

Modèle numérique d'élévation de résolution moyenne (MNEMR)

– Série CanÉlévation – Spécifications techniques

Édition 1.0

15-06-2024

**Gouvernement du Canada
Ressources naturelles Canada**

Téléphone : +01-819-564-4857/1-800-661-2638 (Canada et États-Unis)

Télécopie : +01-819-564-5698

Courriel : geoinfo@nrcan-rncan.gc.ca

Adresse URL : <https://open.canada.ca/en/open-maps>

Avis de droit d'auteur

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, Ressources naturelles Canada.
Tous droits réservés.

HISTORIQUE DES PUBLICATIONS

Date	Version	Description
2024-06-15	1,0	Publication initiale des spécifications techniques

ACRONYMES

CGVD2013	Système canadien de référence altimétrique de 2013
CGVD28	Système canadien de référence altimétrique de 1928
CNSB	Composite nationale des superficies brûlées
DNGI	Densité nominale globale des impulsions
EGM2008	Earth Gravitational Model, 2008
EL90	Erreur linéaire au niveau de confiance de 90 %
EPSG	European Petroleum Survey Group
EQM	Erreur quadratique moyenne
FABDEM	Forest And Buildings removed Copernicus DEM
GEDI	Global Ecosystem Dynamics Investigation
GFCH	Global Forest Canopy Height
GLAS	Geoscience Laser Altimeter System
GLO-30	Instance du MNE Copernicus de 30 m disponible comme produit public
ICESat	Ice, Cloud and Land Elevation Satellite
InSAT	Radar interférométrique à synthèse d'ouverture
Lidar	De l'expression de langue anglaise « Light Detection and Ranging »
MNE	Modèle numérique d'élévation
MNÉC	Modèle numérique d'élévation du Canada
MNEHR	Modèle numérique d'élévation de haute résolution
MNEMR-30-MNS	Modèle numérique de surface à moyenne résolution
MNEMR-30-MNT	Modèle numérique de terrain à moyenne résolution
MNEMR-30-SMNT	Source du modèle numérique de terrain à moyenne résolution
MNS	Modèle numérique de surface
MNT	Modèle numérique de terrain
NAD83(SCRS)	Système de référence nord-américain de 1983 (Système canadien de référence spatiale)
RHN	Réseau hydro national
RNCan	Ressources naturelles Canada

RTK	Cinématique en temps réel
SCF	Service canadien des forêts
TanDEM-X	Extension à TerraSAR-X pour la mesure numérique de l'altitude
USGS	United States Geological Survey
UTM	Projection transverse universelle de Mercator (Universal Transverse Mercator)
WGS84	Système géodésique mondial de 1984
WSF	World Settlement Footprint

TERMES ET DÉFINITIONS

EPSG:3979

Définition de la projection NAD83(SCRS)/Canada Atlas Lambert qui est utilisée par Ressources naturelles Canada pour la cartographie terrestre et marine.

Lidar

De l'expression en langue anglaise « Light Detection and Ranging ». Il s'agit d'une méthode de télédétection qui utilise la lumière sous forme de laser pulsé pour mesurer les distances (distances variables) à la Terre.

Modèle numérique d'élévation (MNE)

Représentation numérique du relief constituée d'une matrice de valeurs d'élévations relatives à une surface de référence commune et correspondant à un réseau régulier de points de la surface terrestre. Ces élévations peuvent être celles du sol ou de toute autre surface réfléchive..

Modèle numérique de surface (MNS)

Représentation de la surface de la Terre incluant la végétation et les structures créées par l'homme. Le modèle numérique de surface (MNS) fournit la hauteur de la végétation, de la canopée et des structures par rapport au datum vertical.

Modèle numérique de terrain (MNT)

Représentation de la surface du sol nu sans aucun objet comme la végétation et les structures créées par l'homme. Le modèle numérique de terrain (MNT) fournit la hauteur du sol par rapport au datum vertical.

Mosaïque de modèle numérique d'élévation de haute résolution (Mosaïque MNEHR)

La Mosaïque de modèle numérique d'élévation de haute résolution offre une représentation unique et continue des données d'élévation haute résolution disponibles au pays. Le produit Modèle numérique d'élévation de haute résolution (MNEHR) utilisé est dérivé de données lidar aéroporté (principalement au sud) et d'images satellitaires au nord. La mosaïque est disponible pour le modèle numérique de terrain (MNT) et le modèle numérique de surface (MNS) à partir de services de cartographie Web. Elle fait partie de la Série CanÉlévation créée pour appuyer la Stratégie nationale de données d'élévation mise en œuvre par RNCAN. Cette stratégie vise à accroître la couverture canadienne des données d'élévation à haute résolution et à augmenter l'accessibilité des produits.

Système canadien de référence altimétrique de 2013 (CGVD2013)

Le système canadien de référence altimétrique de 2013 (CGVD2013) est le standard de référence pour les altitudes à travers le Canada. Ce système a remplacé le Système canadien de référence altimétrique de 1928 (CGVD28). Pour plus d'information sur le CGVD2013, visitez la ressource suivante: <https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-et-publications/systemes-referance-geodesiques/le-systeme-canadien-referance-spatiale-scrs/9053>**Système de référence nord-américain de 1983 [NAD83(SCRS)]**

Le système de référence nord-américain de 1983 SCRS (NAD83(SCRS)) est le système officiel de référence géométrique au Canada. Le NAD83(SCRS) est une représentation 3D dynamique du NAD83(Original) adaptée au Canada. RNCAN maintient le NAD83(SCRS) aligné sur la plaque nord-américaine à l'aide d'une estimation du mouvement de la plaque. Pour plus d'information sur le NAD83(SCRS), visitez la ressource suivante: <https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-et-publications/systemes-referance-geodesiques/le-systeme-canadien-referance-spatiale-scrs/9053>

TABLE DES MATIÈRES

ACRONYMES	iv
TERMES ET DÉFINITIONS	vi
1. Aperçu	1
2. Descriptions des ensembles de données de référence	1
2.1. Modèles numériques d'élévation	1
2.1.1. MNE Copernicus.....	1
2.1.2. Mosaïque MNEHR	2
2.2. World Settlement Footprint (empreinte des établissements humains dans le monde)	2
2.3. Hauteur des forêts	2
2.3.1. Hauteur moyenne du couvert	2
2.3.2. Hauteur du couvert forestier mondial	2
2.4. Autre	3
2.4.1. Composite nationale des superficies brûlées	3
2.4.2. Réseau hydro national	3
3. Méthode	5
3.1. MNEMR-30-MNS	5
3.2. MNEMR-30-MNT	5
3.2.1. Modèle de suppression des habitations (MSH)	6
3.2.2. Modèle de suppression des forêts (MSF).....	6
3.2.3. Modèle de détection et de filtrage des valeurs aberrantes (MDFA)	7
3.2.4. Masquer et fusionner (MF)	7
3.3. Source MNEMR-30-MNT (MNEMR-30-MNT)	8
3.4. Sites d'échantillonnage	8
3.5. Étendue spatiale	8
4. Résultats	9
4.1. Évaluation	9
4.2. Évaluation par rapport à d'autres produits similaires.....	15
4.3. Restrictions	17
Références	18

1. Aperçu

Ce document présente les données, les méthodes et les résultats de la génération d'un nouveau modèle numérique d'élévation (MNE) moderne à moyenne résolution (30 m x 30 m), le MNEMR. L'ensemble de données comprend trois éléments : le modèle numérique de surface (MNEMR-30-MNS), le modèle numérique de terrain (MNEMR-30-MNT) et une ressource qui indique la source des données d'élévation utilisées pour le MNT, appelé MNEMR-30-SMNT. Ce nouveau produit offre une couverture complète à l'échelle nationale pour le Canada et s'étend aux États-Unis, s'il y a lieu, pour couvrir les bassins versants transfrontaliers, à l'appui des études et des applications hydrologiques.

