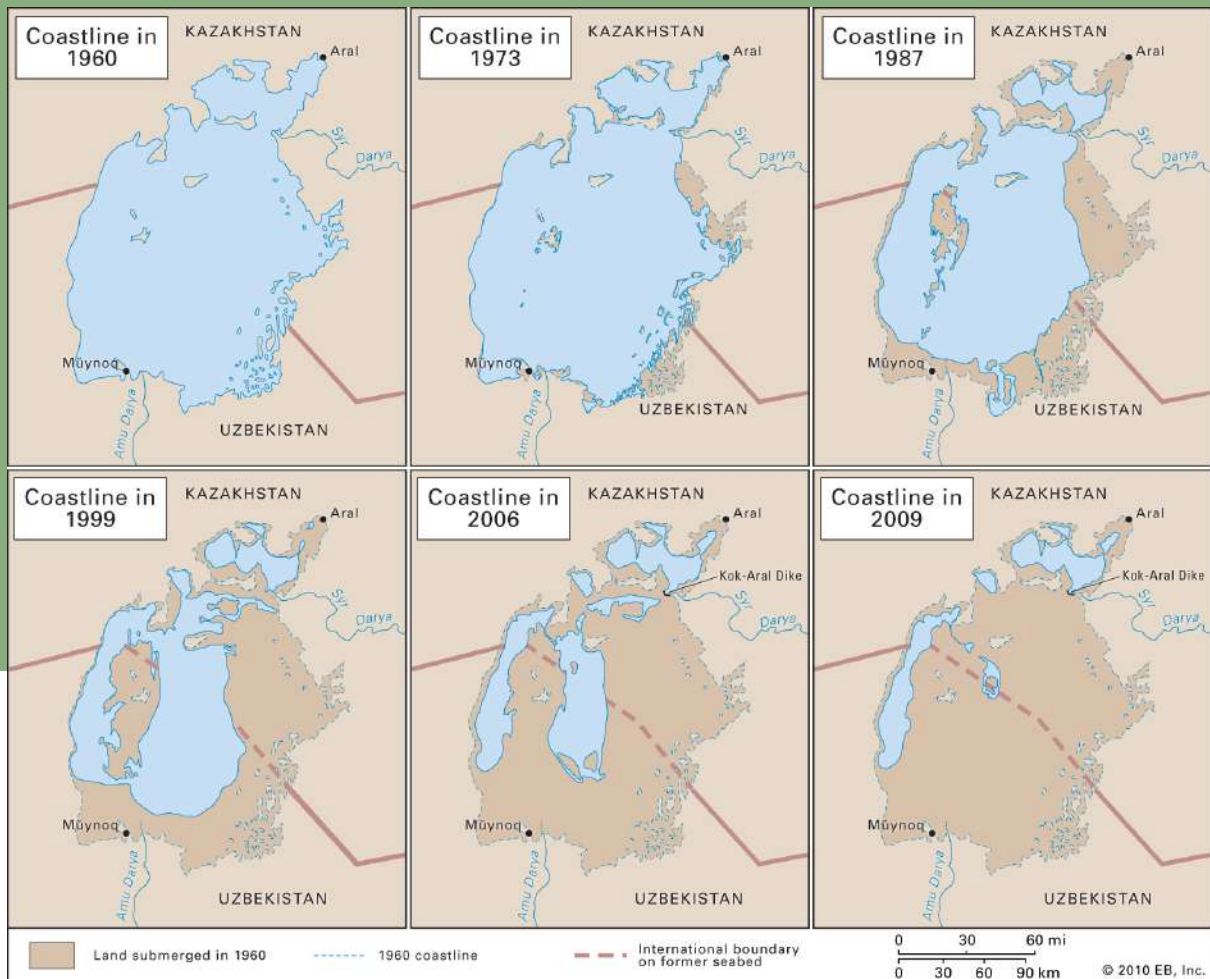


Les évolutions de la mer d'Aral entre 1986 et 2022



Source : <https://whitehorsepress.blog/2017/03/30/the-aral-sea-environmental-tragedy-in-a-planned-economy/>

Les images de télédétection au service des territoires - dossier

Sommaire :

