

Télédétection avancée

## Analyse de la dynamique de la superficie du glacier **Elbrouz** par télédétection

---



### Auteurs du projet :

Daria Podlovchenko

## Introduction

L'objectif du projet est de mener la télédétection du glacier **Elbrouz** (Image 1) sur la période de 1999 à 2021. L'Elbrouz est le plus haut sommet d'Europe et l'un des pics les plus élevés des sept continents. Il est situé dans le nord du Caucase, au sud de la Russie, dans la République de Kabardino-Balkarie. L'altitude de l'Elbrouz est de 5 642 mètres au-dessus du niveau de la mer. Le choix du glacier pour l'analyse est motivé par une tendance identifiée de changements significatifs dans le volume de glace.

Notre problématique est donc : En quoi l'utilisation d'images satellitaires et d'outils de télédétection permet-elle de décrypter l'évolution de la couverture glaciaire du Mont Elbrouz de 1999 à 2021, offrant des insights cruciaux pour comprendre les changements climatiques dans la région du Caucase ?

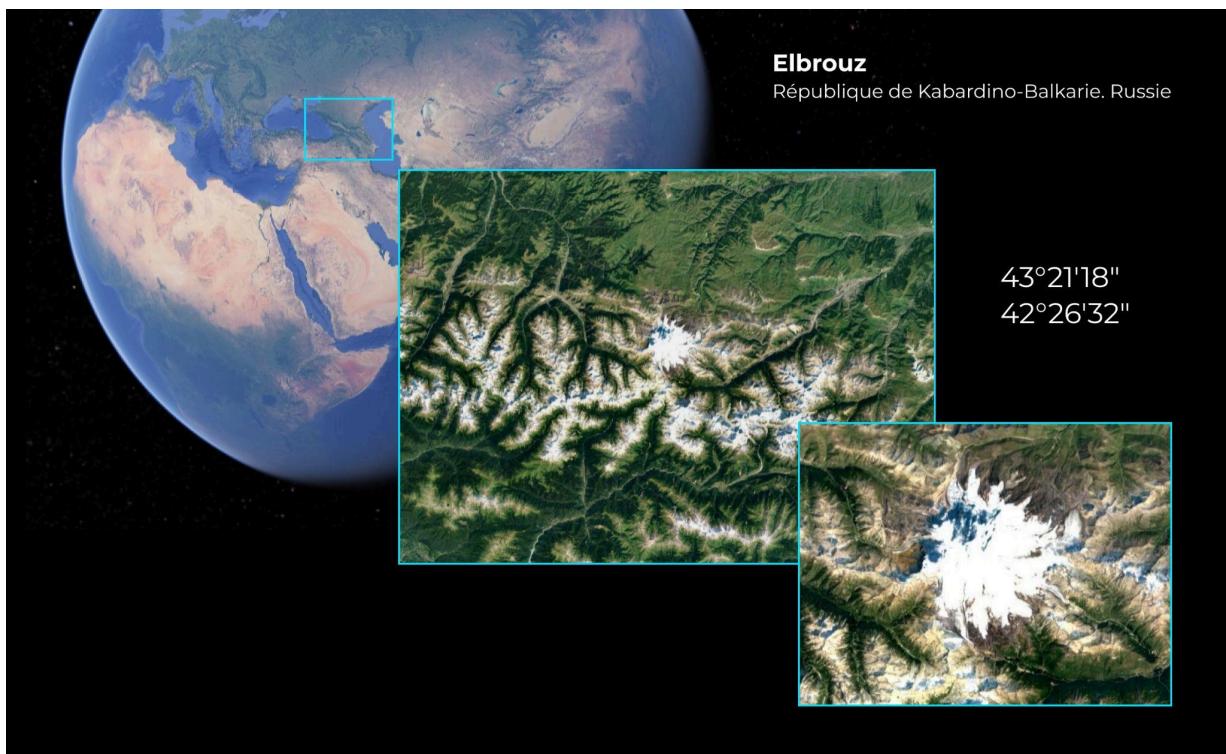


Image 1. Position géographique de l'Elbrouz (source : Google Earth)

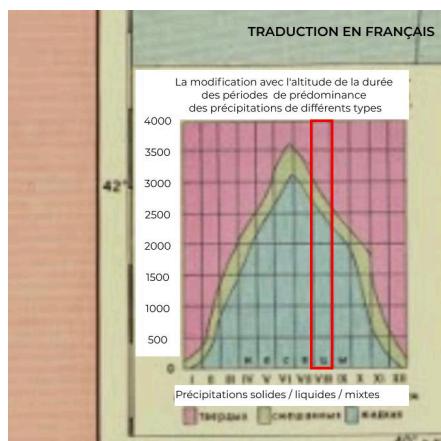
Pour atteindre l'objectif fixé, les tâches suivantes ont été identifiées (Page 20) :

- Sélection d'un système satellitaire et choix d'images spatiales en fonction de l'objectif et du sujet de l'étude ;
- Étude des indices existants pour la télédétection de la couverture glaciaire ;
- Rédaction d'un script en langage de programmation JavaScript pour télécharger et traiter ultérieurement les images nécessaires sur la plateforme Earth Engine / Traitement les images dans Orfeo Toolbox ;

- 
- Crédit de la classification NDSI et télédétection des limites des glaciers pour les années 1999 et 2021 en utilisant le logiciel ArcGIS Pro ;
  - Analyse des résultats et création d'une carte basée sur les conclusions de la classification .

## Données satellitaires

L'Elbrouz se situe (approximativement) à une altitude de 2000 à 5642 mètres, dans un climat de haute montagne. Le niveau maximal d'ablation (Image 2) est observé à la fin de juillet et au début d'août. À ce moment, la région enregistre la température maximale de l'air, le moins de débris solides et mixtes, et l'absence de liquides. Ainsi, en se basant sur les caractéristiques géographiques et climatiques du site, les images ont été prises au mois d'**août**.