Les [spécifications complètes du produit](#) sont données dans un autre document. Le présent document met l'accent sur les aspects techniques de la création du produit.

2. Descriptions des ensembles de données de référence

Plusieurs ensembles de données ont été utilisés pour créer la collection MNEMR. Ils sont décrits ci-dessous et résumés dans le Tableau 1.

2.1. Modèles numériques d'élévation

2.1.1. MNE Copernicus

Le [MNE Copernicus](#) est un modèle numérique de surface (MNS) et contient des bâtiments, de la végétation et des infrastructures dans sa représentation de la surface de la terre (AIRBUS, 2022). Il est basé sur une version modifiée du WorldDEM^{md}. Les données utilisées pour créer WorldDEM^{md} sont des données satellitaires radar acquises durant la mission TanDEM-X, qui est un partenariat public-privé financé par l'État allemand et Airbus Defence and Space. Pour produire ce jeu de données, deux satellites, TerraSAR-X et TanDEM-X ont agi comme un interféromètre SAR (InSAR) à un seul passage en utilisant le mode bi-statique InSAR StripMap (AIRBUS, 2020). La période de collecte des données s'étend de 2011 à 2015.

Les modifications apportées par Copernicus au WorldDEM^{md} comprennent l'aplanissement des masses d'eau, l'introduction d'un écoulement régulier des cours d'eau et la modification de structures de terrain incohérentes, entre autres (AIRBUS, 2022). Le MNE Copernicus est disponible en différentes résolutions. Dans le cadre de ces travaux, seul l'ensemble de données d'une résolution de 30 mètres (GLO-30) a été utilisé, car il présente une couverture continue sur l'ensemble du territoire canadien. L'ensemble de données GLO-30 est disponible en coordonnées géographiques, EPSG:4326, et renvoie au système de référence altimétrique EGM2008. L'espacement de la grille de GLO-30 est de 1,0" en latitude avec un espacement longitudinal variable, 0,4"- jusqu'à 50° N, 0,6" entre 50° et 60°, 0,8" entre 60 et 70°, 1,2" entre 70 et 80° et 2,0" entre 80 et 85°.

Licence :

L'ensemble de données GLO-30 est disponible dans le monde entier au moyen d'une licence gratuite, à l'exception de deux pays, l'Arménie et l'Azerbaïdjan, et est offert dans les ensembles de données COP-DEM_GLO-30-DTED-R et COP-DEM_GLO-30-DGED-R (Modèle numérique d'élévation Copernicus, 2022)

Données :

Les données ont été consultées dans le portail [OpenTopography](#), qui fournit un accès au GLO-30 au moyen d'une API mondiale (OpenTopography, 2023).

Citation des données : Agence spatiale européenne, Sinergise (2021). *Modèle numérique d'élévation mondial Copernicus*. Distribué par OpenTopography. <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>. Date d'accès : 23-05-2023

2.1.2. Mosaïque MNEHR

La [Mosaïque MNEHR](#) est une représentation continue de modèles numériques d'élévation à haute résolution dérivés de lidar ou d'images satellites. Ce produit a été mis en œuvre par RNCAN et fait partie de la Série CanÉlévation. Les données de la mosaïque MNEHR ont été obtenues dans le cadre de multiples projets d'acquisition lidar et par différents [partenaires](#). Dans ce travail, seul le modèle numérique de terrain dérivé du lidar est utilisé, car il permet d'obtenir les données de terrain nu nécessaires au MNEMR-30-MNT.

Licence :

Les données sont rendues disponibles en vertu de la [Licence du gouvernement ouvert – Canada](#).

Données :

Les données sont disponibles à l'adresse <https://ouvert.canada.ca/fr>.

2.2. World Settlement Footprint (empreinte des établissements humains dans le monde)

La couche du [World Settlement Footprint \(WSF\)](#) est un ensemble de données binaires mondiales d'une résolution de 10 m, qui décrit l'étendue des établissements humains. Elle a été dérivée des images multitemporelles du Sentinel-1 et Sentinel-2.

Licence :

WSF est mis à disposition sous la [licence Creative Commons](#).

Données :

Les données sont disponibles à l'adresse : <https://download.geoservice.dlr.de/WSF2019>.

2.3. Hauteur des forêts

Plusieurs ensembles de données décrivant la hauteur des forêts au Canada et dans le monde ont été étudiés. Deux ensembles de données ont été sélectionnés dans le cadre de ce travail.

2.3.1. Hauteur moyenne du couvert

L'ensemble de données Hauteur moyenne 2015 sur les Hauteurs Moyennes des Forêts (HMF) et publié par le Service canadien des forêts est généré par la combinaison des placettes forestières lidar et des composites Landsat à base de pixels, à l'aide du plus proche voisin et d'une mesure de la distance fondée sur les forêts aléatoires (Matasci et coll., 2018).

Licence :

Les données sont rendues disponibles en vertu de la [Licence du gouvernement ouvert – Canada](#).

Données :

Les données sont disponibles à l'adresse <https://ouvert.canada.ca/fr>.

2.3.2. Hauteur du couvert forestier mondial

La carte de la hauteur du couvert forestier mondial (GFCH) a été développée par le Global Land Analysis and Discovery, de l'Université du Maryland. L'ensemble de données GFCH est un produit dérivé, créé en réunissant les mesures de la structure forestière par lidar de la Global Ecosystem Dynamics Investigation

(GEDI) et l'imagerie Landsat pour 2019 (Potapov et coll., 2021). Cet ensemble de données mondiales contient des données sur la hauteur de forêt entre les latitudes 52° N et 52° S. La méthodologie de ce prototype de carte a été publiée dans Remote Sensing of Environment. Les auteurs signalent plusieurs limites de cet ensemble de données à prendre en compte, notamment la surestimation des pentes dans certaines prairies de montagne et la confusion avec les hauteurs des bâtiments dans les zones urbaines.

Licence :

Aucune spécification.

Données :

Les données sont disponibles à l'adresse : <https://glad.umd.edu/dataset/gedi>.

2.4. Autre

Quelques ensembles de données auxiliaires ont été utilisés pour compléter le processus de modélisation.

2.4.1. Composite nationale des superficies brûlées

La Composite nationale des superficies brûlées (CNSB) comprend le calcul des surfaces forestières brûlées annuellement à l'échelle nationale depuis 1986 (Canada, 2023a). L'image composite est déterminée à partir d'une évaluation de données provenant d'une variété de sources et de techniques au Canada, présentant la meilleure mesure globale de la superficie brûlée en vue de construire l'image.

Licence :

Les données sont rendues disponibles en vertu de la [Licence du gouvernement ouvert – Canada](#).

Données :

Les données sont disponibles à l'adresse : <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/mini-entrepot/metadata/nbac>.