I) Présentation du sujet et de la zone d'étude.....	3
II) Méthodologie utilisée :	3
1- Paramétrage du téléchargement des images sur le site earthexplorer.....	4
2- Pré traitements géométriques des images via Qgis et SCP.....	4
3- Génération de compositions colorées.....	5
4- Génération de classes et visualisations de leur signature spectrale.....	5
5- Génération des classifications.....	5
6- Validation des classifications et autres post-traitements.....	6
7- Détection de changements.....	8
III) Compositions colorées vraies et fausses couleurs :	9
1- Compositions en Vraies Couleurs.....	10
2- Compositions en Fausses Couleurs.....	11
3- Nos Interprétations.....	15
IV) Les signatures spectrales :	15
V) Classifications supervisées.....	18
1- Mise en place de la Classification.....	18
VI) Validation de la classification et analyses statistiques.....	20
VII) Détection des changements.....	22
Conclusion.....	26
Sources :	27

I) Présentation du sujet et de la zone d'étude

Nous nous intéressons ici à l'évolution de la mer d'Aral. Elle se situe en Asie centrale, plus particulièrement entre le Nord-Ouest de l'Ouzbékistan et le Sud du Kazakhstan. Il s'agit en réalité d'un creux topographique occupé par un lac salé, alimenté principalement par deux fleuves : l'Amou-Daria et le Syr-Daria. Ces fleuves prennent respectivement leur source au Tadjikistan et Kirghizstan et forment un bassin versant endoréique d'environ 1,8 million km². L'exutoire de l'Amou-Daria se trouve au Sud de la mer d'Aral et celui du Syr-Daria au Nord-Est, dans l'actuelle "Petite Aral". Le climat autour de la mer d'Aral est noté BWk sur la classification de Köppen, soit un climat désertique caractérisé par de très faibles précipitations et une amplitude thermique annuelle forte (de -6°C l'hiver à 28°C l'été).

Au début des années 1960, cette étendue d'eau constitue le 4e lac le plus vaste, en termes de superficie. Or, comme on peut le voir sur les images en couverture, cette superficie a été drastiquement réduite, notamment du fait de politiques agricoles mises en place par l'URSS à partir des années 1960. L'intérêt de traiter ce sujet grâce aux outils de la télédétection va être de quantifier cette réduction et de mesurer les principaux changements d'occupation du sol dans la zone, particulièrement dans les zones où l'eau s'est retirée. Nous analyserons ces changements ainsi que leurs conséquences sur les sociétés et la biodiversité locale, au regard de l'histoire de la région, considérée aujourd'hui comme une des catastrophes écologiques les plus importantes du XXème siècle.

II) Méthodologie utilisée :

Nous travaillons ici avec le logiciel Qgis, et plus particulièrement l'extension gratuite SCP (semi-automatic classification plugin), qui permet de réaliser un ensemble de pré-traitements, traitements et post-traitements à partir d'imagerie satellite.

Nous mobilisons ici deux images issues de la constellation Landsat et fournies par l'institut d'études géologiques des États-Unis (USGS) via le site [EarthExplorer \(usgs.gov\)](https://earthexplorer.usgs.gov). La première image a été obtenue par le satellite Landsat 5. Celui-ci évolue à une altitude moyenne de 705 km et sa résolution spatiale est de 30 m. Les domaines spectraux captés concernent le visible ainsi que l'infrarouge proche, moyen et thermique. Celle-ci a été acquise en 1986. La seconde image a été acquise en 2022, par Landsat 8. Celui-ci présente une résolution spectrale et temporelle plus fine, mais la résolution spatiale reste de 30m, permettant des comparaisons avec la première image. Souhaitant comparer la situation actuelle en mer d'Aral et la situation avant son assèchement partiel, il était important d'avoir un grand intervalle de temps entre les

deux acquisitions. La première image correspond ainsi à une des premières années pour lesquelles des images Landsat d'une résolution spatiale de 30 m dans notre zone d'étude. Pour ce qui est de 2022, c'est l'une des plus récentes.