*Image 2. La modification avec l'altitude de la durée des périodes de prédominance des précipitations de différents types*

(source : *Atlas des Ressources en Neige et Glace du Monde*,  
Institut de géographie de l'Académie des sciences de Russie, Moscou)

Pour mener la télédétection du glacier Elbrouz, des images satellitaires obtenues à l'aide du système satellitaire américain **Landsat 7** (lancé en 1999) ont été utilisées. Dans ce contexte, une image datant d'août 1999 a été sélectionnée. Les images Landsat 7 (Image 3) ont une résolution spatiale de 30 mètres pour les canaux 1 à 5 et 7, et de 60 mètres pour le canal 6 (canal infrarouge thermique). Le canal 8, ajouté en 2013 en raison d'une défaillance du canal 6, a une résolution spatiale de 15 mètres.

Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Landsat 7	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
	Band 1	0.45-0.52	30
	Band 2	0.52-0.60	30
	Band 3	0.63-0.69	30
	Band 4	0.77-0.90	30
	Band 5	1.55-1.75	30
	Band 6	10.40-12.50	60 * (30)
	Band 7	2.09-2.35	30
	Band 8	.52-.90	15

*Image 3. Caractéristiques satellitaires de Landsat 7*  
(source : USGS)

Les images de Landsat 7 présentent des bandes obliques en raison d'une défaillance du gyroscope sur le satellite (Image 4). Les gyroscopes sont utilisés pour stabiliser le satellite dans l'espace pendant la

prise de vue. Lorsqu'un des gyroscopes de Landsat 7 a cessé de fonctionner en 2003, le satellite est passé au gyroscope de secours. Ce gyroscope de secours fonctionne en mode de stabilisation « à blocs », ce qui signifie que le satellite est maintenu dans la bonne orientation uniquement pendant de courtes périodes de temps. En conséquence, lorsque la caméra commence à prendre des images, le satellite peut osciller légèrement. Cela entraîne un décalage des pixels entre les différentes lignes d'image, créant ainsi des bandes.



*Image 4. Artéfacts sur les images de Landsat 7*

Ces artefacts sont présents sur toutes les images de Landsat 7 prises après le 31 mai 2003. Bien que cette limitation rend ces images moins adaptées à certains types d'analyses, les données de Landsat 7 restent précieuses et sont utilisées dans de nombreuses recherches.

En conséquence, pour déchiffrer les limites du glacier en 2021, une image du système satellitaire **Landsat 8** a été choisie (Image 5), lancé le 11 février 2013. Les images de Landsat 8 ont une résolution spatiale de 30 mètres pour tous les canaux, y compris le canal infrarouge thermique (canal 10).

	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)  Launched February 11, 2013	Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
	Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
	Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
	Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
	Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

*Image 5. Caractéristiques satellitaires de Landsat 8  
(source: USGS)*

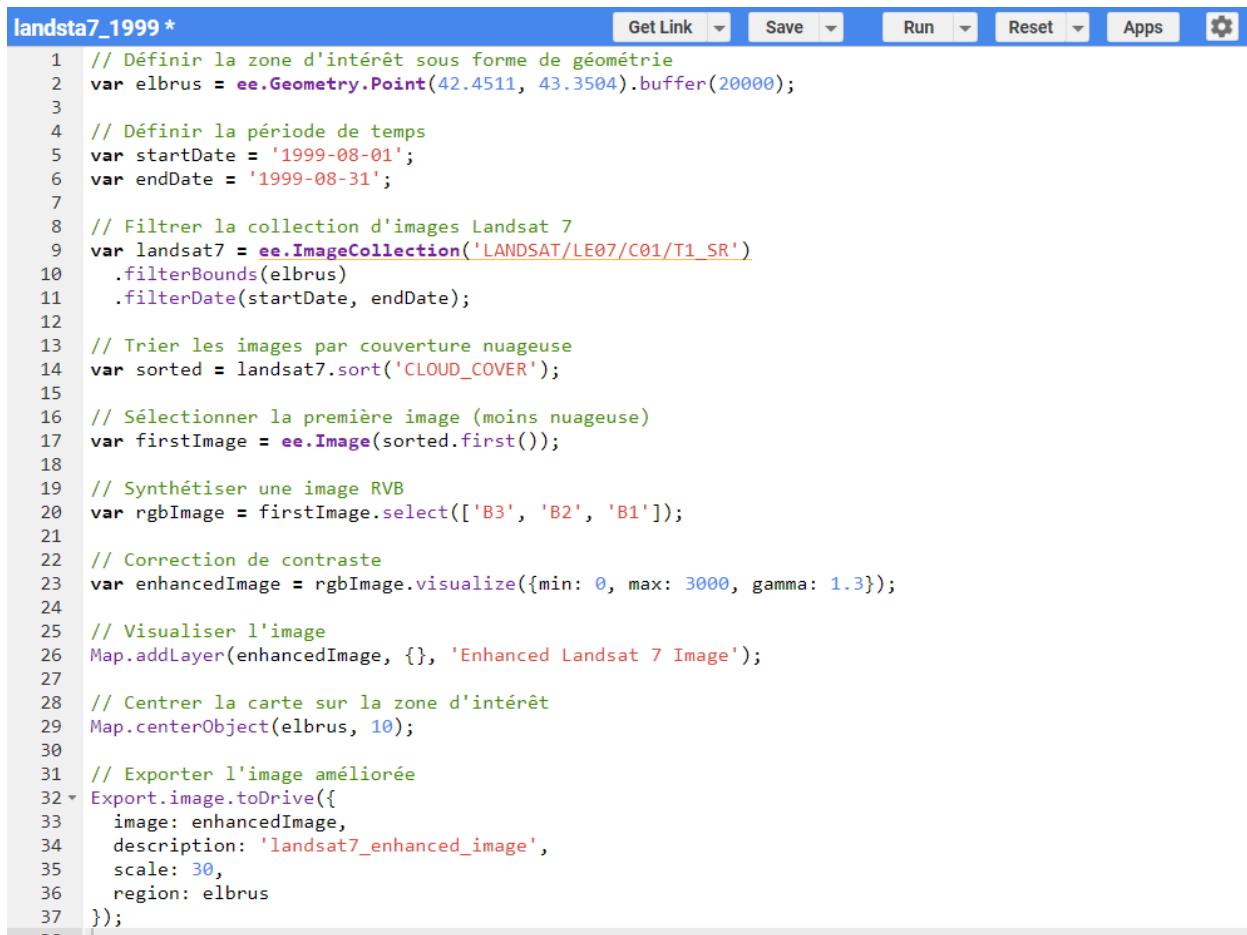
---

## Traitement des données

### Earth Engine

La sélection, le téléchargement et le traitement des images ont été réalisés à l'aide de la plateforme **Earth Engine**, qui offre un accès à une vaste collection d'images satellites et fournit également des outils pour le traitement, l'analyse et la visualisation de vastes ensembles de données.

