre à un objectif d'aménagement et de prévention des risques, l'information utile n'est pas tant l'emprise instantanée d'une crue que l'identification des zones où l'eau persiste plusieurs mois après l'événement. Ces zones signalent en effet les secteurs où le drainage est structurellement déficient, où la subsidence aggrave la vulnérabilité, et où une intervention publique serait prioritaire. Le bracketing saisonnier a donc été retenu comme méthode principale, l'analyse directe servant de validation croisée. Ce choix est pleinement assumé du point de vue de notre mission de cabinet d'aide à la décision : nous privilégions l'information opérationnelle pour la gestion territoriale plutôt que la documentation strictement événementielle.

5. Interprétation et discussion

5.1 Saturation spatiale et densification : un facteur structurel de vulnérabilité

Les résultats produits dans les deux temps de notre analyse convergent vers une lecture unifiée de la vulnérabilité de Jakarta. La rétrospective de cinquante-cinq ans révèle une métropole qui a atteint sa limite spatiale et qui ne peut plus que se densifier ; l'analyse de l'événement de mars 2025 révèle qu'une part disproportionnée des surfaces inondées tombe précisément sur ce tissu densifié. Ces deux constats ne sont pas indépendants : ils décrivent les deux faces d'un même phénomène. La saturation spatiale, en obligeant la métropole à se densifier sur son emprise existante, accroît mécaniquement le coefficient d'imperméabilisation moyen du territoire ; cette imperméabilisation accrue empêche l'infiltration des précipitations dans les sols et concentre les volumes d'eau sur les réseaux de drainage qui, dimensionnés pour une autre époque, ne peuvent plus les contenir. Le ralentissement spatial par dix observé entre 1975 et 2030 ne traduit donc pas une diminution de la pression urbaine sur le territoire, mais bien sa transformation : la ville ne s'étend plus, elle s'épaissit, et cet épaississement aggrave structurellement la vulnérabilité hydrologique.

Ce résultat valide pleinement l'hypothèse formulée en section 2.3, selon laquelle l'urbanisation est devenue le moteur principal de la vulnérabilité de la métropole. Le chiffre central de notre analyse, à savoir que 14,61 % du tissu urbain de Jakarta a été touché par les eaux en mars 2025, traduit en données mesurées une réalité que la littérature qualitative décrivait depuis plusieurs années (Texier, 2007 ; Poulain, 2022 ; Mahfudz et al., 2024). La télédétection multi-temporelle a ainsi rempli sa fonction d'objectivation : transformer une dynamique qualitative connue en preuve quantitative rigoureuse, exploitable pour l'aide à la décision.

L'analyse visuelle de la Figure 5 (carte 1b) confirme cette hypothèse de manière spatialisée. Les zones inondées détectées se concentrent préférentiellement dans les sous-zones réglementaires R-1 et R-2 du Pergub n°31/2022, c'est-à-dire les secteurs résidentiels à très haute densité du nord et du centre de Jakarta, tandis que les franges périphériques caractérisées par un coefficient d'emprise au sol plus modéré apparaissent globalement moins exposées. Cette observation qualitative renforce le diagnostic statistique : ce ne sont pas l'ensemble des zones bâties qui sont touchées de manière homogène, mais bien les secteurs les plus densifiés qui concentrent disproportionnellement le risque hydrologique. Une analyse quantitative croisée par classe morphologique GHSL constituerait un prolongement naturel de ce travail, susceptible d'établir un coefficient d'exposition différencié par palier de densité.

5.2 Lien avec la subsidence et le contexte topographique

Le diagnostic produit par notre analyse doit être replacé dans un contexte géomorphologique plus large pour être pleinement compris. Comme l'a souligné Dietrich (2020), la frange littorale de Jakarta est l'une des zones les plus subsidentes au monde, avec un affaissement qui peut atteindre vingt-cinq centimètres par an dans certains quartiers du nord. Ce phénomène, lié au pompage massif des nappes phréatiques profondes pour l'alimentation en eau des quartiers urbains, combiné au poids des constructions verticales, vient amplifier la vulnérabilité que notre étude documente. Une zone qui s'enfonce mécaniquement sous le niveau de la mer devient incapable d'évacuer ses eaux de

ruissellement par gravité ; toute imperméabilisation supplémentaire dans ce contexte produit des effets non linéaires sur la fréquence et l'intensité des inondations.

La conjonction de ces deux dynamiques — densification urbaine documentée par notre étude et subsidence documentée par la littérature géologique — explique pourquoi les projections estiment que 95 % de la superficie de Jakarta se trouvera au niveau de la mer ou en dessous à l'horizon 2050 (Poulain, 2022). Notre carte 1b, qui identifie le bâti inondé en mars 2025, peut alors être lue non pas comme la cartographie d'un événement particulier, mais comme une projection spatiale concrète des zones que l'évolution conjuguée de l'imperméabilisation et de la subsidence rendra structurellement inhabitables dans les décennies à venir.