1- Paramétrage du téléchargement des images sur le site earthexplorer

Pour obtenir des images exploitables, il est indispensable de définir les paramètres suivants :

- Filtrage : uniquement des images à la couverture nuageuse inférieure à 10%
- Zone de recherche du résultat : depuis le canevas de la vue proposée sur le site, grossièrement centrée autour de la mer d'Aral
- Choix des satellites : Landsat collection - level 2, afin d'obtenir des images déjà pré traitées

La fauchée des images Landsat disponibles en téléchargement ne couvrant pas toute la zone d'étude, nous sommes contraints de télécharger deux images pour chacune des années. Pour chacune des années, les images choisies sont très proches temporellement, puisqu'elles sont issues du même cycle de balayage de la surface terrestre par le satellite. Toutefois, les images récupérées pour 1986 n'ont pas forcément été prises au même moment dans l'année que les images de 2022. Bien que cela puisse engendrer un biais, le phénomène étudié (i.e les grandes tendances de changements d'occupation du sol) s'inscrit plutôt dans le temps long, contrairement à des processus plus saisonniers, tels que les cycles de végétation en conditions de cultures non pérennes.

2- Pré traitements géométriques des images via Qgis et SCP

Comme expliqué ci-dessus, les images téléchargées via le site earthexplorer sont déjà pré traitées, en tout cas du point de vue des corrections atmosphériques par exemple. Toutefois, il est nécessaire, dans notre cas, de retravailler la géométrie de nos images en plusieurs étapes :

- Importer les différentes bandes spectrales de chaque image via le plugin SCP
- Générer un seul fichier .tif combinant l'ensemble des bandes (stack multi spectral) pour chaque moitié d'image et pour chaque année

- Fusionner les moitiés d'image via l'outil "mosaïque de jeu de bandes" pour chaque année
- Créer une couche vecteur polygone depuis Qgis, dont l'emprise correspond approximativement à la zone couverte par l'image de 1986 et celle de 2022 (celles-ci ne couvrant pas exactement la même zone)
- Utiliser l'outil "découper un raster selon une couche de masque", avec en entrées la couche vecteur précédemment créée ainsi que l'image 1986, puis celle de 2022

Nos prétraitements nous permettent d'obtenir une image par année, chacune d'elles ayant exactement la même emprise.

3- Génération de compositions colorées

Depuis les propriétés des couches, paramétrage des compositions colorées via la symbologie (type de rendu : couleurs à bandes multiples), en attribuant aux couleurs rouge, vertes et bleue différentes combinaisons de bandes spectrales (cf : III. Composition colorées vraies et fausses couleurs).

4- Génération de classes et visualisations de leur signature spectrale

La production de signatures spectrales se fait en plusieurs étapes grâce au plugin SCP présenté plus tôt :

- Création de quatre classes en définissant, pour chaque classe, quatre ROI (region of interest) via "entrée données d'entraînement".
- Afficher les signatures spectrales des classes pour chacune des images

Nous générons des ROI bien dispersés sur la zone d'étude, de façon à augmenter la fiabilité des classes. Pour chacune des deux images, il est important de garder les quatre mêmes classes. Après des recherches et une observation des images (notamment grâce aux différentes compositions colorées), nous décidons de représenter quatre types d'occupation du sol : les surfaces en eaux, les sols sableux, les sols salins et les zones de végétation steppique.

5- Génération des classifications

- Pour chacune des images, nous utilisons les données d'entraînement précédemment générées pour réaliser une classification de la zone. Pour cela, nous nous servons de l'outil "classification" de SCP, en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance.

Cette méthode se base sur la règle de Bayes, qui attribue à chaque pixel une probabilité d'appartenir à chacune des classes. La classe obtenant la plus forte probabilité pour un pixel se voit ainsi attribuer ledit pixel.

6- Validation des classifications et autres post-traitements

Pour s'assurer que nos classes correspondent à la réalité, il est indispensable de les vérifier, c'est-à-dire de comparer l'occupation du sol donnée par une classification à d'autres données.

