International Journal of Strategic Management and Economic Studies (IJSMES)
ISSN: 2791-299X

Perturbations hydrologiques et coûts économiques dans un bassin côtier sableux soumis à extraction minière et forçage climatique (Taolagnaro, Madagascar)

Zo Rivomanana Rasoanaivo[1]

[1]Université d'Antananarivo

Résumé: Cette étude quantifie la progression spectrale, la connectivité topographique et leur traduction hydro-économique à Mandena, Taolagnaro, entre 1993 et 2022. L'analyse repose sur 676 scènes Landsat, des composites saisonniers à 30 mètres, un contrôle explicite du nombre d'observations et une série primaire du capteur Enhanced Thematic Mapper Plus couvrant 2001–2022. La première apparition spectrale est détectée par la combinaison de l'indice de végétation par différence normalisée, du rapport de brûlure normalisé et de l'indice de sol nu, avec un seuil au 99e percentile, une union annuelle et une composante minimale de 0,90 ha. Le cumul atteint 434,1 ha en 2022.

Trois scénarios spatiaux emboîtés décrivent l'état spectral de 2022 sur 184,0, 207,4 et 274,0 ha. Dans le modèle numérique d'élévation, les cibles correspondantes couvrent 177,4 à 266,8 ha et se rattachent à des domaines amont de 7 395 à 7 425 ha. Le rapport entre domaine connecté et cible atteint ainsi 27,8 à 41,7. Plus de 99,92 % de l'aire connectée aboutit à une sortie résolue; la première sortie concentre 90,7 à 91,1 % des contributions et les cinq premières 97,9 à 98,1 %. Le coefficient volumique associé au domaine résolu atteint 73 904 à 74 198 m³ par millimètre et varie de 0,40 % entre les trois scénarios.

L'analyse hydro-économique traduit ensuite ce coefficient par une profondeur efficace, définie comme le produit d'une hauteur mobilisée et d'une fraction de transfert, puis par une durée de transfert. Chaque millimètre de profondeur efficace correspond à environ 74 000 m³ sur le domaine résolu. Les valeurs documentaires de 750 et 2 000 ariary malgaches par mètre cube donnent, pour un millimètre, des équivalents de service d'eau de 55,4 à 55,6 millions et de 147,8 à 148,4 millions d'ariary.

Le résultat principal est le changement d'échelle spatial : quelques centaines d'hectares de cibles spectrales sont associées, par le routage topographique, à un domaine connecté d'environ 7,4 milliers d'hectares. La concentration des contributions vers quelques sorties et la stabilité du coefficient volumique fournissent deux résultats directement exploitables pour organiser le suivi hydrologique et paramétrer l'évaluation économique.

Termes d'indexation: landsat; télédétection; séries temporelles; connectivité topographique; sables minéralisés; hydro-économie; mandena; taolagnaro; madagascar.

Digital Object Identifier (DOI): https://doi.org/10.5281/zenodo.**23540939**

Published in: Volume 4 Issue 6

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

1. Introduction

Les exploitations de sables minéralisés reconfigurent localement la couverture végétale, la surface du terrain et l'organisation des sols. Dans les plaines côtières sableuses, zones humides, nappes peu profondes et réseaux de drainage relient étroitement usages du sol et circulation de l'eau [1]. L'enjeu scientifique consiste à suivre l'évolution spatiale de la surface transformée, puis à déterminer comment sa position s'insère dans l'organisation topographique du territoire.

Les archives Landsat offrent une continuité pluri-décennale adaptée à cette question [3,4]. Les réflectances de surface, les indices spectraux et les méthodes de séries temporelles permettent de cartographier l'apparition et la persistance de changements de couverture à l'échelle de quelques dizaines de mètres [5-21]. Le routage sur modèle numérique d'élévation complète cette information en identifiant les cellules amont qui convergent vers une cible et en quantifiant la concentration des chemins vers les sorties [22,23,26-28]. L'association des deux familles de données construit ainsi un passage mesurable entre signal de surface et organisation du drainage.

Mandena, au sud-est de Madagascar, constitue un terrain d'application particulièrement adapté. La production d'ilménite y débute à la fin de 2008 [2]. L'archive utilisée couvre 1993–2022 et rassemble 676 scènes candidates, 60 composites saisonniers et une série primaire Enhanced Thematic Mapper Plus de 2001 à 2022. La chronologie est construite avec un support observationnel explicite, une période de référence 2001–2007 et une règle de première apparition fondée sur trois indicateurs spectraux complémentaires.

L'étude poursuit quatre objectifs : reconstruire la progression spectrale jusqu'en 2022; établir trois scénarios spatiaux emboîtés de l'état 2022; quantifier leur domaine amont, leur résolution vers les sorties et leur coefficient volumique; traduire enfin ce coefficient dans une grille hydro-économique paramétrique. Les résultats montrent un changement d'échelle de 27,8 à 41,7 entre les cibles spectrales et leur domaine connecté, une concentration de plus de 90,7 % des contributions vers la première sortie et un coefficient voisin de 74 000 m³ par millimètre. Ces trois résultats structurent l'interprétation hydro-économique proposée.

2. Méthodologie

La chaîne d'analyse suit huit étapes : constitution de l'archive Landsat, contrôle du support d'observation, comparaison inter-capteurs, détection de la première apparition spectrale, état spectral 2022, routage topographique, résolution des sorties puis transfert hydro-économique. L'information temporelle reste attachée à chaque composite, tandis que les différences de réponse entre capteurs sont traitées avant le calcul de la chronologie [3-10,15-21]. La Figure 1 présente la zone d'étude et le noyau Landsat; les étapes topographiques et économiques sont détaillées aux sections 2.4 et 2.5.