Pour atteindre l'objectif fixé, un script a été rédigé en langage de programmation JavaScript. Le premier code (Image 6) vise à charger, traiter et améliorer l'image de Landsat 7 datant d'août 1999 (Image 7), puis à l'exporter vers Google Drive.



```
landsta7_1999 *
1 // Définir la zone d'intérêt sous forme de géométrie
2 var elbrus = ee.Geometry.Point(42.4511, 43.3504).buffer(20000);
3
4 // Définir la période de temps
5 var startDate = '1999-08-01';
6 var endDate = '1999-08-31';
7
8 // Filtrer la collection d'images Landsat 7
9 var landsat7 = ee.ImageCollection('LANDSAT/LE07/C01/T1_SR')
10   .filterBounds(elbrus)
11   .filterDate(startDate, endDate);
12
13 // Trier les images par couverture nuageuse
14 var sorted = landsat7.sort('CLOUD_COVER');
15
16 // Sélectionner la première image (moins nuageuse)
17 var firstImage = ee.Image(sorted.first());
18
19 // Synthétiser une image RVB
20 var rgbImage = firstImage.select(['B3', 'B2', 'B1']);
21
22 // Correction de contraste
23 var enhancedImage = rgbImage.visualize({min: 0, max: 3000, gamma: 1.3});
24
25 // Visualiser l'image
26 Map.addLayer(enhancedImage, {}, 'Enhanced Landsat 7 Image');
27
28 // Centrer la carte sur la zone d'intérêt
29 Map.centerObject(elbrus, 10);
30
31 // Exporter l'image améliorée
32 Export.image.toDrive({
33   image: enhancedImage,
34   description: 'landsat7_enhanced_image',
35   scale: 30,
36   region: elbrus
37 });
38
```

Image 6. Le script suivant a été élaboré pour le téléchargement et le traitement de l'image satellitaire Landsat 7 de l'année 1999 en utilisant les fonctionnalités de la plateforme Earth Engine

---

Voici une description du code :

1. **ee.Geometry.Point** : Crée une géométrie ponctuelle pour l'emplacement (42.4511, 43.3504) et crée un tampon d'un rayon de 20000 mètres autour de cette géométrie.
2. **var startDate / var endDate** : Filtre les images en fonction de la plage temporelle spécifiée.
3. **ee.ImageCollection** : Filtre la collection d'images Landsat 7 en fonction de la géométrie et de la plage temporelle.
4. **sort** : Trie les images en fonction de la couverture nuageuse afin de sélectionner l'image avec la couverture nuageuse la plus faible.
5. **ee.Image.select** : Sélectionne des bandes spécifiques (B3, B2, B1) pour créer une image RGB.
6. **visualize** : Applique une correction de contraste en utilisant les paramètres spécifiés (valeur minimale, valeur maximale, gamma).
7. **Map.addLayer** : Ajoute l'image améliorée à la carte Google Earth Engine.
8. **Map.centerObject** : Centre la carte sur l'objet spécifié avec un niveau de zoom défini à 10.
9. **Export.image.toDrive** : Exporte l'image améliorée vers Google Drive.



Image 7. Image satellite Landsat 7

Ensuite, ce script a été adapté (Image 8) et utilisé pour l'image Landsat 8 datant d'août 2021 (Image 9) afin de créer une image RGB et pour le téléchargement ultérieur.

```

landsat8 *
Get Link Save Run Reset Apps ⚙
1 // Définir la zone d'intérêt sous forme de géométrie
2 var elbrus = ee.Geometry.Point(42.4511, 43.3504).buffer(20000);
3
4 // Définir la période de temps
5 var startDate = '2021-08-01';
6 var endDate = '2021-08-31';
7
8 // Filtrer la collection d'images Landsat 8
9 var landsat8 = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR')
10 .filterBounds(elbrus)
11 .filterDate(startDate, endDate);
12
13 // Trier les images par couverture nuageuse
14 var sorted = landsat8.sort('CLOUD_COVER');
15
16 // Sélectionner la première image (moins nuageuse)
17 var firstImage = ee.Image(sorted.first());
18
19 // Synthétiser une image RVB
20 var rgbImage = firstImage.select(['B4', 'B3', 'B2']);
21
22 // Visualiser l'image RVB
23 Map.addLayer(rgbImage, {max: 3000}, 'RGB Image');
24
25 // Centrer la carte sur la zone d'intérêt
26 Map.centerObject(elbrus, 14);
27
28 // Télécharger l'image
29 Export.image.toDrive({image: rgbImage, description: 'landsat_rgb_image', scale: 30});
30

```

*Image 8. Le script suivant a été élaboré pour le téléchargement et le traitement de l'image satellitaire Landsat 8 de l'année 1999 en utilisant les fonctionnalités de la plateforme Earth Engine*