2.4.2. Réseau hydro national

Le Réseau hydro national (RHN) fournit une description géométrique des eaux de surface intérieures au Canada. L'ensemble de données contient des caractéristiques comme les lacs, les réservoirs, les cours d'eau (rivières et ruisseaux), les canaux, les îles, le réseau linéaire de drainage, les toponymes ou les noms géographiques, les constructions et les obstacles liés aux eaux de surface, etc. (Secrétariat et Secrétariat, 2023). Le réseau a été créé à l'aide de données à l'échelle 1:50 000 ou mieux. Seule la caractéristique des étendues d'eau permanentes est accessible pour la création du HRDTM.

Licence :

Les données sont rendues disponibles en vertu de la [Licence du gouvernement ouvert – Canada](#).

Données :

Les données sont disponibles à l'adresse <https://ouvert.canada.ca/fr>.

Tableau 1 Résumé des principaux ensembles de données utilisés

Ensemble de données	Couverture	Année de collecte	Résolution spatiale	Précision	Unité altimétrique et système de référence (s'il y a lieu)
GLO-30	Mondial	2011-2015	Latitude : - 1,0" Longitude : - variable	Précision altimétrique absolue : - < 4 m (erreur linéaire de 90 %) Précision altimétrique relative : - < 2 m pour les pentes inférieures ou égales à 20 %; - < 4 m pour les pentes supérieures à 20 %; - (erreur linéaire de 90 % de point à point dans une zone de 1° x 1°) Précision planimétrique absolue : - < 6 m (écart circulaire de 90 %)	Mètre Système de référence altimétrique EGM2008
Mosaïque MNEHR	Variable* dans tout le Canada (comprend 100 grandes villes)	2006 – En cours. <i>En mai 2024, l'année médiane des projets lidar liés à la mosaïque MNEHR est 2018.</i>	1 m ou 2 m en fonction de la DNGI des données sources	En général, moins de 1 m. Les métadonnées propres à chaque zone du projet se trouvent dans la base de données géographique des fichiers ¹ .	Mètre CGVD2013
World Settlement Footprint (empreinte des établissements humains dans le monde)	Mondial	2019	Résolution de 10 m	Masque binaire basé sur les données multitemporelles de Sentinel-1 (S1) et Sentinel-2	–

¹ La base de données des fichiers et les métadonnées sur la précision sont accessibles ici : <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/957782bf-847c-4644-a757-e383c0057995>

Forêt canadienne	Canada	2015	30 m	Validation lidar (hauteur moyenne des premiers retours) - EQM = 2,66 - % EQM = 38,6 - R ² = 0,639 - Biais = -0,03	Mètre
GFCH	52° N à 52° S globalement *	2019	30 m	Validation de GEDI : - EQM = 6,6 m - EMA = 4,45 m - R ² = 0,62 Lidar aéroporté : - EQM = 9,07 m - EMA = 6,36 m - R ² = 0,61	Mètre
* peut ne pas présenter une couverture complète					

3. Méthode

3.1. MNEMR-30-MNS

Le MNEMR-30-MNS est basé sur le MNS GLO-30. Les modifications apportées pour créer le MNEMR-30-MNS sont les suivantes :

- Reprojection vers NAD83(SCRS) Canada Atlas Lambert (EPSG:3979).
- Rééchantillonnage sur une grille de résolution de 30 mètres.
- Transformation du système de référence altimétrique de EGM2008 à CGVD2013.

3.2. MNEMR-30-MNT

Pour créer le MNEMR-30-MNT à partir du MNS et du MNEHR Copernicus GLO-30, plusieurs modèles ont été créés, chacun ayant un objectif précis (Figure 1).

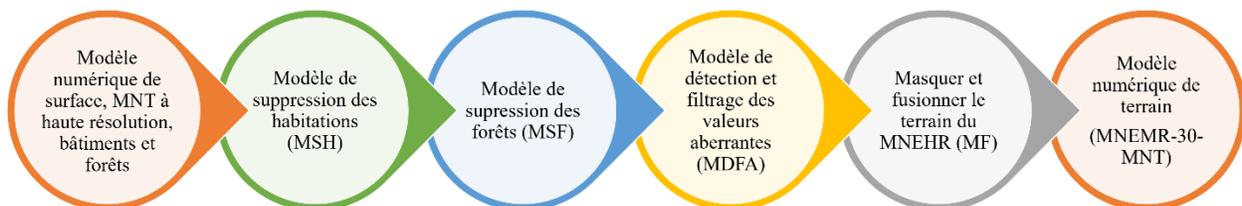


Figure 1 Méthode généralisée pour créer un modèle numérique de terrain à partir d'un modèle numérique de surface

3.2.1. Modèle de suppression des habitations (MSH)

Le modèle de suppression des habitations (MSH) explore les valeurs d'élévation autour des pixels de la zone établie par des habitations pour déceler les valeurs aberrantes. À partir des données binaires du WSF, les valeurs d'élévation correspondantes du MNS COP GIO30 sont traitées dans l'outil d'analyse par pourcentage de l'écart d'élévation (PER) de [Whitebox](#) à l'aide d'un filtre 7 x 7. Le résultat est une matrice présentant une mesure de la position topographique locale dans les limites de la grandeur du voisinage précisée. Un seuil est établi à la sortie du PER pour retenir uniquement les valeurs les plus élevées, qui représentent les artefacts correspondant aux bâtiments existants dans les données de terrain. Ces zones sont ensuite masquées et rendues nulles dans les données d'élévation et un algorithme de remplissage de vide est exécuté pour interpoler les valeurs d'élévation associées. La figure 2 illustre les différentes étapes du processus.

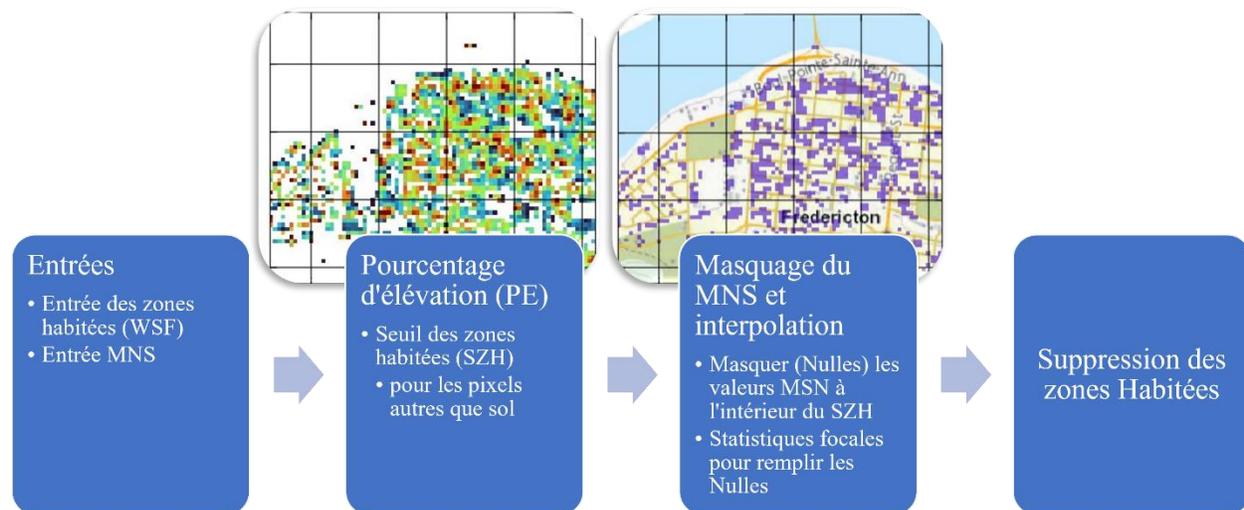


Figure 2. Étapes du Modèle de suppression des habitations (MSH)