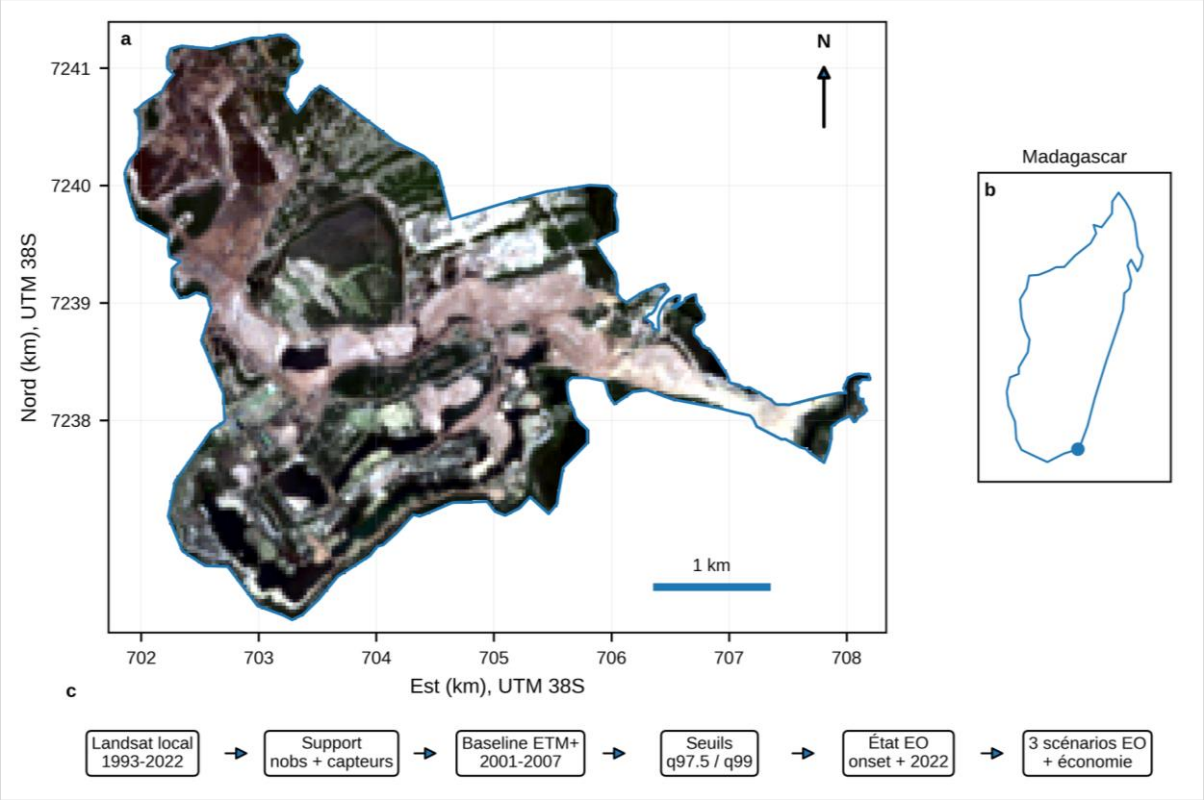


Figure 1. Zone d'étude et noyau de la chaîne de télédétection. (a) polygone de Mandena; (b) localisation dans Madagascar; (c) archive Landsat, support d'observation, série primaire Enhanced Thematic Mapper Plus, seuils et scénarios 2022.

Trois supports spatiaux sont distingués dans le calcul. Le polygone de Mandena porte l'analyse spectrale; le modèle numérique d'élévation porte la recherche amont; l'aire connectée résolue porte le coefficient volumique. Cette organisation permet de conserver, à chaque étape, la géométrie correspondant à la quantité calculée et de suivre explicitement le passage de la cible spectrale au domaine connecté puis au transfert paramétrique.

2.1 Domaine d'étude, archive Landsat et support topographique

2.1.1 Zone minière et données spatiales

Le polygone Mandena est un MultiPolygon en EPSG:32738 couvrant 1 381,9 ha. Le modèle numérique d'élévation local utilisé pour le routage couvre 8 585,9 ha et représente 1 368,4 ha du polygone, soit

99,0 %. L'archive Landsat principale comprend 60 composites humide/sec de 1993 à 2022 à 30 m de résolution. Les 13 bandes sont le bleu, le vert, le rouge, le proche infrarouge, deux bandes infrarouges à ondes courtes, quatre indices spectraux terrestres, deux indices complémentaires et le nombre d'observations valides. Le manifeste recense 676 scènes candidates : 145 Thematic Mapper, 294 Enhanced Thematic Mapper Plus, 212 Operational Land Imager et 25 Operational Land Imager 2.

Les réflectances de surface Landsat Collection 2 et les contrôles de qualité suivent les spécifications de l'US Geological Survey [5-11]. La série primaire repose sur Enhanced Thematic Mapper Plus afin de conserver une continuité instrumentale de 2001 à 2022. Les observations Operational Land Imager sont utilisées pour mesurer la concordance inter-capteurs sur les années compatibles, selon les différences spectrales documentées entre Landsat 7 et Landsat 8 [8].

2.1.2 Support observationnel et capteurs

Le nombre d'observations valides du composite définit trois niveaux de support : au moins deux observations pour le support principal, une observation pour le support faible et aucune observation pour l'état non résolu. La collection séparée par capteur contient 39 fichiers raster. Les comparaisons inter-capteurs sont conduites sur des paires temporellement compatibles afin de distinguer la variation de surface de la variation instrumentale [15-21].

2.1.3 Série primaire Enhanced Thematic Mapper Plus et contrôle inter-capteurs

La série primaire Enhanced Thematic Mapper Plus comprend 44 composites, humide et sec, de 2001 à 2022. Les années 2001–2007 définissent la référence et 2008–2022 la période opérationnelle. Sept paires Enhanced Thematic Mapper Plus/Operational Land Imager sont retenues : 2013 sec; 2014 sec et humide; 2021 sec et humide; 2022 sec et humide. Les décalages additifs sont estimés par validation croisée leave-one-pair-out dans chaque saison. Operational Land Imager 2 complète le diagnostic de cohérence à trois capteurs en 2022.

2.2 Détection spectrale et chronologie

La détection combine l'indice de végétation par différence normalisée, le rapport de brûlure normalisé et l'indice de sol nu; l'indice d'eau modifié est conservé comme descripteur. Pour chaque pixel et saison, la référence 2001–2007 fournit des écarts standardisés et le score est la médiane de -z(indice de végétation), -z(rapport de brûlure) et +z(indice de sol nu). Les seuils saisonniers sont fixés à 5,8010 et 8,1888 en saison humide, puis 6,9894 et 10,2309 en saison sèche pour les 97,5e et 99e percentiles. La combinaison vise une réponse spectrale cohérente entre végétation, sol nu et état de surface [12-14].
La règle finale de première apparition associe :

$$\textit{99e percentile} + \textit{union annuelle} + \textit{composante} \geq \textit{0,90 ha} + \textit{première occurrence annuelle}$$

La première année satisfaisant cette règle est enregistrée pour chaque pixel. Le raster obtenu fournit une chronologie spatiale cumulative dont l'aire atteint 434,1 ha en 2022. Les seuils et la taille minimale de

composante restent identiques sur toute la période opérationnelle, ce qui garantit un contrat de détection constant entre 2008 et 2022.

La période 2001–2007 sert de contrôle négatif pour comparer les règles candidates avant le début de la période opérationnelle. Les variantes de rupture année-à-année, de persistance et de taille de composante ont été évaluées dans cette phase. La règle au 99e percentile avec union annuelle et composante minimale de 0,90 ha est celle transportée vers l'analyse spatiale finale.

La chronologie de première apparition et l'état spectral 2022 sont calculés séparément. Après sa première apparition, chaque pixel est reclassé annuellement selon son score et son support d'observation. Cette seconde lecture permet de distinguer les composantes encore anomales en 2022 de celles revenues vers un état spectral de référence.

2.3 État spectral 2022 et scénarios spatiaux

2.3.1 Cohorte de première apparition et états annuels

Quatre états annuels sont utilisés : anomal, non anomal entièrement résolu, non anomal à support partiel et non résolu. En 2022, 207,4 ha de la cohorte dépassent le 99e percentile et 274,0 ha le 97,5e percentile. La cohorte comprend également 225,0 ha entièrement résolus comme non anomaux au 99e percentile et 159,0 ha au 97,5e percentile. Ces états alimentent directement les trois scénarios spatiaux 2022.

$$A_spectral,2022 \in \{184,0;\ 207,4;\ 274,0\}\ ha$$

Les trois scénarios spatiaux sont emboîtés : 99e percentile concordant entre Enhanced Thematic Mapper Plus et Operational Land Imager; 99e percentile de la série primaire; 97,5e percentile de la série primaire. Le premier retient le noyau spectral confirmé par deux capteurs, le deuxième l'état courant au seuil principal, et le troisième élargit la cible au seuil inférieur. Leur emboîtement permet de mesurer la sensibilité de la topographie à la largeur de la cible.

Les trois scénarios utilisent la même grille, la même période de référence et les mêmes règles saisonnières. Leur différence porte uniquement sur le niveau spectral retenu en 2022 et, pour le scénario strict, sur la concordance entre Enhanced Thematic Mapper Plus et Operational Land Imager. Les identifiants de pixels sont conservés lors de l'emboîtement, ce qui permet de comparer directement les surfaces avant l'étape topographique.