*Image 9. Image satellite Landsat 8*

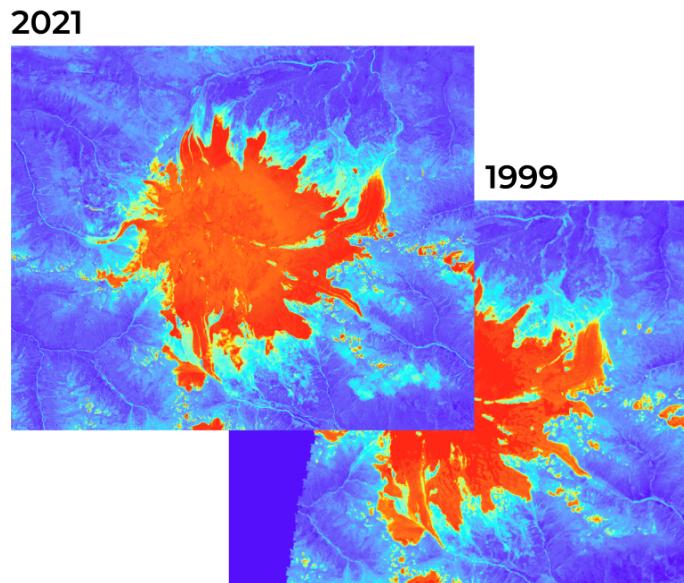
Ensuite, un bloc de code a été ajouté pour créer des images d'indice NDSI pour les images satellites Landsat 7 et Landsat 8 précédemment sélectionnées. Le code utilise la méthode **normalizedDifference**

---

(Image 10). Cette méthode est utilisée pour calculer l'indice de différence normalisée entre deux bandes d'image spécifiées. Dans ce cas, les bandes B2 (canal bleu) et B5 (canal SWIR) sont utilisées. Ainsi, la variable NDSI contiendra une image représentant l'indice de différence normalisée de neige (NDSI) basé sur les bandes sélectionnées. Les résultats pour 1999 et 2021 sont présentés sur l'Image 11.

```
22  
23 // NDSI  
24 var ndsi = firstImage.normalizedDifference(['B2', 'B5']);  
25
```

*Image 10. Le fragment de code qui pourrait être ajouté pour calculer l'indice de différence normalisée de neige (NDSI) sur la plateforme Earth Engine*



*Image 11. Les d'exécution du script pour créer l'image NDSI*

## ORFEO Toolbox

Pour effectuer un traitement alternatif des images satellites, le logiciel **ORFEO Toolbox** a été utilisé. Il s'agit d'une bibliothèque et d'un ensemble d'outils au traitement d'images dans le domaine de l'analyse géospatiale.

Les images satellites ont été acquises à l'aide de **Land Viewer** (une plateforme web pour visualiser et analyser des images satellites, offrant un accès gratuit à de nombreuses données provenant de divers satellites, y compris Landsat 7 et 8, utilisés dans ce projet, avec la possibilité de filtrer par date, couverture nuageuse, angle d'incidence solaire, etc.).

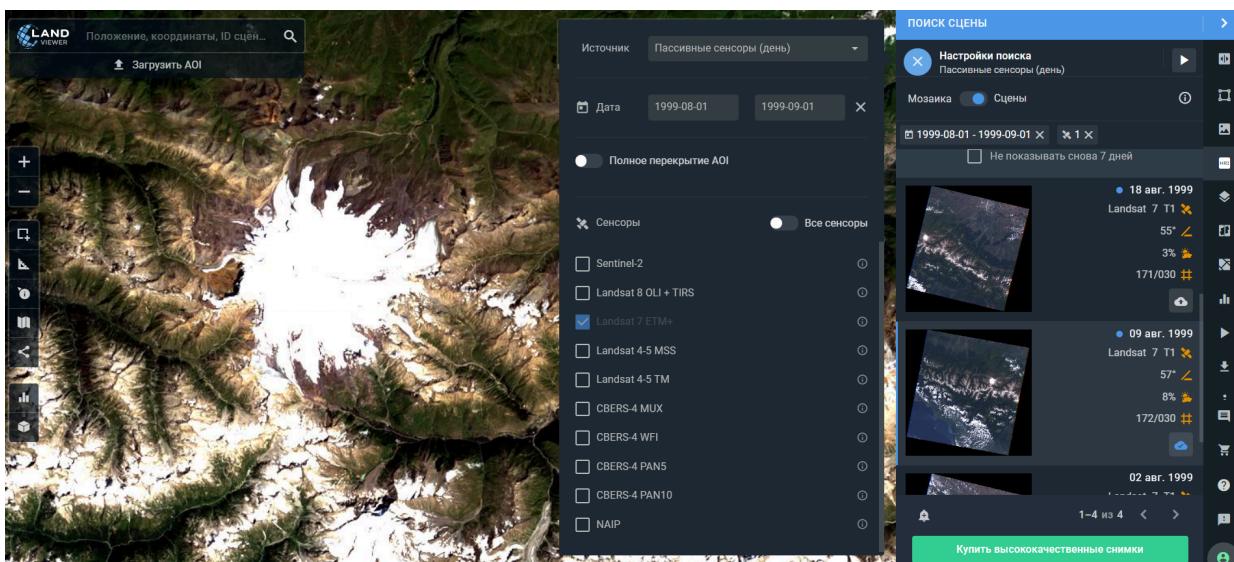


Image 12. Land Viewer

ORFEO Toolbox propose deux options pour le traitement des images : l'utilisation de la ligne de commande *cmd.exe* (Image 13) pour exécuter les outils et un accès direct à l'interface graphique utilisateur des outils *Monteverdi* (Image 14).

L'outil **otbcli\_ConcatenateImages** dans la boîte à outils Orfeo a été utilisé pour synthétiser des images RVB (Image 14) en combinant des images individuelles obtenues à partir des canaux Landsat 7 et Landsat 8. Pour le traitement des images en ligne de commande (Image 13), la commande suivante a été utilisée :

```
otbcli_ConcatenateImages -il B3.tif B2.tif B1.tif -out output_rgb.tif
```

- **otbcli\_ConcatenateImages** : Outil pour concaténer plusieurs images en une seule destiné.
- **-il B3.tif B2.tif B1.tif** : **-il** indique les images d'entrée **B3.tif**, **B2.tif** et **B1.tif**.
- **-out output\_rgb.tif** : **-out** indique le nom du fichier pour enregistrer le résultat.