5.3 Limites de l'étude

Notre analyse présente plusieurs limites qu'il convient d'expliciter. La première tient au choix exclusif de l'imagerie optique : Sentinel-2 ne permet pas l'observation à travers les couches nuageuses, ce qui nous a contraints au bracketing saisonnier décrit en section 3.2. Une analyse complémentaire mobilisant l'imagerie radar Sentinel-1, qui n'est pas affectée par la couverture nuageuse, aurait permis de capter directement l'emprise instantanée de l'événement de mars 2025 ; cette piste constitue une perspective de prolongement naturel de ce travail.

La seconde limite concerne le seuillage du MNDWI. La valeur de zéro retenue est une recommandation issue de la littérature scientifique pour les eaux turbides tropicales (Xu, 2006), mais elle n'a pas fait l'objet d'une calibration locale spécifique sur Jakarta. Un ajustement empirique aurait pu affiner les résultats à la marge, mais nous avons fait le choix de la rigueur méthodologique standard plutôt que de l'optimisation contextuelle, afin de préserver la reproductibilité de notre approche sur d'autres territoires.

La troisième limite tient à la zone d'étude elle-même : notre rectangle de quarante kilomètres sur quarante centré sur Jakarta ne couvre pas l'intégralité de l'agglomération Jabodetabek, qui s'étend bien au-delà sur Bogor, Bekasi et au sud vers Cianjur. Une extension de la zone d'étude aurait élargi le diagnostic mais aurait également alourdi considérablement les volumes de données à traiter. Pour une mission opérationnelle, l'emprise retenue offre un compromis raisonnable entre représentativité et faisabilité technique.

Enfin, la projection 2030 issue du produit GHSL R2023 A est, par construction, un modèle et non une observation. Sa fiabilité dépend des hypothèses de croissance retenues par le Joint Research Centre. Bien que cette source soit largement validée scientifiquement (Pesaresi & Politis, 2023), il convient de rappeler que les chiffres projetés à 2030 doivent être interprétés comme des tendances anticipées plutôt que comme des mesures.

Une quatrième limite, plus technique, concerne la validation quantitative de la classification supervisée Random Forest. Dans la version actuelle de notre travail, la matrice de confusion détaillée — précision globale, indice kappa, précisions utilisateur et producteur par classe — n'a pas encore été produite sur un échantillon de validation indépendant. Cette validation chiffrée, qui constituerait une plus-value méthodologique notable, fera l'objet d'une annexe complémentaire à partir d'un jeu de points de validation stratifié distinct des polygones d'entraînement.

5.4 Perspectives : Nusantara et politiques d'adaptation

Les résultats de notre étude s'inscrivent dans un contexte politique inédit : la décision officielle de transférer la capitale indonésienne vers Nusantara, sur l'île de Bornéo, actée par le gouvernement et formalisée par une stratégie nationale de relocalisation progressive (Dietrich, 2020). Ce transfert constitue une réponse politique à l'échelle des diagnostics que notre analyse documente : à mesure que la vulnérabilité de Jakarta devient structurelle et difficilement réversible, l'option d'un déplacement des fonctions de capitale apparaît comme une réponse rationnelle. Notre cartographie de l'inondation urbaine de mars 2025 fournit, dans cette perspective, des éléments concrets pour étayer cette décision et pour orienter les politiques d'adaptation des zones urbaines maintenues.

Plusieurs prolongements de ce travail apparaissent prioritaires. Tout d'abord, un croisement avec des données socio-économiques fines, notamment les densités de population et les indicateurs de développement humain à l'échelle infra-communale, permettrait d'identifier les populations les plus exposées au risque d'inondation et de cibler les politiques publiques de manière différenciée. Ensuite, la mise en place d'un suivi annuel par notre méthode automatisée permettrait de documenter en continu l'évolution de la vulnérabilité dynamique, et d'évaluer l'efficacité des éventuelles interventions d'aménagement. Enfin, l'intégration de l'imagerie radar Sentinel-1 dans la chaîne de traitement constituerait un saut qualitatif pour la documentation des événements futurs, en s'affranchissant définitivement de la contrainte nuageuse qui a structuré notre méthodologie.

6. Conclusion

Au terme de cette étude, nous pouvons reconstituer la trajectoire qui conduit Jakarta de l'expansion urbaine planifiée des années 1970 à la vulnérabilité hydrologique structurelle de 2025. La mobilisation conjointe du produit GHSL R2023 A pour la rétrospective et de l'imagerie Sentinel-2 pour l'analyse événementielle a permis de produire un diagnostic en deux temps cohérents. Le premier temps, rétrospectif, démontre que la métropole a atteint sa limite spatiale et que sa croissance s'est convertie, depuis 2005, en densification interne ; le ralentissement par dix du rythme d'expansion entre les périodes 1975-2005 et 2020-2030 est sans appel. Le second temps, événementiel, documente que cette densification concentre mécaniquement le risque d'inondation : 14,61 % du tissu urbain de Jakarta a été touché par les eaux lors de l'épisode de mars 2025, et 72,7 % du volume total des surfaces inondées tombe sur le bâti, alors même que l'urbain ne couvre que 47,3 % de la zone d'étude.