3.2.2. Modèle de suppression des forêts (MSF)

Le modèle de suppression des forêts (MSF) réunit les paramètres du HMF et du GFCH Figure 3, et s'appuie sur les résultats du MSH. Lorsqu'il y a chevauchement entre le HMF et le GFCH, la priorité est accordée au HMF **Error! Reference source not found.** Une requête spatiale est réalisée sur les données de la CNSB pour déterminer s'il y a eu des incendies. La superficie est ensuite comparée aux données sur la hauteur des forêts pour déterminer si celle-ci doit être interpolée ou masquée. Un masque des étendues d'eau permanentes est créé et appliqué aux hauteurs des forêts afin d'éliminer les éventuelles hauteurs erronées de forêts sur les cours d'eau. De plus, comme le décrivent Potapov et coll. (2021), l'ensemble de données GFCH ne fait pas de distinction entre les éléments naturels et artificiels. Ainsi, bien que les hauteurs du couvert forestier soient surtout des arbres, il est possible que certaines valeurs de pixels représentent des structures urbaines. Par conséquent, les données de l'empreinte de l'établissement humain sont comparées à la hauteur du couvert forestier et aux valeurs d'élévation du MNS afin de déterminer si le pixel de la hauteur d'arbre doit être annulé. Un filtre de moyenne est appliqué au jeu de données des forêts traité avant d'être soustrait du MNS.



Figure 3 Étapes du modèle de suppression des forêts (MSF)

3.2.3. Modèle de détection et de filtrage des valeurs aberrantes (MDFA)

Le modèle MDFA détecte les valeurs aberrantes (p. ex., pointes ou creux erronés) provenant du processus de suppression des habitations et des forêts à partir des données du MNEMR-30-MNS, puis un filtre spatial est appliqué pour éliminer les artefacts résiduels du processus afin de fournir une représentation plus réaliste du terrain.

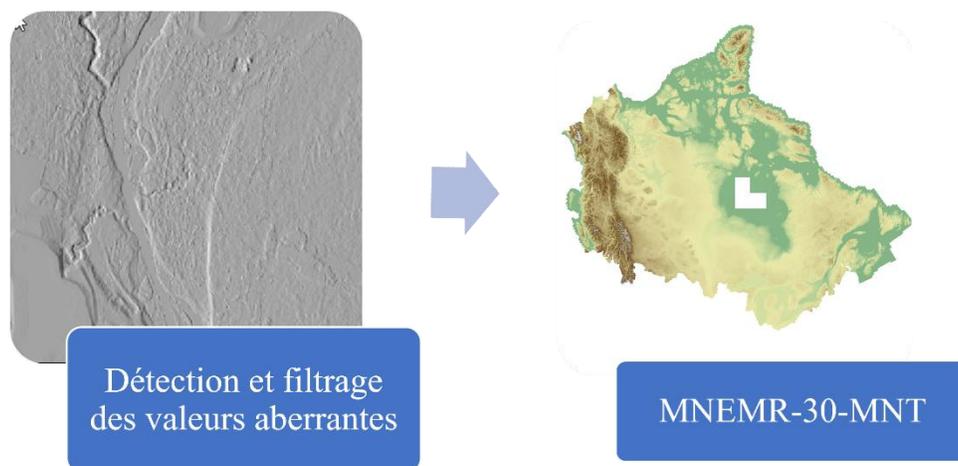


Figure 4 Modèle de détection et de filtrage des valeurs aberrantes (MDFA)

3.2.4. Masquer et fusionner (MF)

Une fois les étapes de conversion du MNEMR-30-MNS en MNT terminées, les données de terrain de la mosaïque MNEHR sont ajoutées à la matrice. Ces données sont d'abord échantillonnées de nouveau à une résolution de 30 mètres par la méthode d'interpolation bilinéaire. Une zone tampon positive et négative

est alors produite autour de la limite de l'ensemble de données. Enfin, un processus de masquage et de fusion est appliqué pour créer une transition plus transparente entre les deux modèles de terrain.

3.3. Source MNEMR-30-MNT (MNEMR-30-MNT)

Différentes sources servent à créer le jeu de données MNEMR-30-MNT. Pour aider les utilisateurs à déterminer la source utilisée à un point donné, un ensemble de données supplémentaire a été créé. La ressource MNEMR-30-MNT est une matrice qui possède trois valeurs uniques. Celles-ci représentent la source et le traitement des données d'élévation sous-jacentes. L'ensemble de données contient principalement les valeurs de 1 et 10. Les valeurs des zones mélangées représentent les parties où le processus de mélange a été appliqué pour réduire au minimum les écarts verticaux entre le MNEMR-30-MNT et le MNEMR-30-MNS.

Tableau 2 Indice des valeurs utilisées dans le MNEMR-30-SMNT

Étiquette	Source
1	MNEMR-30-MNS (données GLO-30 ajustées)
5	Zone mixte
10	MNEMR-30-MNT (de MNEHR)

3.4. Sites d'échantillonnage

Pour évaluer les résultats du processus de modélisation MNEMR-30-MNT, plusieurs sites d'échantillonnage ont été identifiés. Ces sites d'échantillonnage sont principalement des cellules de 15 km x 15 km qui chevauchent les zones de couverture du MNEHR existantes (Figure 5). Jusqu'à 30 sites d'échantillonnage ont été créés par écozone terrestre. Le plus petit échantillon, 4 sites, se trouve dans l'écozone terrestre des plaines hudsoniennes (PH), qui ne contient qu'une très petite quantité de données du MNEHR. Des échantillons ont également été retenus dans les trois écozones non forestières. Au total, de ces sites, 1 448 626 paires d'échantillons ont été générées au hasard et évaluées. Pour la validation des zones comportant des données de terrain du MNEHR comme élévation de base, 54 487 points de contrôle RTK ont été utilisés, couvrant à la fois les zones végétalisées et non végétalisées.

3.5. Étendue spatiale

L'étendue spatiale de ce produit couvre l'ensemble du Canada et une petite partie des États-Unis (Figure 5). Les limites sud et nord-ouest ont été déterminées à partir d'une combinaison des unités de travail du [Réseau hydro national](#) ainsi que des aires de drainage du jeu de données des limites de bassins versants de l'USGS, niveau 8 (HU08) s'écoulant vers le Canada. Une zone tampon de 5 kilomètres a été appliquée à cette étendue pour compenser les erreurs qui auraient pu se produire pendant la délimitation des unités.