Image 14. RGB image

Ensuite, pour créer une image d'indice NDSI à l'aide de la ligne de commande, l'outil **otbcli\_BandMathX** a été utilisé :

```
otbcli_BandMathX -il B2.tif B5.tif -out output_NDSI.tif -exp "((im1[0] - im2[0]) / (im1[0] + im2[0]))"
```

- **B2.tif et B5.tif** — Il s'agit d'images avec les canaux 2 et 5. Ces fichiers sont destinés à être utilisés comme données d'entrée pour le calcul du NDSI.
- **output\_NDSI.tif** — C'est le nom du fichier dans lequel le résultat du calcul du NDSI sera enregistré (Image 12).
- **"((im1[0] - im2[0]) / (im1[0] + im2[0]))"** — Cette formule calcule le NDSI en se basant sur les valeurs des pixels des canaux 2 et 5. Elle suppose le traitement d'images multicanaux, où im1[0] et im2[0] représentent les valeurs des pixels pour le premier canal de chaque image. Dans le cas d'images monocanal (par exemple, B2.tif correspondant au canal 2 du système satellitaire Landsat 7 et B5.tif au canal 5), veuillez utiliser [0] pour faire référence au seul canal.

**Remarque :** Lors de l'utilisation d'une image multicanaux, la formule serait la suivante :  $((im1[1] - im1[4]) / (im1[1] + im1[4]))$ . L'indexation commence à 0, donc dans ce cas,  $im1[1]$  correspond au canal 2.

```
C:\Users\geographie\Downloads\OTB-8.1.2-Win64\OTB-8.1.2-Win64>otbcli_BandMathX -il B2.tif B5.tif -out output_NDSI.tif -exp "((im1[0] - im2[0]) / (im1[0] + im2[0]))"
2024-01-24 09:23:24 (FATAL) BandMathX: Cannot open image B2.tif. The file does not exist.

C:\Users\geographie\Downloads\OTB-8.1.2-Win64\OTB-8.1.2-Win64>otbcli_BandMathX -il B2.tif B5.tif -out output_NDSI.tif -exp "((im1[0] - im2[0]) / (im1[0] + im2[0]))"
2024-01-24 09:24:34 (INFO): Loading metadata from official product
2024-01-24 09:24:34 (INFO): BandMathX: Default RAM limit for OTB is 256 MB
2024-01-24 09:24:34 (INFO): BandMathX: GDAL maximum cache size is 800 MB
2024-01-24 09:24:34 (INFO): BandMathX: OTB will use at most 12 threads
2024-01-24 09:24:34 (INFO): BandMathX: Image #1 has 1 components
2024-01-24 09:24:34 (INFO): BandMathX: Image #2 has 1 components
2024-01-24 09:24:34 (INFO): BandMathX: Using expression: ((im1[0] - im2[0]) / (im1[0] + im2[0]))
2024-01-24 09:24:34 (INFO): Estimated memory for full processing: 17.4958MB (avail.: 256 MB), optimal image partitioning: 1 blocks
2024-01-24 09:24:34 (INFO): File output_NDSI.tif will be written in 1 blocks of 1081x1063 pixels
Writing output_NDSI.tif...: 100% [*****] (0s)
```

Image 13. otbcli\_BandMathX vers cmd.exe

Pour calculer le NDSI sans utiliser la ligne de commande, il faut ouvrir Monteverdi et Mapla. Dans la liste des outils il y a un outil **BandMathX** (Image 14). Ensuite, il faut ajoutez les images, saisissez la formule  $((im1[0] - im2[0]) / (im1[0] + im2[0]))$  dans la section « Expression », et appuyez sur « Exécuter » pour exécuter la commande.

**Remarque :** BandMath est conçu pour effectuer des opérations mathématiques sur des images avec des tailles et des géométries identiques, tandis que BandMathX offre une approche plus flexible pour effectuer des calculs en prenant en charge des tailles et des géométries d'images différentes.