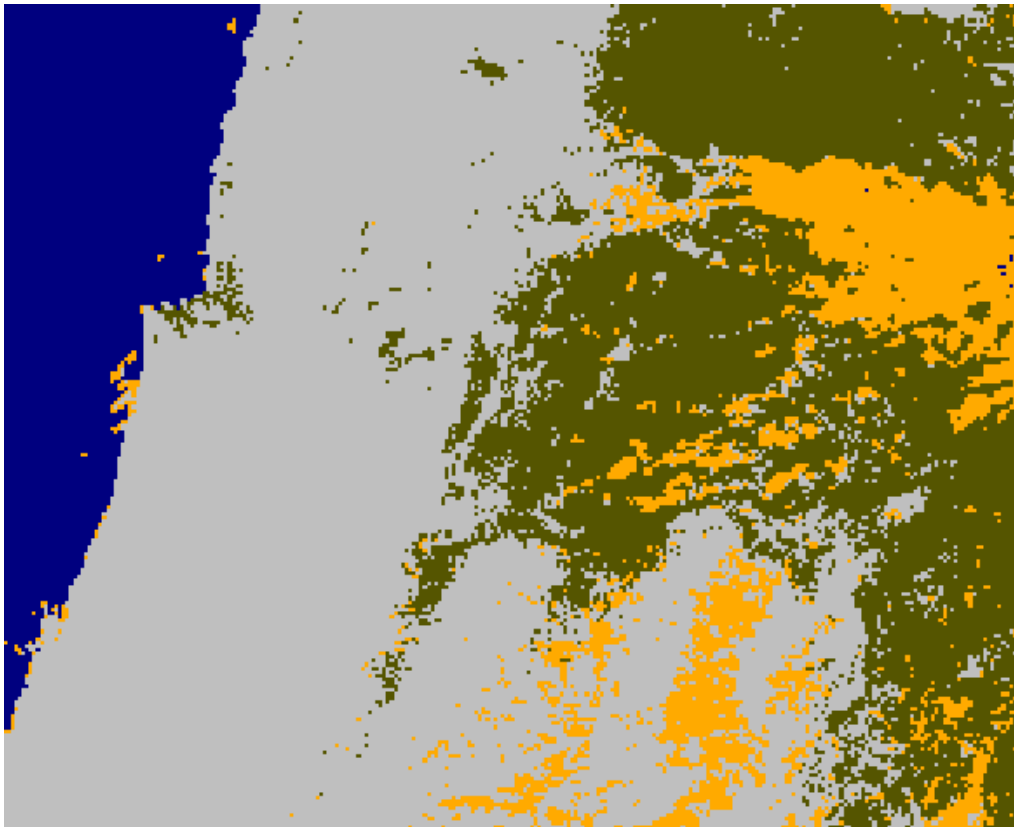
- Génération de $4*4*2$ soit 32 nouvelles ROI, à des endroits différents des précédentes données d'entraînement
- Utilisation de l'outil "précision" pour obtenir des informations sur la pertinence de la classification (de 1986, puis 2022)

Ici, la validation fonctionne en comparant la classe d'un pixel selon les données d'entraînement et la classe qu'il se verrait attribuer avec les données de validation. Nous obtenons différents indicateurs, notamment la précision globale et l'indice de kappa. La précision globale et l'indice de kappa sont d'autant plus élevés que les classes des pixels d'après ces deux jeux de données coïncident. Il est également possible de connaître précisément les classes où il y a eu des divergences d'attribution entre les données d'entraînement et celles de validation, ainsi que de quantifier ces écarts. Il est toutefois important de garder à l'esprit que cette validation se base sur des données provenant de la même source que les données d'entraînement (i.e les images satellites analysées). Or, dans un contexte de recherche, les données de validation proviennent généralement d'une autre source, notamment depuis le terrain (observations directes de l'occupation du sol) quand cela est possible. En effet, les données terrain sont généralement très fiables, mais ne pouvant couvrir l'ensemble de la zone d'étude (bien trop grande), seuls des échantillons sont analysés et utilisés pour valider les données obtenues à partir d'imagerie satellite, moins précises mais pouvant couvrir une très large zone.