La chaîne transporte ensuite les trois masques tels qu'ils sont produits en 2022. Les aires source sont calculées sur la grille Landsat, puis intersectées avec le polygone Mandena et le support du modèle d'élévation. Cette séquence fournit trois niveaux successifs d'aire : source spectrale, cible topographique et domaine connecté, avec une correspondance spatiale explicite entre chaque niveau.

Table 1. Contrat d'observation et de détection spectrale.

Objet	Règle	Valeur / intervalle	Rôle
Archive Landsat	humide + sec, 1993–2022	60 TIFF; 676 scènes; 30 m	entrée temporelle
Série primaire ETM+	2001–2022	référence 2001–2007	chronologie
Support	nobs	≥2 principal; 1 faible; 0 non résolu	qualité d'observation
Score	médiane(-zNDVI, -zNBR, +zBSI)	97,5e / 99e percentile	anomalie spectrale
Première apparition	99e percentile + union + composante ≥0,90 ha	première occurrence annuelle	chronologie spatiale

nobs désigne le nombre d'observations valides du composite. Les seuils sont fixés par saison sur la série primaire Enhanced Thematic Mapper Plus; la première apparition est l'année initiale satisfaisant la règle déclarée.

2.3.2 Scénarios spectraux emboîtés

Le scénario strict couvre 184,0 ha, le scénario au 99e percentile 207,4 ha et celui au 97,5e percentile 274,0 ha. L'écart entre les scénarios extrêmes est de 90,0 ha, soit environ la moitié de la cible stricte. Cette variation constitue le test spatial principal avant routage : elle permet de déterminer si l'extension du domaine connecté suit proportionnellement l'extension de la cible spectrale.

2.4 Connectivité topographique et transit

Le modèle numérique d'élévation est conditionné sur tout son domaine valide par Priority-Flood [22]. Le routage suit ensuite la direction D8 de plus forte descente; les cellules planes sont orientées selon le rang issu du remplissage. Ce schéma associe à chaque cellule un chemin terminal et permet d'identifier l'ensemble amont qui converge vers chacune des trois cibles spectrales [23,27,28].

Pour chaque scénario, la cible correspond à l'intersection du masque spectral 2022, du polygone Mandena et du modèle d'élévation valide. La recherche amont s'étend aux 8 585,9 ha du support topographique complet. Le calcul retourne l'aire cible conservée, l'aire connectée totale, l'aire amont extérieure à la cible, la distance maximale de chemin et la relation entre chaque cellule source et sa sortie terminale.

Table 2. Supports spatiaux utilisés dans la chaîne de calcul.

Support	Aire (ha)	Fraction / repère	Rôle
Polygone Mandena	1 381,9	EPSG:32738	analyse spectrale
Mine couverte par le modèle d'élévation	1 368,4	99,0 %	restriction des cibles
Modèle d'élévation valide	8 585,9	100 %	recherche amont
Première apparition cumulée 2008–2022	434,1	chronologie	progression spectrale

Le conditionnement Priority-Flood modifie 11,03 % des cellules; le remplissage positif moyen atteint 1,51 m et le maximum 13,0 m. Le transit est ensuite prolongé jusqu'aux sorties terminales du support.

Pour chaque scénario, l'aire connectée est répartie entre les sorties rencontrées, puis les parts cumulées des première, cinq premières et dix premières sorties sont calculées.

2.4.1 Conditionnement du DEM et résolution des sorties

Une cellule source est classée comme résolue lorsqu'un chemin terminal est identifié. La fraction résolue, la fraction arrivant au bord du support, l'aire résolue et la concentration par sortie sont calculées séparément pour les trois scénarios. Ces quantités déterminent le coefficient volumique utilisé dans l'étape hydro-économique.

2.5 Transfert hydro-économique paramétrique

L'aire connectée résolue fournit le coefficient K = 10 × A_conn,res, selon l'identité 1 mm sur 1 ha = 10 m³. K atteint 73 904, 73 942 et 74 198 m³/mm pour les scénarios strict, 99e percentile et 97,5e percentile. Le transfert hydro-économique introduit ensuite une hauteur efficace h_eff, une fraction alpha et une durée T afin de représenter séparément profondeur mobilisée, fraction transférée et échelle temporelle.

La grille utilise h_eff = 1, 5, 10, 25, 50 ou 100 mm; alpha = 0,01, 0,05, 0,10, 0,25, 0,50 ou 1; T = 1, 3, 6, 12 ou 24 h. La profondeur efficace est d_eff = h_eff × alpha. Les fonctions sont V_conn = K × h_eff, V_det = K × d_eff et Q_eq = K × d_eff/(3600T). Cette grille décrit l'ensemble des combinaisons évaluées dans l'analyse de sensibilité.

Le document d'évaluation du Madagascar National Water Project de la Banque mondiale rapporte environ 750 ariary malgaches par mètre cube pour les branchements domestiques et 2 000 ariary par mètre cube aux bornes-fontaines [24]. Ces deux valeurs sont appliquées comme repères documentaires de service d'eau dans C_archival = K × d_eff × c_v. La littérature d'évaluation économique de l'eau fournit le cadre conceptuel de cette conversion [25].

Le sous-composant 1.1 du même projet représente 38,3 millions de dollars américains et vise notamment 40 800 m³/jour de capacité supplémentaire [24]. Il regroupe production, traitement, pompage, alimentation électrique, protection contre les crues, études et supervision. Le calcul unitaire du présent article utilise donc les deux valeurs de service d'eau documentées séparément, tandis que le montant d'investissement reste un contexte de projet.

3. Résultats

3.1 Chronologie de première apparition spectrale

La règle au 99e percentile produit un cumul de première apparition spectrale de 434,1 ha entre 2008 et 2022. La Figure 2 montre une progression répartie sur l'ensemble de la période, avec des incréments annuels variables. Le signal s'étend dans plusieurs secteurs du polygone plutôt que selon un front unique, ce qui décrit une extension spatiale graduelle du signal spectral à l'échelle Landsat.

La chronologie cumulative et l'état 2022 fournissent deux lectures complémentaires. La première mesure l'extension totale des pixels ayant franchi le seuil au moins une fois depuis 2008; la seconde mesure la surface répondant encore aux règles spectrales en 2022. Cette distinction permet de suivre à la fois la trajectoire de trente années d'archive et la configuration spatiale utilisée pour le routage final.