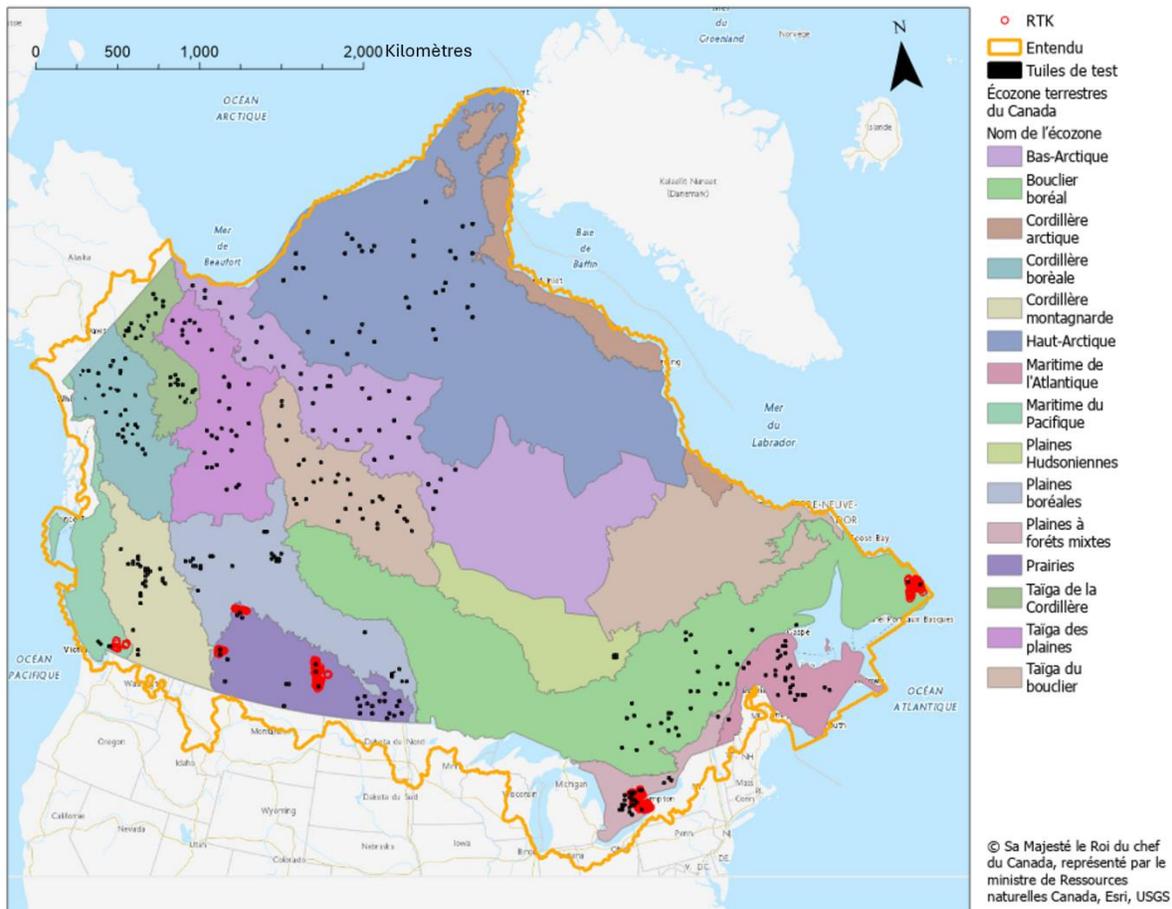


Figure 5 Emplacement des sites d'échantillonnage pour les essais et la validation, limité à la zone de couverture du MNEHR, en avril 2024

4. Résultats

Comme le MNEMR-30-MNT contient des données provenant de deux sources, la précision a été validée de deux manières.

4.1. Évaluation

Pour les zones MNEMR-30-MNT dérivées de la mosaïque MNEHR, la précision verticale a été évaluée par rapport aux points de contrôle RTK Tableau 2. Cette évaluation de la précision fournit principalement des informations sur l'effet du rééchantillonnage bilinéaire de 1 m à 30 m. Les pixels avec MNEMR-30-MNS comme données de base ont été comparés aux données MNEHR résultant de l'étape 3.2.3 Tableau 3.

Les points de contrôle RTK utilisés dans l'analyse sont les mêmes que ceux utilisés pour évaluer la précision du produit MNEHR. En l'occurrence, les points ont été choisis dans l'ensemble du pays et comprennent des centres urbains et des zones rurales. Les valeurs EQM et EL90 les plus élevées sont observées dans les basses-terres continentales de la Colombie-Britannique et les plus faibles en Saskatchewan, ce qui correspond à la topographie représentative de ces régions (relief montagneux et

relief élevé par rapport aux vastes plaines plates de la Saskatchewan). La différence moyenne entre tous les points retenus est de 0,23 m avec un EQM de 1,39 m et une EL90 de 2,25 m Tableau 3. Dans l'ensemble, les résultats se situent dans la plage des valeurs attendues à la suite de l'arrondissement et du rééchantillonnage entre les cellules de 1 m à 30 m et des techniques de filtrage appliquées aux limites de la couverture du terrain MNEHR pour faciliter la transition avec les données d'élévation MNEMR-30-MNT.

Pour les zones où le MNEMR-30-MNS est la source des données sur l'altitude, le plus petit nombre de modifications a été effectué dans les trois écozones non exploitées des Prairies, du Bas-Arctique et du Haut-Arctique. Les modifications apportées aux données dans ces zones sont liées uniquement à la suppression des bâtiments et aux différents filtres qui ont été appliqués. Les Prairies sont la seule région qui a utilisé le MNEHR basé sur le lidar pour l'évaluation. Le sud et le nord de l'Arctique ont tous deux été comparés au MNEHR, qui, dans le nord, est en fait un modèle de surface (MNS). Seuls les ensembles de données MNS sont produits, en général, en raison de la densité relativement faible de la végétation et des infrastructures situées au nord de la limite forestière productive Figure 6. Les résultats du MNEMR-30-MNT dans les régions non boisées ont un écart moyen de -0,1 m et une EQM de 1,0 m; 99 % des échantillons ayant des pentes inférieures à 20 % sont à moins de 2m du contrôle. Ces statistiques sont conformes à la précision initiale signalée du COP GLO-30 dans le rapport [AIRBUS](#). Les résultats de la cordillère boréale, de la taïga de la cordillère et de la taïga des plaines ne sont pas aussi bons que ceux des régions méridionales, avec des valeurs EQM de 2,8 m, 2,5 m et 2,9 m, respectivement. Cela est probablement dû à la nature des données de contrôle utilisées pour la comparaison, à savoir le MNS. Le MNS de contrôle n'est pas un modèle de terrain nu et, en raison de la faible densité de la végétation, il n'y a pas de traitement important pour éliminer les arbres, les infrastructures et les autres végétaux.

Des exemples des résultats du MNEMR-30-MNT sont présentés aux Figure 7, 9 et 10, et illustrent les changements entre la valeur d'élévation du MNEMR-30-MNS et celle du MNEHR.