Ces résultats valident pleinement l'hypothèse formulée en introduction : la transformation anthropique du paysage urbain de Jakarta a redéfini structurellement la dynamique des crues. La saturation spatiale et la densification interne ont fait de l'imperméabilisation artificielle des sols l'un des moteurs principaux de la vulnérabilité actuelle. La télédétection multi-temporelle, par sa capacité à objectiver des dynamiques qui échappent à l'observation directe, s'est révélée à la hauteur des enjeux opérationnels d'une mission d'aide à la décision sur un territoire de cette complexité.

Au-delà du cas particulier de Jakarta, ce travail illustre la valeur opérationnelle d'une approche méthodologique rigoureuse, fondée sur des sources de données complémentaires (GHSL et Sentinel-2), sur des indices spectraux validés par la littérature (NDVI, MNDWI, NDBI), et sur un cadre réglementaire local explicite (Pergub no 31 de 2022). La reproductibilité du pipeline automatisé en Python ouvre la voie à un suivi régulier de la vulnérabilité, et à une transposition de la méthode à d'autres mégapoles tropicales confrontées à des problématiques comparables. Dans un contexte de changement climatique qui accroît la fréquence et l'intensité des événements extrêmes, la capacité à diagnostiquer rapidement et précisément la vulnérabilité urbaine apparaît comme un enjeu majeur pour l'aménagement des décennies à venir.

Ressources bibliographiques

Méthodologie de la télédétection optique

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment, 120, 25-36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026

Dupayas, M. (2026). Cours de Télédétection — Méthodologie d'analyse multi-temporelle Sentinel-2. Travaux dirigés sur Yilou (Burkina Faso) et Vitrolles (Bouches-du-Rhône). Master 1 Géomatique et Modélisation des Milieux Anthropisés (G2M), Université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis. Document pédagogique non publié.

Jenks, G. F. (1967). The data model concept in statistical mapping. International Yearbook of Cartography, 7, 186-190.

Indices spectraux et classifications

Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25(3), 295-309. https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17(7), 1425-1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA Special Publication, 351, 309-317.

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27(14), 3025-3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179

Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. International Journal of Remote Sensing, 24(3), 583-594. https://doi.org/10.1080/01431160304987

Données urbaines et institutionnelles

Pesaresi, M., & Politis, P. (2023). GHS-BUILT-S R2023A : GHS built-up surface grid, derived from Sentinel-2 composite and Landsat, multitemporal (1975-2030). European Commission, Joint Research Centre.
https://human-settlement.emergency.copernicus.eu/

Pemerintah Provinsi DKI Jakarta. (2022). Peraturan Gubernur Provinsi DKI Jakarta Nomor 31 Tahun 2022 tentang Rencana Detail Tata Ruang Wilayah Perencanaan Provinsi Daerah Khusus Ibukota Jakarta.
https://jdih.jakarta.go.id/

Contexte géographique et social de Jakarta

Ariyora et al. (2015). Études géographiques sur Jakarta — référence citée par Poulain (2022).

Dietrich, J. (2020). Jakarta : modernisation, vulnérabilité et inégalités d'une mégapole tropicale. Référence académique citée dans le rapport.

Mahfudz, M. et al. (2024). Analyses hydrologiques contemporaines sur Jakarta et le bassin du Ciliwung.

Poulain, T. (2022). Mégapoles tropicales et risques hydrologiques : le cas de Jakarta. Référence académique citée dans le rapport.

Texier, P. (2007). Vulnérabilité aux inondations et précarité urbaine à Jakarta. Travaux de référence sur les kampungs et la précarité.

Texier, P. (2009). Climats tropicaux et précipitations de mousson à Jakarta. Référence citée dans le rapport.

Plateformes de téléchargement de données

Copernicus Data Space Ecosystem (ESA). Plateforme officielle de téléchargement des produits Sentinel-2 (niveaux L1C et L2A). Consulté entre janvier et avril 2026.
https://dataspace.copernicus.eu/

Natural Earth. Base de données cartographique libre fournissant les fonds vectoriels (côtes, fleuves, frontières administratives). Consulté en avril 2026.
https://www.naturalearthdata.com/

Outils logiciels mobilisés

QGIS Development Team. Quantum GIS (QGIS), Système d'Information Géographique libre. Version 3.40 Bratislava, 2026.
https://qgis.org/

Orfeo Toolbox (OTB). CNES — Centre National d'Études Spatiales. Bibliothèque de traitement d'images satellitaires.
https://www.orfeo-toolbox.org/

Python Software Foundation. Langage Python (version 3.x).
https://www.python.org/

PyQGIS. Interface de programmation Python pour QGIS.
https://qgis.org/pyqgis/

GDAL/OGR Contributors. Geospatial Data Abstraction Library (GDAL).
https://gdal.org/