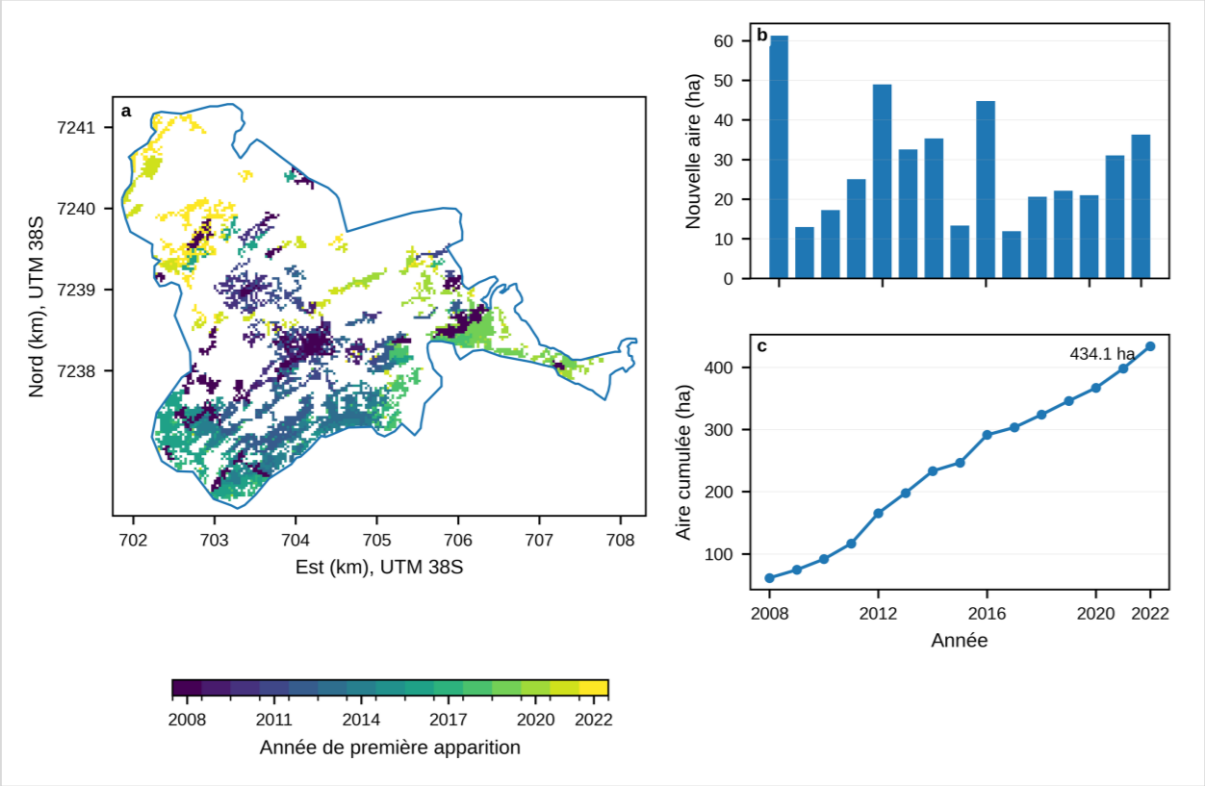


Figure 2. Première apparition spectrale selon la règle au 99e percentile. (a) année de première apparition; (b) nouvelle aire annuelle; (c) cumul atteignant 434,1 ha en 2022.

La carte de première apparition révèle une forte hétérogénéité spatiale : des composantes anciennes et récentes coexistent dans les secteurs occidental, central et méridional du polygone, tandis que plusieurs corridors apparaissent vers l'est. La succession des couleurs annuelles visualise directement l'ordre d'extension du signal et complète les courbes d'aire annuelle et cumulative.

3.2 Trois cibles spectrales en 2022

En 2022, 207,4 ha de la cohorte de première apparition restent anomaux au 99e percentile et 274,0 ha au 97,5e percentile. Le contrôle inter-capteurs retient 184,0 ha dans le scénario strict. Les trois masques sont emboîtés et conservent une géométrie générale similaire, tandis que leur densité et leur extension augmentent du scénario strict au scénario au 97,5e percentile.

Le reclassement 2022 identifie en parallèle 225,0 ha entièrement résolus comme non anomaux au 99e percentile et 159,0 ha au 97,5e percentile. La cohorte cumulative de 434,1 ha se partage donc entre états courants distincts. Les cibles de 184,0 à 274,0 ha constituent l'état spatial transporté vers le calcul topographique.

3.3 Changement d'échelle topographique

Après restriction au modèle d'élévation, les cibles couvrent 177,4 ha, 200,3 ha et 266,8 ha. Leurs domaines amont atteignent respectivement 7 395,5 ha, 7 399,8 ha et 7 425,4 ha, soit 86,1 à 86,5 % du support topographique. Le rapport aire connectée/cible vaut 41,7 pour le scénario strict, 36,9 pour le 99e percentile et 27,8 pour le 97,5e percentile. Une cible spectrale de moins de 300 ha est reliée, par le routage topographique, à un domaine connecté d'environ 7,4 milliers d'hectares.

Table 3. Progression spectrale, scénarios 2022 et extension topographique.

Objet	Aire source (ha)	Cible DEM (ha)	Aire connectée (ha)	Rapport conn./cible	Repère
Première apparition cumulée	434,1	–	–	–	2008–2022
Strict inter-capteurs	184,0	177,4	7 395,5	41,7	2022
99e percentile	207,4	200,3	7 399,8	36,9	2022
97,5e percentile	274,0	266,8	7 425,4	27,8	2022
Amont externe – strict	–	–	7 218,1	–	hors cible
Amont externe – 99e	–	–	7 199,5	–	hors cible
Amont externe – 97,5e	–	–	7 158,7	–	hors cible
Modèle d'élévation valide	–	–	8 585,9	–	support total
Part du support connectée	–	–	–	–	86,1–86,5 %

L'augmentation de 50 % entre les cibles extrêmes se traduit par une hausse de seulement 30,0 ha de l'aire connectée totale. Le domaine amont extérieur à la cible atteint 7 218,1 ha dans le scénario strict, 7 199,5 ha au 99e percentile et 7 158,7 ha au 97,5e percentile. La Figure 4 montre que les trois cibles interceptent pratiquement la même organisation topographique à l'échelle du support disponible.

Les distances D8 maximales sont de 28,4 km pour les scénarios strict et 99e percentile et de 28,3 km pour le 97,5e percentile. Les trois domaines rencontrent la bordure du modèle d'élévation, ce qui fournit

le repère spatial de censure utilisé dans les étapes suivantes. Malgré cette bordure commune, l'emboîtement des cibles et des domaines connectés est conservé dans les trois scénarios.

3.4 Résolution des sorties et concentration

La fraction résolue atteint 99,93 % dans le scénario strict et 99,92 % dans les deux autres. Les aires résolues sont 7 390,4, 7 394,2 et 7 419,8 ha. La part de censure de sortie reste comprise entre 0,07 et 0,08 %, de sorte que le coefficient K est calculé sur plus de 99,92 % de l'aire connectée de chaque scénario.