Tableau 3 Résultats de MNEMR-30-MNT par rapport aux points de contrôle RTK en mètres (ZNV = zones non végétalisées et ZV = zones végétalisées)

	Région	Statistiques				Nombre d'échantillons
		MOYENNE	EQM	EL90	Écart type	
ZNV	Colombie-Britannique (basses-terres continentales)	0,21	1,99	3,14	1,99	162
ZV	Colombie-Britannique (basses-terres continentales)	0,00	1,71	2,76	1,73	38
ZNV	Alberta (Calgary)	0,62	1,28	2,08	1,13	8 893
ZNV	Alberta (Edmonton)	0,94	1,38	2,24	1,02	9 485
ZNV	Ontario (RGT)	0,15	0,73	1,18	0,71	33 196
ZNV	Ontario (Hamilton/Niagara)	-0,10	0,66	1,08	0,66	269
ZV	Ontario (Hamilton/Niagara)	-0,10	0,66	1,08	0,66	211
ZNV	T.-N.-L. (St. Johns)	-0,08	2,35	3,83	2,35	1 154
ZV	T.-N.-L. (St. Johns)	0,21	2,85	4,66	2,84	802

ZNV	Saskatchewan (lac de la Dernière-Montagne)	0,49	0,78	1,25	0,61	189
ZV	Saskatchewan (lac de la Dernière-Montagne)	0,09	0,54	0,86	0,54	88
Moyenne des zones non végétalisées		0,32	1,31	2,12	1,21	
Moyenne des zones végétalisées		0,05	1,44	2,34	1,44	
	Moyenne	0,22	1,36	2,20	1,29	

Tableau 4 Résultats par écozone forestière (F) et non forestière (N) pour les zones où le MNEMR-30-MNS (avec suppression des zones bâties et des forêts) est la base des données d'élévation, par rapport aux données du MNEHR.

Forestière/no n-forestière	Région de l'écozone	Statistiques				Pente < 20 % **	
		MOYENN E	EQM	EL90	Écart type	% < 2 m	% < 4 m
F	Maritime de l'Atlantique	-0,1	3,7	5,9	3,7	73	92
F	Cordillère boréale	0,7	2,8	4,5	2,7	77	95
F	Plaines boréales	0,3	2,6	4,2	2,6	79	96
F	Bouclier boréal	0,2	3,5	5,6	3,4	71	92
F	Plaines hudsoniennes	2,5	2,7	3,8	1,1	30	96
F	Cordillère montagnarde	-0,8	4,2	6,9	4,1	81	92
F	Plaines à forêts mixtes	-1,6	4,7	7,7	4,4	98	100
F	Maritime du Pacifique	-1,8	4,1	6,8	3,7	94	97
F	Taïga de la Cordillère	-0,1	2,5	4,0	2,5	88	97
F	Taïga des plaines	1,3	2,9	4,5	2,6	57	93
N	Taïga du Bouclier	1,6	2,5	4,0	1,9	61	89
N	Prairies	0	1,3	2,2	1,3	98	100
N	Bas-Arctique	-0,2	0,7	1,1	0,6	99	100
	Moyenne des zones forestières	0,2	3,3	5,3	3,0	74	94
	Moyenne des zones non forestières	-0,1	1,0	1,6	1,0	99	100
	Moyenne TOUS	0,2	2,9	4,7	2,7	77	95
	<i>** pourcentage de pixels avec une différence de « X » par rapport au MNEHR dans cette plage de pentes (pente selon le MNEHR)</i>						

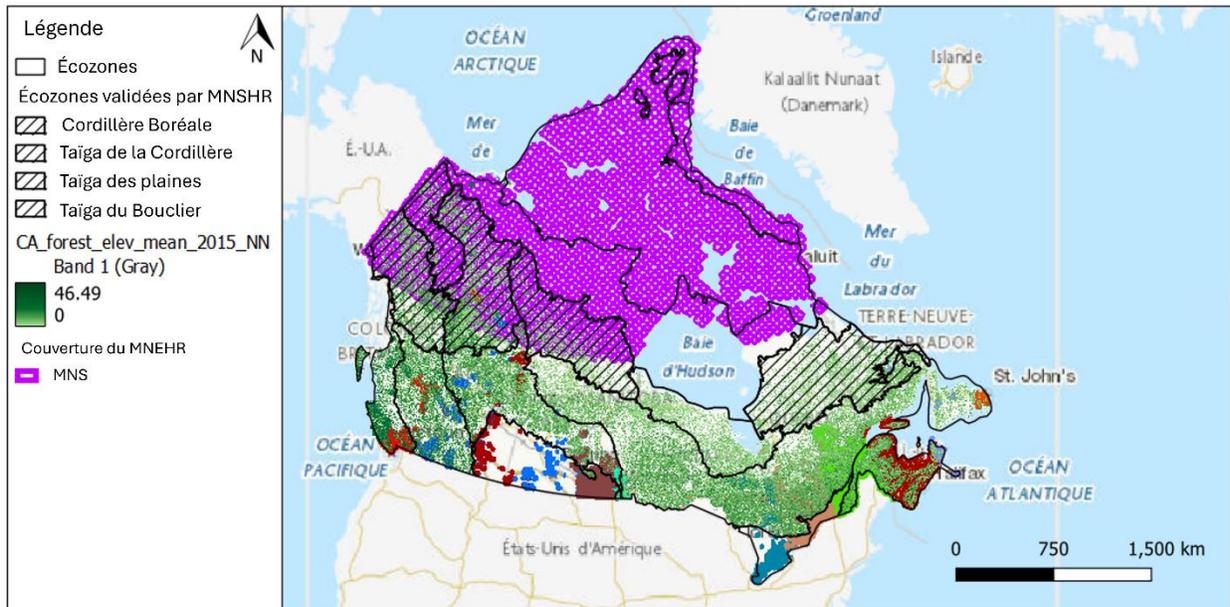


Figure 6 Étendue de la couverture du MNEHR, données sur les écozones et la hauteur des forêts.

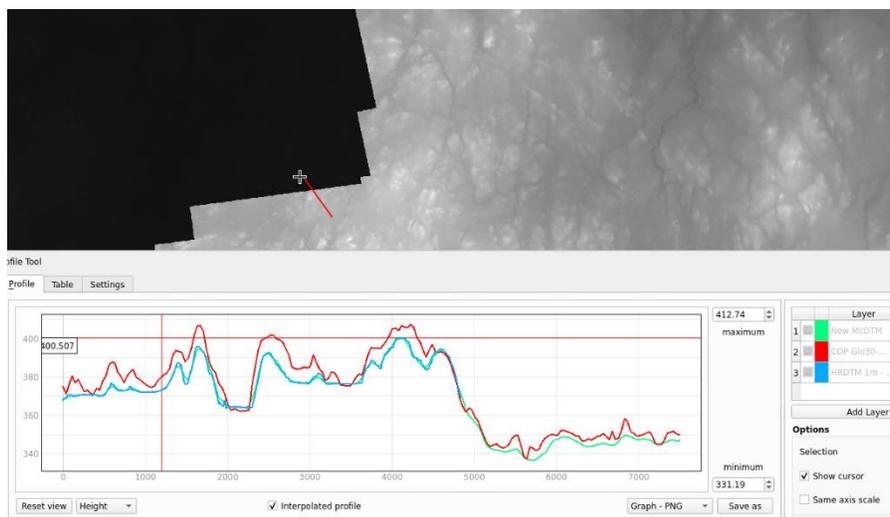


Figure 7 Exemple de suppression de zones forestières dans le sud de l’Ontario, où il n’y a qu’une couverture GEDI Global et une couverture MNEHR partielle. La ligne rouge correspond à MNEMR-30-MNS, la ligne bleue à MNEHR MNT et la ligne verte à MNEMR-30-MNT. La couverture MNEHR se termine à la droite du profil.