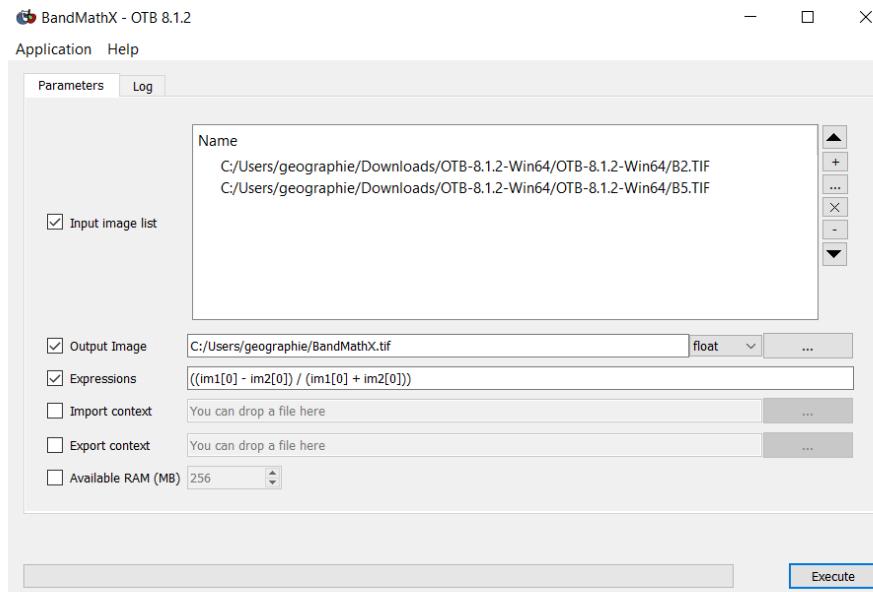


Image 14. OTB BandMathX



Image 15. Le résultat du traitement avec OTB

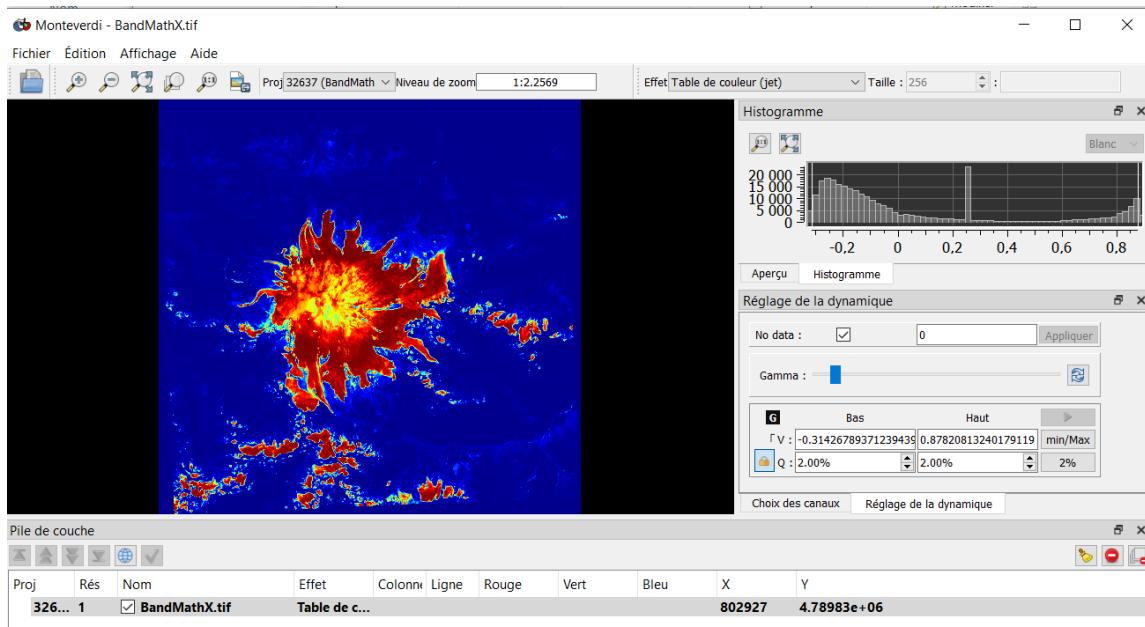


Image 16. Le résultat du traitement avec OTB en couleur

Pour résumer, dans cette section, le traitement des images a été examiné en utilisant la boîte à outils OTB Toolbox, notamment la création d'une image en couleurs naturelles RGB et d'une image d'indice

---

NDSI. Des procédures similaires ont été mises en œuvre pour les images du satellite Landsat 8 datant d'août 2021.

**Remarque :** Pour créer une image RGB et une image d'indice NDSI, il est également possible d'utiliser ArcGIS Pro avec l'outil Calculatrice de raster.

## L'indice NDSI

L'indice NDSI (Normalized Difference Snow Index) a été spécialement développé pour mettre en évidence les couvertures de neige et les glaciers. Le NDSI est calculé selon la formule suivante :

$$\text{NDSI} = (\text{Green} + \text{SWIR}) / (\text{Green} - \text{SWIR})$$

Green - le canal vert, SWIR - le canal infrarouge à ondes courtes.

Pour Landsat 8 : Green - B3, SWIR - B6. Pour Landsat 7 : Green - B2, SWIR - B5.

**Le choix des canaux** pour l'analyse des images satellites est déterminé par les caractéristiques des bandes et les propriétés spectrales de la neige. Les couvertures neigeuses dans la plage des canaux B6 (SWIR, 1,57-1,65, Landsat 8) et B5 (SWIR, 1,55-1,75, Landsat 7) ont un coefficient de réflectance inférieur à 10%. Dans la plage des canaux B2 (bleu, 0,52-0,60, Landsat 7) et B3 (vert, 0,53-0,59, Landsat 8), le coefficient de réflectance est d'environ 80%. Cette différence dans la réflexion spectrale permet de mieux distinguer les structures des glaciers sur les images.

Le NDSI (Normalized Difference Snow Index) pour les images satellites précédemment sélectionnées varie dans une plage **de -0,8 à 1**. Pour la classification ultérieure des images d'indice, deux classes ont été créées : la surface du glacier (0,4 ; 1) et le reste de la surface (-0,8 ; 0,4). Les valeurs du NDSI proches de 1 indiquent la présence de neige ou de glace. Cela est dû au fait que la neige et la glace ont une réflectance élevée dans la plage du spectre visible (380 - 750 nm) et basse dans la plage infrarouge (760 nm - 1 mm) (Image 17).

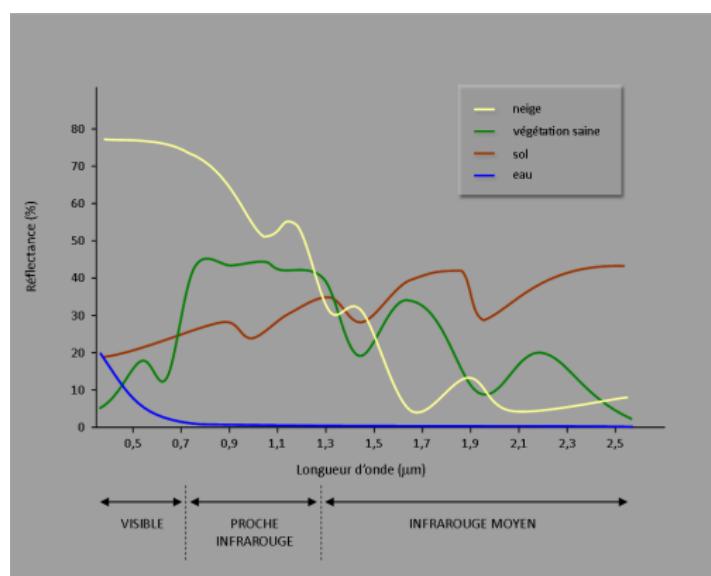


Image 17. Signatures spectrales  
(source : Paris 1 Panthéon-Sorbonne)

La classification des images, notamment le choix des valeurs de seuil (Image 18) et la numérisation des limites (Image 19), a été réalisée avec le logiciel ArcGIS Pro car une estimation visuelle de l'objet de recherche était nécessaire. L'établissement des limites a été effectué manuellement, en utilisant la méthode « Tracer ».