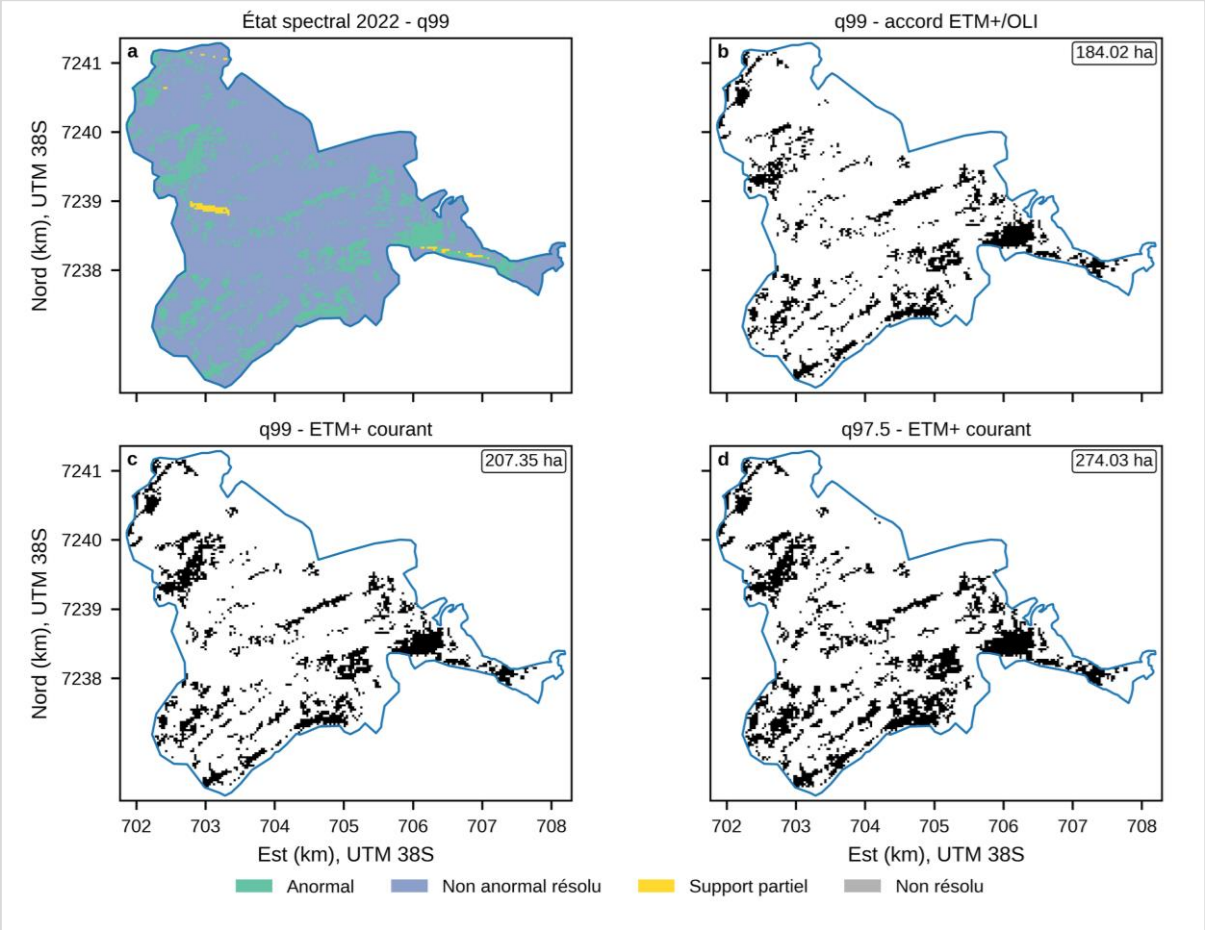


Figure 3. État spectral et scénarios 2022. (a) état au 99e percentile de la cohorte; (b) scénario inter-capteurs, 184,0 ha; (c) scénario au 99e percentile, 207,4 ha; (d) scénario au 97,5e percentile, 274,0 ha.

La distribution vers les sorties est fortement concentrée. La première sortie reçoit 91,1 % des contributions dans le scénario strict, 91,0 % au 99e percentile et 90,7 % au 97,5e percentile. Les cinq premières cumulent 98,1 %, 98,1 % et 97,9 %; les dix premières 99,1 %, 99,1 % et 98,9 %. La structure drainante est donc dominée par un nombre très restreint de sorties.

Cette concentration fournit une hiérarchie spatiale directement exploitable pour le suivi. La première sortie constitue le point de mesure prioritaire; les quatre suivantes portent l'essentiel du complément de contribution. Un dispositif associant débit, niveau, conductivité et turbidité sur ce groupe réduirait

fortement le nombre de sites nécessaires pour couvrir l'essentiel du domaine topographiquement connecté [26].

3.5 Coefficient physique K et convergence inter-scénarios

Table 4. Résolution des sorties, concentration et coefficient K.

Scénario	Aire résolue (ha)	Fraction résolue	Sortie 1 / sorties 5	K (m³/mm)
Strict inter-capteurs	7 390,4	99,93 %	91,1 % / 98,1 %	73 904
99e percentile	7 394,2	99,92 %	91,0 % / 98,1 %	73 942
97,5e percentile	7 419,8	99,92 %	90,7 % / 97,9 %	74 198
Étendue	29,4	>99,92 %	sortie 1 >90,7 %	écart K ≈0,40 %

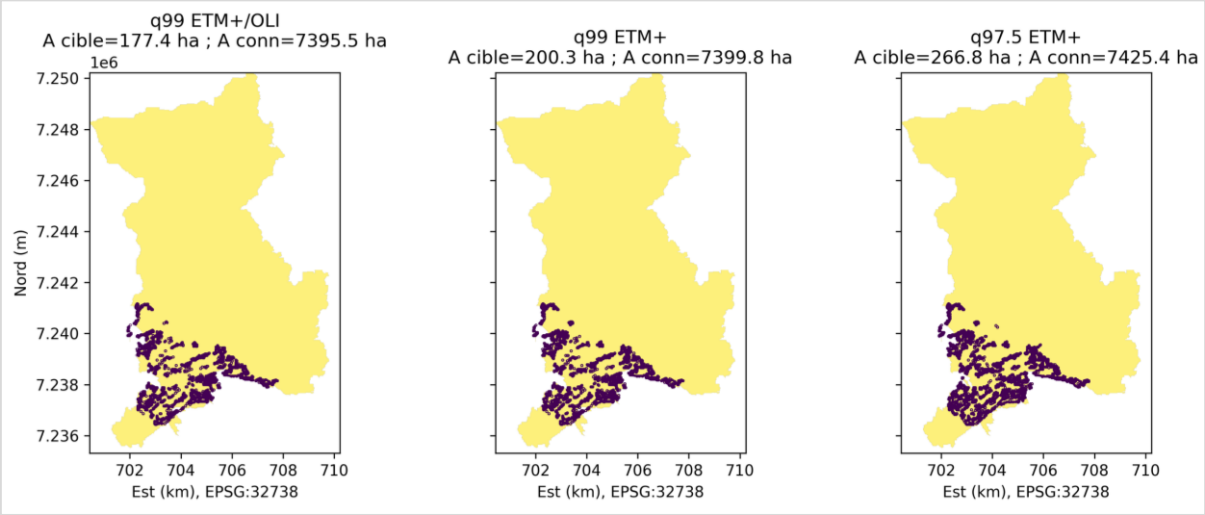


Figure 4. Domaines topographiquement connectés aux trois cibles spectrales. Les titres indiquent l'aire cible dans le modèle d'élévation et l'aire connectée totale; le jaune représente le domaine amont connecté et le violet la cible.

Après propagation de la résolution des sorties, K vaut 73 904 m³/mm pour le scénario strict, 73 942 pour le 99e percentile et 74 198 pour le 97,5e percentile. L'écart entre les valeurs extrêmes est de 294 m³/mm, soit 0,40 %. La forte variation de l'aire cible produit donc une variation très faible du coefficient volumique. La Figure 5 met en parallèle l'écart des cibles et cette convergence de K.

La convergence s'explique par le recouvrement presque complet des domaines connectés résolus. Elle déplace la sensibilité de l'étape hydro-économique vers la profondeur efficace et la valeur unitaire : le choix entre les trois scénarios spectraux ne modifie K que de 0,40 %, alors qu'un facteur dix sur d_eff ou sur c_v se transmet directement au résultat économique.

3.6 Sensibilité paramétrique de volume et débit

Pour une hauteur efficace h_eff, V_conn = K × h_eff donne le volume associé au domaine résolu. Avec d_eff = h_eff × alpha, V_det = K × d_eff et Q_eq = K × d_eff/(3600T). Un millimètre de profondeur

efficace correspond à 73 904–74 198 m³; 10 mm correspondent à environ 0,74 million de m³. La durée T transforme ensuite ce volume en débit équivalent sur 1, 3, 6, 12 ou 24 heures.