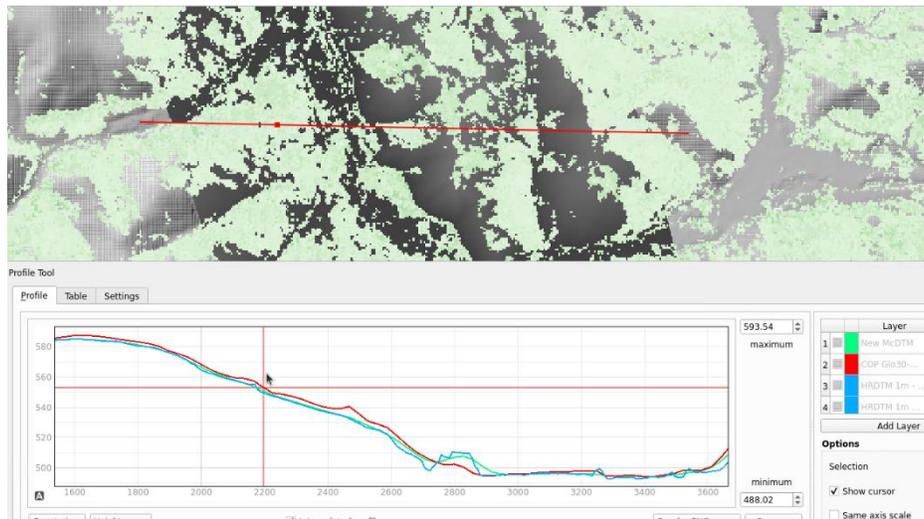


Figure 8 Exemple au nord du Canada, illustrant l’amélioration du MNEMR-30-MNT (ligne verte) en MNEMR-30-MNS (ligne rouge) et l’élimination des forêts et des bâtiments comparativement au MNEHR (ligne bleue).

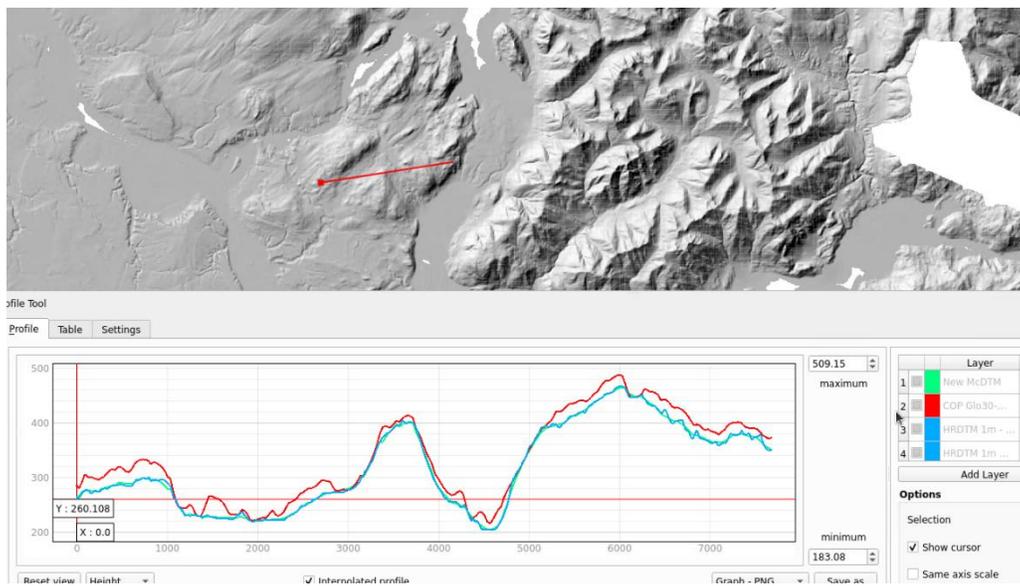


Figure 9 Exemple de l’Ouest canadien, alignement du MNEMR-30-MNT (ligne verte) sur le MNEHR (ligne bleue). La ligne rouge correspond à MNEMR-30-MNS.

4.2. Évaluation par rapport à d'autres produits similaires

En plus de comparer le MNEMR-30-MNT au MNEHR, des produits de résolution similaires, notamment le [Modèle numérique d'élévation du Canada](#) (MNÉC) de RNCAN et [Forests and Buildings Removed](#) (FABDEM) de Fathom, sont également évalués par rapport au MNEHR.

Le produit MNÉC est l'ancien jeu de données nationales sur l'élévation pour le Canada qui a été archivé en 2011. Selon le [Modèle numérique d'élévation du Canada : Spécifications du produit – Édition 1.1](#), la source MNÉC est décrite comme suit :

« Le MNÉC est issu des Données numériques d'élévation du Canada (DNÉC) existantes. Ces dernières ont été extraites des éléments hypsographiques et hydrographiques de la Base nationale de données topographiques (BNDT) à l'échelle de 1/50 000, de la Base de données géospatiales (BDG), de données de position à diverses échelles acquises par les provinces et les territoires, ou d'images de télédétection. »

Le deuxième produit de comparaison est FABDEM, publié par Fathom. Ce jeu de données s'appuie également sur Copernicus GLO-30 comme données d'élévation de base. La méthode utilisée par Fathom pour créer FABDEM passe par des techniques d'apprentissage automatique, plus précisément des modèles de régression à forêt aléatoire (Hawker et coll., 2022). Les MNT par lidar de 12 pays ont été sélectionnés pour servir de données d'exercice pour les modèles. Le GFCH a été utilisé par Fathom pour les prédictors de la hauteur de forêt, et les données ICESat-2 L3A Land and Vegetation Height (version 4) ATL-08 ont été utilisées aux endroits non couverts par le GFCH (Hawker et coll., 2022). Une série de filtres ont été appliqués, notamment le détecteur de contour Sobel, le masquage flou, des filtres gaussiens de différentes tailles et un filtre de lissage bilatéral préservant les contours.

Tableau 5 Résultats du MNÉC et du FABDEM comparés à ceux du MNEMR-30-MNT

	MNÉC						FABDEM					
	MOYEN NE	EQM	EL90	Écart type	% < 2 m	% < 4 m	MOYEN NE	EQ M	EL90	Écart type	% < 2 m	% < 4 m
Maritime de l'Atlantique	-1,61	6,45	10,49	6,24	81,0	89,3	-0,1	3,0	4,9	3,0	79	95
Cordillère boréale	-5,79	19,67	32,16	18,79	67,6	74,3	2,0	6,1	10,0	5,7	63	76
Plaines boréales	0,09	3,78	6,22	3,78	82,8	94,7	0,3	3,5	5,8	3,5	88	98
Bouclier boréal	-1,55	4,59	7,35	4,32	82,9	91,5	0,4	3,2	5,1	3,1	73	91
Plaines hudsoniennes	-1,85	4,06	6,35	3,62	84,6	93,8	1,5	1,8	2,8	1,0	77	97
Cordillère montagnarde	-2,51	4,92	7,87	4,23	88,9	96,0	-0,1	4,1	6,7	4,1	79	90
Plaines à forêts mixtes	-0,78	2,20	3,55	2,05	93,9	98,6	0,4	2,1	3,5	2,1	93	99
Maritime du Pacifique	-2,63	4,10	6,53	3,15	95,8	98,6	0,1	3,9	6,4	3,9	82	90
Taïga de la Cordillère	-1,14	7,11	11,53	7,02	76,4	84,1	0,6	5,0	8,2	5,0	83	95
Taïga des plaines	0,44	8,57	14,01	8,56	74,4	83,4	1,7	3,8	6,3	3,4	75	86
Taïga du Bouclier	-0,85	2,56	4,18	2,41	93,0	99,3	0,4	1,9	3,1	1,8	90	96
Prairies	0,10	2,49	4,01	2,49	81,7	94,6	0,4	0,9	1,4	0,8	99	100
Bas-Arctique	-2,26	4,83	7,85	4,27	91,7	97,3	-0,2	0,8	1,3	0,8	99	100
Moyenne en zones forestières	-1,7	6,2	10,0	5,8	83,8	91,2	0,7	3,5	5,7	3,3	80,2	92,1
Moyenne en zones non forestières	-1,1	3,7	5,9	3,4	86,7	95,9	0,1	0,9	1,5	0,9	98,1	99,8
Moyenne TOUS	-1,6	5,8	9,4	5,5	84,2	92,0	0,5	2,9	4,8	2,8	84,1	93,7