Image 18. Le résultat de la classification

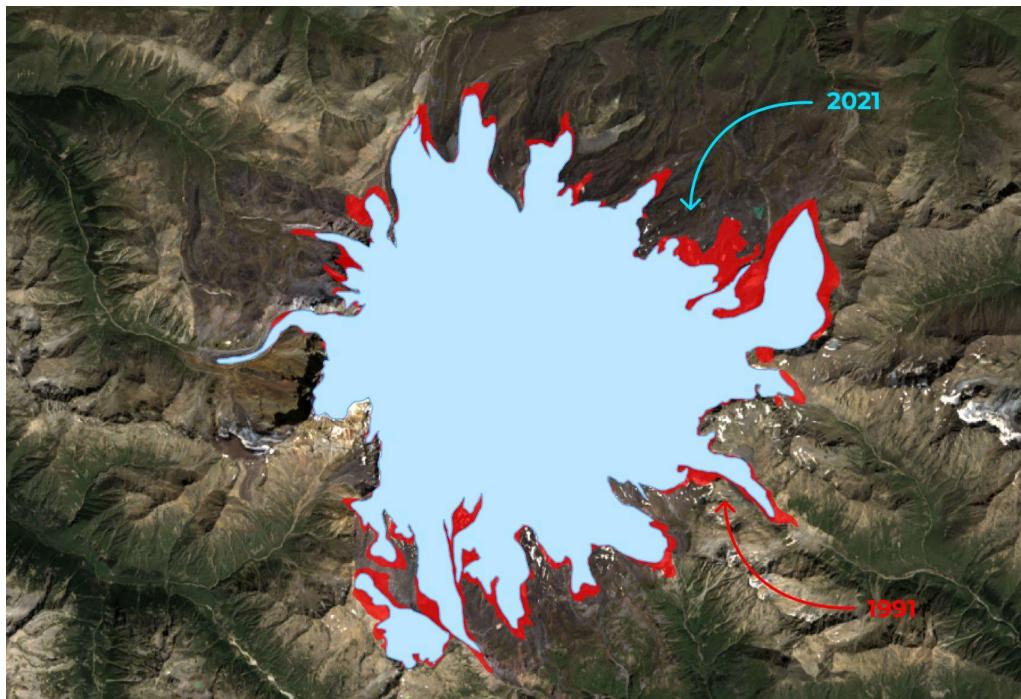


Image 19. Le résultat de la télédétection

## Résultat de la télédétection

Le résultat de la télédétection est **une carte de l'Elbrouz** (Image 20 ou page 21) indiquant les frontières des glaciers pour les années 1999 et 2021, ainsi que leurs noms et leur répartition dans les bassins versants.

**Il est important de noter qu'il est impossible de calculer précisément la superficie des glaciers à partir des résultats de la télédétection.** Nous pouvons seulement obtenir la superficie des polygones, ce qui ne constitue pas une estimation fiable de la superficie totale des glaciers. Ainsi, nous pouvons seulement évaluer visuellement la dégradation du système glaciaire de l'Elbrouz.

La valeur de la superficie du polygone, obtenue à partir de la table attributive dans ArcGIS Pro, est exprimée en mètres carrés. Pour la convertir en kilomètres carrés (en tenant compte de l'utilisation du système de coordonnées WGS 84), il faut la diviser par 1 000 000 (car 1 kilomètre carré = 1 000 000 mètres carrés). Ainsi, la superficie du polygone pour l'année 2021 est d'environ 192,7 kilomètres carrés, et pour l'année 1999 - 219,6 kilomètres carrés. La différence entre ces valeurs, soit 26,8 kilomètres carrés, indique des changements significatifs dans la superficie du glacier, mais ne fournit pas d'informations précises sur la véritable superficie de l'Elbrouz.

Malgré les limitations dans le calcul de la superficie exacte, la télédétection des glaciers fournit des données précieuses pour la recherche scientifique et permet d'évaluer visuellement la dynamique des changements dans les calottes glaciaires, les risques de disparition, la distribution des ressources hydriques, etc.

LES GLACIERS DE L'ELBROUZ

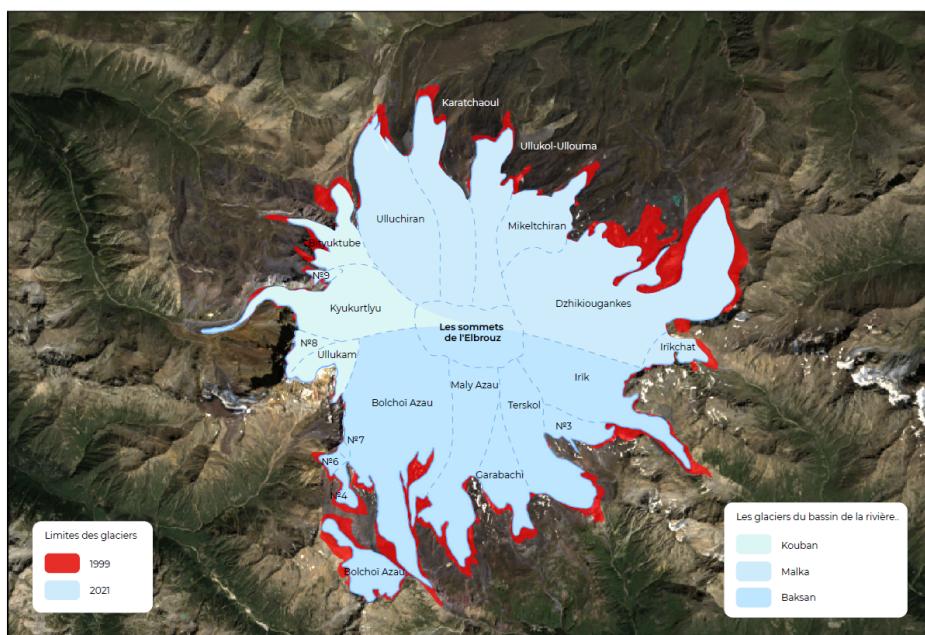


Image 20. La carte de l'Elbrouz

---

## **Conclusion**

Le travail accompli a permis de mener avec succès une étude approfondie de la couverture glaciaire de l'Elbrouz. Au cours de la recherche, le choix du système satellitaire et la sélection d'images spatiales appropriées ont été effectués en fonction de l'objectif et du sujet de l'étude. De plus, les indices existants pour le déchiffrement réussi de la couverture glaciaire ont été examinés.