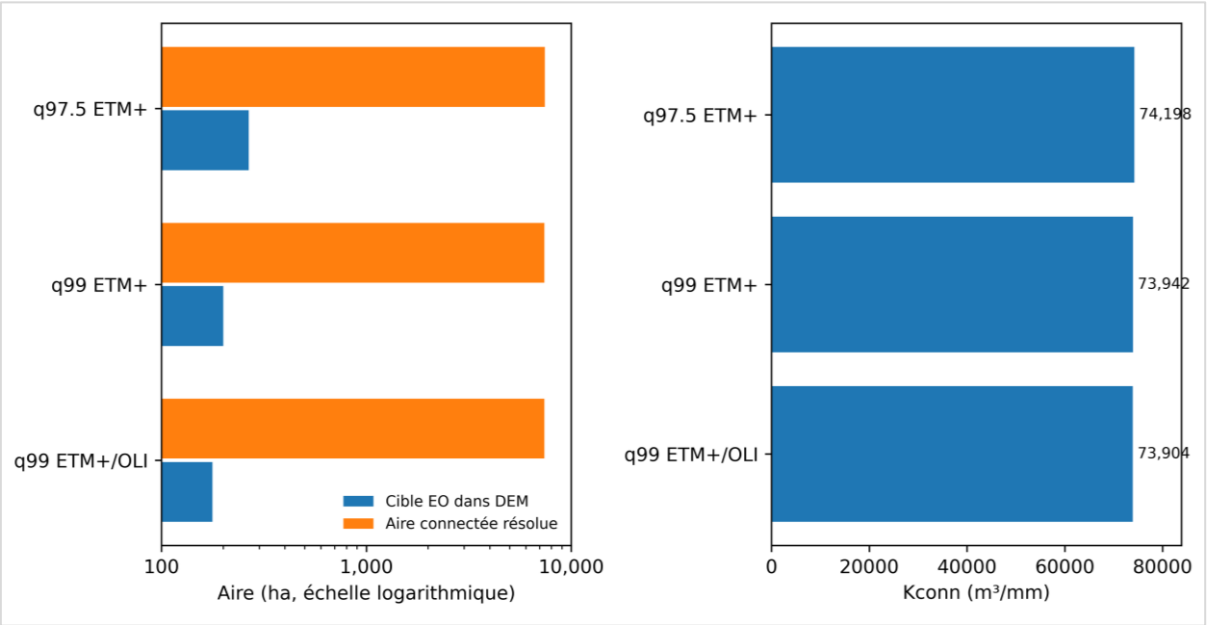


Figure 5. Aire cible, aire connectée résolue et coefficient K. Les domaines résolus restent voisins de 7,4 milliers d'hectares et K de 74 000 m³/mm dans les trois scénarios.

La grille h_eff × alpha × T sépare les trois dimensions du transfert. Pour une même profondeur efficace, le volume est identique quelle que soit la décomposition entre hauteur et fraction; le débit équivalent varie ensuite en raison inverse de la durée. Cette structure permet d'insérer directement des valeurs issues d'une campagne hydrologique future dans les fonctions déjà établies.

Le domaine connecté constitue ainsi le support spatial du transfert, tandis que h_eff, alpha et T décrivent le processus hydrologique. Cette séparation est cohérente avec la distinction entre connectivité structurelle et connectivité fonctionnelle [26] et avec les propriétés des directions de flux sur grille [23,27,28]. Elle offre une architecture de calcul où l'information topographique et l'information hydrologique peuvent être mises à jour séparément.

3.7 Sensibilité archivistique de service d'eau

Pour d_eff = 1 mm, l'équivalent de service d'eau atteint 55,4 à 55,6 millions d'ariary avec 750 ariary/m³ et 147,8 à 148,4 millions d'ariary avec 2 000 ariary/m³. L'étendue entre scénarios reste inférieure à 1 % car elle suit directement la variation de K. La Figure 6 montre la croissance linéaire de ces deux équivalents avec d_eff sur toute la grille paramétrique.

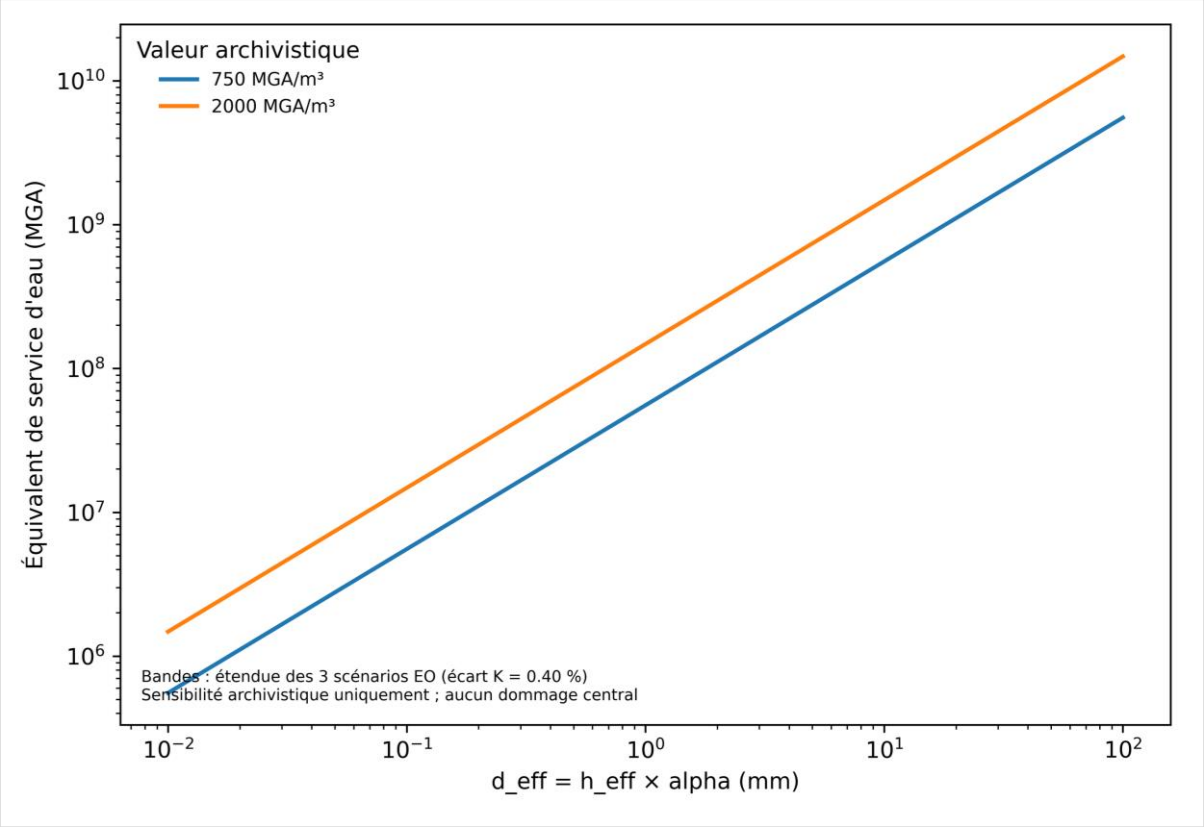


Figure 6. Équivalent documentaire de service d'eau en fonction de la profondeur efficace. Les deux lignes utilisent 750 et 2 000 ariary/m³; la bande représente l'étendue des trois coefficients K.

Table 5. Coefficients finaux et équivalents documentaires pour d_eff = 1 mm.

Scénario	K (m³/mm)	750 ariary/m³, d_eff=1 mm	2 000 ariary/m³, d_eff=1 mm
Strict inter-capteurs	73 904	55,4 M ariary	147,8 M ariary
99e percentile	73 942	55,5 M ariary	147,9 M ariary
97,5e percentile	74 198	55,6 M ariary	148,4 M ariary
Min–max	73 904–74 198	55,4–55,6 M ariary	147,8–148,4 M ariary
Formule	C = K × d_eff × c_v	équivalent de service	équivalent de service

Les deux valeurs unitaires proviennent du Madagascar National Water Project [24] : environ 750 ariary/m³ pour le service domestique et 2 000 ariary/m³ aux bornes-fontaines. Leur application à K transforme chaque profondeur efficace en équivalent monétaire de service d'eau. Les niveaux obtenus fournissent l'échelle économique associée au domaine connecté et à la profondeur choisie [25]. La pente monétaire est donc directement proportionnelle à K : pour une profondeur efficace donnée, l'écart entre scénarios reste très faible tandis que le changement de valeur unitaire déplace immédiatement l'échelle des montants.