En général, on constate que le MNEMR-30-MNT offre des résultats plus précis tout en réduisant les écarts par rapport au MNÉC, et ce, dans toutes les régions (Tableau 3,

Tableau 4 et Tableau 5). Par rapport à FABDEM, les résultats varient, MNEMR-30-MNT est légèrement plus performant dans certaines régions (Cordillère boréale, Taïga de la Cordillère, Taïga des plaines et Plaines boréales), alors qu'il est un peu moins performant dans d'autres (Plaines hudsoniennes, Plaines à forêts mixtes, Maritime de l'Atlantique). L'ajout des données MNEHR au MNEMR-30-MNT fournit une meilleure représentation du terrain nu.

Lorsqu'on évalue les dérivés du MNT, p. ex., pente, aspect, modèle HAND, les résultats semblent plus réalistes selon le MNEMR-30-MNT que selon le FABDEM (non illustré ici). L'analyse préliminaire révèle que certaines caractéristiques du terrain sont aplanies à partir du GLO-30 grâce aux étapes de traitement effectuées par Fathom. Par conséquent, bien que les statistiques puissent favoriser légèrement le FABDEM, l'utilisation des données MNEMR-30-MNT, surtout celles qui concernent des applications hydrologiques au Canada, fournit un meilleur ensemble de données de référence.

4.3. Restrictions

Les résultats présentés pour le MNEMR-30-MNT sont la meilleure solution possible en fonction des données disponibles et sont limités en fonction de la disponibilité et de la précision des données de référence.

Comme il a été mentionné précédemment, au moment où ces travaux ont été effectués, il n'existe pas d'ensemble de données unique et complet qui réunit toutes les empreintes des bâtiments. Au lieu, on a sélectionné une couche des établissements humains mondiaux, offerte sous la licence [Creative Commons licence](#). Il se peut que cette couche ne comprenne pas tous les bâtiments existants. Cependant, comme les données de la mosaïque MNEHR couvrent la plupart des grands centres urbains et ont été incluses dans le MNEMR-30-MNT, nous sommes convaincus que l'incidence est limitée.

Les travaux futurs pourraient porter sur les types de forêts, conifères et feuillus, car certaines différences d'altitude observées pourraient être liées à la réponse interférométrique du capteur durant la collecte des données et refléter des valeurs autres que le sommet du couvert forestier selon différents types de forêts.

Le dernier point à mentionner concerne les données d'élévation utilisées pour la comparaison. Dans la partie méridionale du Canada, le modèle de terrain dérivé du lidar MNEHR a présenté une excellente référence pour la validation. Le problème concerne la validation dans les zones du nord, c'est-à-dire le MNS MNEHR. Dans la partie nord du pays, à quelques exceptions près, seuls des ensembles de données MNS sont produits, en général, en raison de la densité relativement faible de la végétation et des infrastructures situées au nord de la limite forestière productive. Le MNS MNEHR dispose d'images numériques optiques comme source de données, et il est généré à une résolution de 2 mètres. Consulter les [Spécifications MNEHR](#) pour plus de détails.

Références

- AIRBUS (2020), *Copernicus DEM Copernicus Digital Elevation Model Validation Report* (AO/1-9422/18/I-LG). https://spacedata.copernicus.eu/documents/20123/121239/GEO1988-CopernicusDEM-RP-001_ValidationReport_I3.0.pdf/c80c5e85-9aea-356d-c877-80d8b5e028bb?t=1668162072523
- AIRBUS (2022), *Copernicus DEM Copernicus Digital Elevation Model Product Handbook* (Product Handbook AO/1-9422/18/I-LG; p. 36). AIRBUS, https://spacedata.copernicus.eu/documents/20123/121239/GEO1988-CopernicusDEM-SPE-002_ProductHandbook_I4.0.pdf/92df0801-6714-20e4-75ae-0be634b9e301?t=1666775307957
- Canada, N. R. (2023a), *Système canadien d'information sur les feux de végétation | Métadonnées*. <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/mini-entrepot/metadata/nbac>
- Canada, N. R. (2023b, 24 février), *Stratégie nationale de données d'élévation*. Ressources naturelles Canada. <https://ressources-naturelles.canada.ca/cartes-outils-et-publications/imagerie-satellitaire-donnees-delevation-et-photos-aeriennes/strategie-nationale-de-donnees-delevation/24978?>
- Modèle numérique d'élévation Copernicus* (2022), Copernicus Contributing Missions Online. <https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model>
- Île d'Ellesmere | L'Encyclopédie canadienne* (s. d.). Consulté le 24 mai 2023, à l'adresse : <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/ile-dellesmere>
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C. et Neal, J. (2022), A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- Matasci, G., Hermosilla, T., Wulder, M. A., White, J. C., Coops, N. C., Hobart, G. W., Bolton, D. K., Tompalski, P. et Bater, C. W. (2018), Three decades of forest structural dynamics

- over Canada's forested ecosystems using Landsat time-series and lidar plots. *Remote Sensing of Environment*, 216, 697–714. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.024>
- Microsoft (2023), *Canadian Building Footprints* [ensemble de données]. Microsoft, <https://github.com/microsoft/CanadianBuildingFootprints> (Ouvrage original publié en 2019)
- OpenTopography (2023), *Modèle numérique d'élévation Copernicus GLO-30 d'OpenTopography*. <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326.3>
- Potapov, P., Li, X., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Hansen, M. C., Kommareddy, A., Pickens, A., Turubanova, S., Tang, H., Silva, C. E., Armston, J., Dubayah, R., Blair, J. B. et Hofton, M. (2021), Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 253, 112165. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112165>
- Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada et Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada (12 novembre 2021), *Modèle numérique d'élévation de haute résolution (MNEHR) – Série CanÉlévation – Portail du gouvernement ouvert*. <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/957782bf-847c-4644-a757-e383c0057995>
- Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada et Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada (2023), *Réseau hydro national – RHN – Série GéoBase – Portail du gouvernement ouvert*. <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/a4b190fe-e090-4e6d-881e-b87956c07977>
- Statistique Canada (3 janvier 2019), *La BDOI – Une base de données ouverte sur les immeubles expérimentale Document de métadonnées : concepts, méthodologie et qualité des données* [gouvernement du Canada]. La BDOI – Une base de données ouverte sur les immeubles expérimentale Document de métadonnées : concepts,

méthodologie et qualité des données. <https://www.statcan.gc.ca/fr/ecdo/bases-donnees/bdoi/metadata>