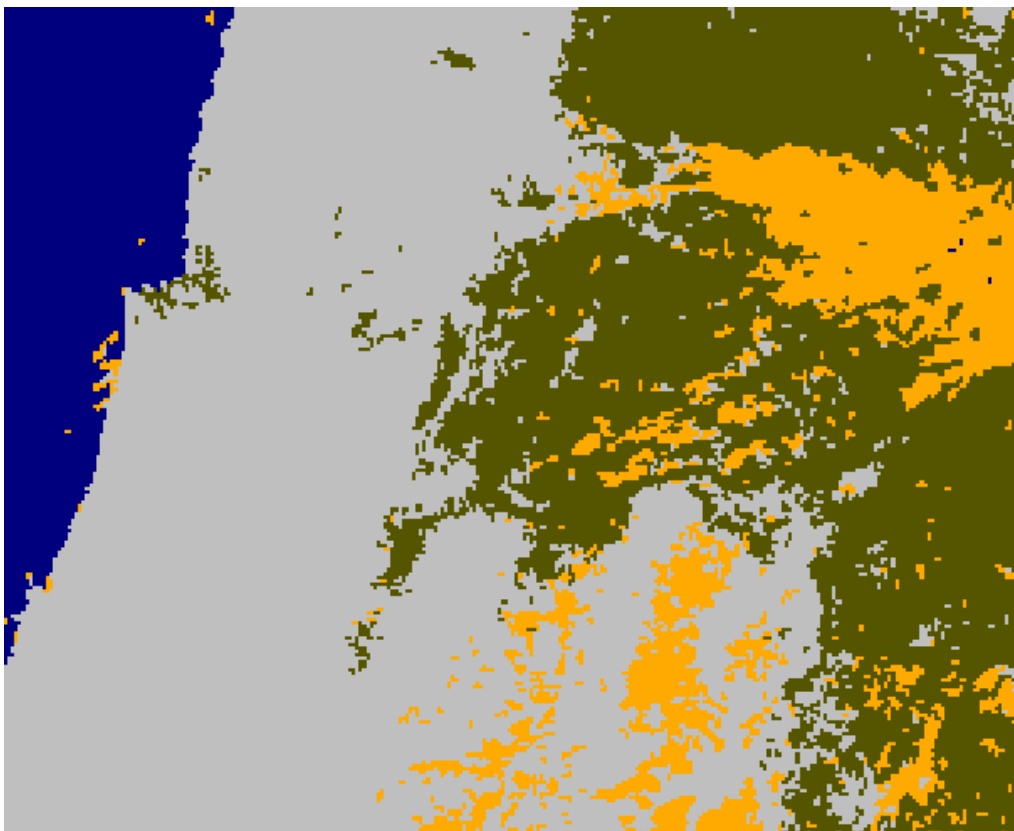
Dans l'optique de "lisser" les valeurs de nos résultats, nous réalisons une autre correction :

- Utilisation de l'outil "cribler la classification", pour nous permettre d'attribuer aux pixels isolés la valeur majoritaire des pixels voisins (nombre de pixels voisins pris en compte ici : 4)

Nous obtenons une classification un peu plus lissée, et donc plus facile à lire.



Extrait de notre classification de 1986 avant criblage



Extrait de la classification de 1986 après criblage

Avec l'utilisation de l'outil "rapport de classification", nous cherchons à obtenir plus d'informations sur la surface occupée par chaque classe dans la zone d'étude (calculée à partir des classifications criblées), pour davantage connaître nos résultats.

7- Détection de changements

Dans l'optique de montrer des changements d'occupation du sol entre les deux périodes, nous allons comparer nos deux résultats de classification.

- Utilisation de l'outil "changement d'occupation des sols", pour chacune des classification pour mettre en lumière les différents changements à partir des classes

Nous obtenons un nouveau fichier raster dans lequel les pixels peuvent avoir 16 valeurs différentes, correspondant chacune à une trajectoire de changement d'un pixel. Nous trouvons donc, par exemple, pour les pixels représentant les surfaces en eaux en 1986, quatre trajectoires possibles :

- les pixels toujours classés en surfaces en eaux en 2022
- les pixels désormais classés sols sableux en 2022
- les pixels désormais classés sols salins en 2022
- les pixels désormais classés steppes en 2022

En plus du fichier raster, nous obtenons un tableau qui quantifie les changements d'occupation du sol détectés.