4. Discussion

4.1 De la cible spectrale au domaine connecté

La contribution principale de l'étude est la quantification successive de trois échelles spatiales : 434,1 ha de première apparition spectrale cumulée depuis 2008; 184,0–274,0 ha de cibles spectrales en 2022; 7 395–7 425 ha de domaine topographiquement connecté. Après restriction au modèle d'élévation, la cible opérationnelle est de 177,4–266,8 ha et le rapport domaine connecté/cible atteint 27,8–41,7. Cette amplification spatiale constitue le résultat structurant du passage entre télédétection et drainage.

Le rapport de 27,8 à 41,7 montre qu'une modification spectrale spatialement concentrée peut occuper une position topographique associée à un territoire plusieurs dizaines de fois plus vaste. La stabilité du domaine connecté, malgré l'élargissement de la cible de 177,4 à 266,8 ha, renforce ce constat : les trois scénarios rejoignent presque la même trame drainante. Le cumul de 434,1 ha apporte en parallèle la dimension chronologique en montrant comment le signal s'est étendu depuis 2008.

La variation réduite du domaine connecté indique que la localisation des composantes pèse davantage que leur seule surface. Les trois cibles intersectent un ensemble de chemins amont commun, puis l'ajout de composantes dans les scénarios plus larges étend faiblement ce support. Cette propriété explique à la fois l'emboîtement des cartes, l'écart de seulement 30,0 ha entre les domaines extrêmes et la convergence du coefficient K.

L'extension spatiale atteint 86,1–86,5 % des 8 585,9 ha du modèle d'élévation et les chemins maximaux dépassent 28 km. Ces deux métriques placent le signal spectral dans une organisation drainante de grande portée spatiale. La Figure 4 visualise cette géométrie : des cibles de quelques centaines d'hectares sont enchâssées dans des domaines amont presque identiques à l'échelle du support topographique.

4.2 Ce que la convergence de K signifie

K condense cette géométrie en un facteur volumique d'environ 74 000 m³ par millimètre. La sensibilité de K au choix parmi les trois cibles spectrales est faible : son étendue n'est que de 0,40 %. Une fois K établi, la profondeur efficace règle linéairement le volume et le rapport profondeur/durée règle le débit équivalent.

Cette architecture sépare deux informations complémentaires. La première, issue des données Landsat et du modèle d'élévation, fixe le support spatial et K. La seconde, portée par h_eff, alpha et T, fixe l'intensité du transfert. Le passage d'un scénario de 1 mm à 10 mm multiplie ainsi directement le volume par dix, tandis qu'un passage de 1 h à 10 h divise le débit équivalent par dix à profondeur constante.

La concentration des sorties apporte une seconde lecture utile. Une seule sortie reçoit plus de 90,7 % des contributions et les cinq premières environ 98 %. Cette asymétrie transforme un domaine de plusieurs milliers d'hectares en une stratégie de suivi spatialement concentrée : un petit nombre de points

peut couvrir l'essentiel des chemins topographiques associés aux cibles 2022. La hiérarchie fournie par les parts de sortie peut donc guider directement l'implantation d'un réseau de mesure.

4.3 Portée pour la décision et le suivi

Pour la gestion, quatre indicateurs ressortent : l'aire de la cible spectrale 2022, le rapport connectivité/cible, la concentration vers les sorties et K. Le premier décrit l'état de surface; le deuxième mesure l'amplification spatiale; le troisième hiérarchise les points de suivi; le quatrième transforme une profondeur efficace en volume. Ensemble, ils forment une chaîne directement mobilisable pour concevoir des observations hydrologiques et comparer des scénarios de gestion.

L'évaluation économique reprend cette structure modulaire. Une profondeur efficace mesurée peut être injectée directement dans V_det; une durée observée dans Q_eq; une valeur locale de service dans C_archival. La partie Landsat-topographie reste inchangée tant que la géométrie de 2022 et le modèle d'élévation sont conservés. Cette séparation facilite la comparaison d'hypothèses économiques tout en conservant la chronologie spectrale [25].

Les repères de 750 et 2 000 ariary/m³ donnent une première échelle monétaire documentée. À d_eff = 1 mm, le domaine connecté correspond à 55,4–55,6 millions d'ariary dans le premier cas et 147,8–148,4 millions dans le second. La différence entre ces deux niveaux provient directement de la valeur unitaire, alors que la différence entre les trois scénarios spectraux reste inférieure à 1 %. Le résultat économique est donc dominé par d_eff et c_v, beaucoup plus que par le choix du masque spectral [24,25].

La fenêtre 1993–2022 intègre les conditions climatiques réellement rencontrées pendant les acquisitions Landsat. Les composites humide et sec échantillonnent deux états saisonniers chaque année, de sorte que la progression spectrale est reconstruite dans son contexte interannuel effectif. Le forçage climatique intervient ici comme contexte temporel de l'observation de surface; la contribution quantitative de cette branche porte sur la chronologie Landsat, la topographie et le transfert hydro-économique.

4.4 Limites de portée

La portée de la télédétection est définie par la résolution de 30 m, le nombre d'observations disponibles et les différences inter-capteurs. La série primaire Enhanced Thematic Mapper Plus assure la continuité 2001–2022 et Operational Land Imager sert de contrôle de concordance [5-9]. L'interprétation thématique d'une anomalie spectrale reste liée à ces caractéristiques de l'archive et aux règles de détection [15-21].

La portée topographique est définie par les 8 585,9 ha du modèle d'élévation disponible. Les trois domaines connectés atteignent sa bordure; Priority-Flood modifie les dépressions et D8 impose une direction par cellule [22,23,27,28]. Le rapport 27,8–41,7, les parts de sortie et K décrivent donc le support topographique effectivement utilisé dans cette étude.

La portée hydrologique dépend de h_eff, alpha et T. Ces trois paramètres sont laissés explicites dans les fonctions parce que la branche actuelle ne contient pas de série locale permettant de les estimer. Une instrumentation des sorties dominantes fournirait précisément les données nécessaires pour transformer la grille paramétrique en estimation de processus [26].

La portée économique dépend de la valeur unitaire du service considéré. Les 750 et 2 000 ariary/m³ documentent respectivement des services d'eau domestique et de borne-fontaine dans le projet national [24]. Une évaluation locale de Mandena devra sélectionner le service économique correspondant à l'usage étudié avant toute interprétation de coût ou de dommage [25].

La résolution temporelle dépend également de la construction des composites humide et sec. Une année est représentée par la médiane des observations valides disponibles dans sa fenêtre saisonnière; le nombre d'observations est donc conservé comme variable de support. Cette architecture privilégie la continuité de la série et la comparabilité annuelle, mais elle ne localise pas à l'intérieur d'une saison le jour exact où une composante a franchi le seuil spectral.

Le passage entre capteurs repose sur sept paires temporellement compatibles et sur des décalages additifs estimés à l'intérieur de chaque saison. Operational Land Imager sert à corroborer l'état obtenu avec Enhanced Thematic Mapper Plus; Operational Land Imager 2 intervient dans le diagnostic 2022. Cette organisation réduit l'influence des ruptures instrumentales sur la chronologie, tout en laissant la série primaire porter l'estimation temporelle.