L'étape principale du travail a été la rédaction d'un script efficace en langage de programmation JavaScript, destiné au téléchargement et au traitement ultérieur des images nécessaires sur la plateforme Earth Engine. Ensuite, les limites des glaciers pour les années 1999 et 2021 ont été déchiffrées en utilisant le logiciel ArcGIS Pro. Par ailleurs, une approche alternative a également été employée avec le traitement des données à l'aide de la boîte à outils Orfeo OTB.

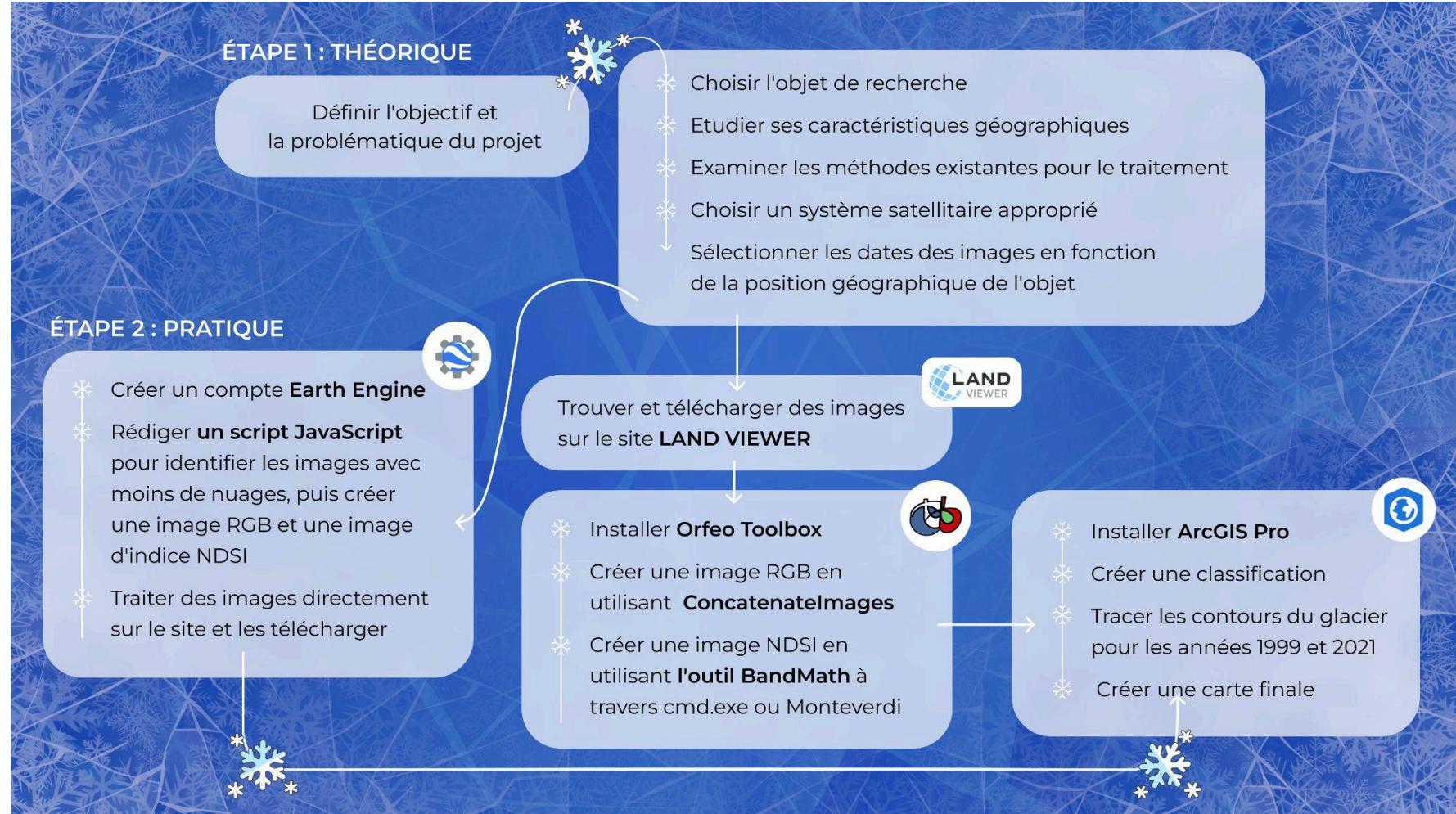
La phase finale de la recherche a consisté en l'analyse des résultats obtenus et la création d'une carte basée sur les données de la télédétection. La carte comprend les limites des glaciers pour les années spécifiées, les noms de tous les glaciers de l'Elbrouz, ainsi que leur répartition dans les bassins fluviaux. Dans l'ensemble, l'accomplissement des tâches fixées permet une compréhension plus approfondie de la dynamique de changement de la couverture glaciaire et contribue à la recherche sur les changements climatiques dans la région.

---

## Sources d'information

1. **La recherche, la sélection et le traitement d'images satellitaires :**  
<https://earthengine.google.com/>
2. **Atlas des Ressources en Neige et Glace du Monde, Institut de géographie de l'Académie des sciences de Russie, Moscou, 1997 :**  
<https://sites.google.com/view/atlasslr/главная/региональная-часть/кавказ>
3. **NDSI :** <https://www.usgs.gov/landsat-missions/normalized-difference-snow-index>
4. **OTB :** [https://www.orfeo-toolbox.org/CookBook/Applications/app\\_BandMath.html](https://www.orfeo-toolbox.org/CookBook/Applications/app_BandMath.html)

La schéma expliquant les étapes effectuées



La carte de l'Elbrouz, le résultat de la télédétection.

## LES GLACIERS DE L'ELBROUZ