Le support topographique appelle une seconde précaution : 11,03 % des cellules sont modifiées par le remplissage Priority-Flood, avec 1,51 m de correction positive moyenne et 13,0 m au maximum. D8 associe ensuite une seule direction de drainage à chaque cellule. Les domaines calculés décrivent donc exactement la géométrie obtenue avec ce conditionnement, ce routage et l'étendue disponible du modèle d'élévation.

Enfin, la grille hydrologique couvre des hauteurs efficaces de 1 à 100 mm, des fractions alpha de 0,01 à 1 et des durées de 1 à 24 h. Ces valeurs organisent la sensibilité du transfert et permettent de lire directement l'effet de chaque paramètre. Leur estimation locale demanderait des séries de débit, de niveau ou de stockage aux sorties dominantes; les parts de sortie calculées dans cette étude fournissent précisément la hiérarchie spatiale pour acquérir ces données.

5. Conclusion

La reconstruction 1993–2022 met en évidence une progression spectrale cumulative de 434,1 ha et un état 2022 compris entre 184,0 et 274,0 ha selon trois scénarios emboîtés. Après restriction au modèle d'élévation, les cibles de 177,4 à 266,8 ha se rattachent à 7 395–7 425 ha de domaine amont. Le rapport connectivité/cible atteint 27,8–41,7, ce qui établit un changement d'échelle spatial de plusieurs dizaines de fois.

Plus de 99,92 % de l'aire connectée est résolue vers une sortie. La première concentre 90,7–91,1 % des contributions et les cinq premières 97,9–98,1 %. Le coefficient K atteint 73 904–74 198 m³/mm et ne varie que de 0,40 % entre les scénarios. La géométrie de drainage est donc très stable face à l'élargissement de la cible spectrale et fournit une base précise pour hiérarchiser les sites de suivi.

Le transfert hydro-économique prolonge ce résultat par d_eff = h_eff × alpha, V_det = K × d_eff et Q_eq = K × d_eff/(3600T). Un millimètre de profondeur efficace représente environ 74 000 m³. Avec les deux valeurs documentaires de service d'eau, l'équivalent atteint 55,4–55,6 millions d'ariary à 750 ariary/m³ et 147,8–148,4 millions à 2 000 ariary/m³.

L'étude relie ainsi une archive Landsat de trente ans, un état spectral 2022, un routage topographique et une évaluation hydro-économique paramétrique dans une même chaîne quantitative. Le résultat scientifique le plus marquant est l'écart d'échelle entre quelques centaines d'hectares de cibles et environ 7,4 milliers d'hectares connectés, associé à une forte concentration des contributions vers les sorties dominantes et à un coefficient volumique presque invariant. Ces résultats fournissent des repères directement réutilisables pour le suivi hydrologique et l'évaluation économique de Mandena.

5.1 Disponibilité des données et reproductibilité

Le paquet de reproductibilité *landsat_mandena_hydroeconomy_reproducibility_1993_2022* rassemble les données Landsat locales utilisées pour l'analyse 1993–2022, le modèle numérique d'élévation, les sorties scientifiques gelées des étapes WP-A à WP-Y, les tables de résultats finales, les scripts permettant la réexécution intégrale hors ligne, les manifestes de contrôle SHA-256 ainsi que les figures finales. L'ensemble est déposé en libre accès sur Zenodo et peut être consulté et téléchargé à l'adresse permanente suivante : https://doi.org/10.5281/zenodo.22391402. Les éléments originaux du dépôt produits par l'auteur sont diffusés sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International; les données tierces demeurent soumises aux conditions d'utilisation de leurs fournisseurs respectifs.

5.2 Déclarations

Conflit d'intérêts : aucun déclaré.

Financement : aucun financement spécifique.

Contribution : Zo Rivomanana Rasoanaivo a assuré l'ensemble du travail.

6. Bibliographie

[1] Vincelette, M., Dumouchel, J., Giroux, J., & Heriarivo, R. (2007). The Tolagnaro (Fort Dauphin) region: A brief overview of the geology, hydrology, and climatology. In J. U. Ganzhorn, S. M. Goodman, & M. Vincelette (Eds.), Biodiversity, Ecology and Conservation of Littoral Ecosystems in Southeastern Madagascar, Tolagnaro (Fort Dauphin) (pp. 9–18). Smithsonian Institution, Washington, DC.

[2] Yager, T. R. (2010). The mineral industry of Madagascar in 2008. 2008 Minerals Yearbook, Vol. III: Area Reports–International–Africa and the Middle East. U.S. Geological Survey.

[3] Wulder, M. A., White, J. C., Goward, S. N., Masek, J. G., Irons, J. R., Herold, M., Cohen, W. B., Loveland, T. R., & Woodcock, C. E. (2008). Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring. Remote Sensing of Environment, 112, 955–969. https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.004.

[4] Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., et al. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. Remote Sensing of Environment, 145, 154–172. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001.

[5] Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote Sensing of Environment, 113, 893–903. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007.

[6] Masek, J. G., Vermote, E. F., Saleous, N. E., Wolfe, R., Hall, F. G., Huemmrich, K. F., Gao, F., Kutler, J., & Lim, T.-K. (2006). A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 3, 68–72. https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.857030.

[7] Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., & Franch, B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. Remote Sensing of Environment, 185, 46–56. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.008.

[8] Roy, D. P., Kovalskyy, V., Zhang, H. K., Vermote, E. F., Yan, L., Kumar, S. S., & Egorov, A. (2016). Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and NDVI continuity. Remote Sensing of Environment, 185, 57–70. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.024.

[9] Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 118, 83–94. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.028.

[10] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031.

[11] U.S. Geological Survey. (2026). Landsat Collection 2 Surface Reflectance. Landsat Missions documentation. Accessed 5 September 2026.

[12] Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8, 127–150. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0.

[13] 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, 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179.

[14] 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, 583–594. https://doi.org/10.1080/01431160304987.

[15] Kennedy, R. E., Yang, Z., & Cohen, W. B. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr. Remote Sensing of Environment, 114, 2897–2910. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.008.

[16] Cohen, W. B., Yang, Z., & Kennedy, R. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 2. TimeSync. Remote Sensing of Environment, 114, 2911–2924. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.010.

[17] Verbesselt, J., Hyndman, R. J., Newnham, G., & Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. Remote Sensing of Environment, 114, 106–115. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.014.

[18] Hansen, M. C., & Loveland, T. R. (2012). A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. Remote Sensing of Environment, 122, 66–74. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.024.

[19] Zhu, Z. (2017). Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 130, 370–384. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013.

[20] Zhu, Z., Woodcock, C. E., & Olofsson, P. (2012). Continuous monitoring of forest disturbance using all available Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 122, 75–91. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.030.

[21] Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. Remote Sensing of Environment, 144, 152–171. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011.

[22] Barnes, R., Lehman, C., & Mulla, D. (2014). Priority-Flood: An optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models. Computers & Geosciences, 62, 117–127. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.04.024.

[23] O'Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 28, 323–344. https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0.

[24] World Bank. (2022). Madagascar National Water Project (P174477): Project Appraisal Document, Report PAD4541. 4 May 2022. World Bank.

[25] Young, R. A., & Loomis, J. B. (2014). Determining the Economic Value of Water: Concepts and Methods (2nd ed.). Routledge.

[26] Lexartza-Artza, I., & Wainwright, J. (2009). Hydrological connectivity: Linking concepts with practical implications. Catena, 79, 146–152. https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.07.001.

[27] Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., & Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. Hydrological Processes, 5, 59–79. https://doi.org/10.1002/hyp.3360050106.

[28] Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. Water Resources Research, 33, 309–319. https://doi.org/10.1029/96WR03137.