- Mise en place d'une variation des couleurs attribuées aux classes obtenues dans la symbologie de la couche, de façon à mettre en avant certains changements

III) Compositions colorées vraies et fausses couleurs :

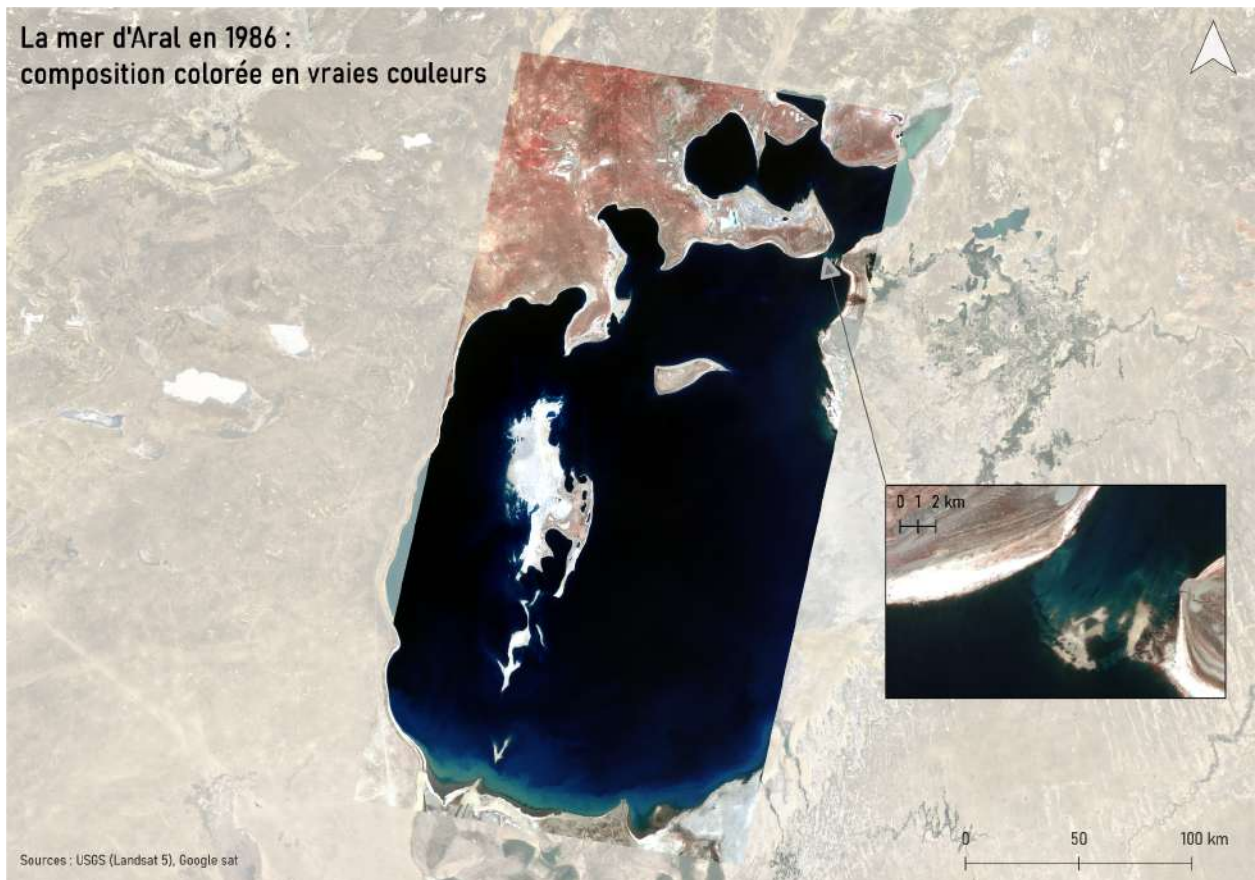
Avant de réaliser des classifications supervisées pour détecter et quantifier les changements d'occupation du sol en mer d'Aral sur la période étudiée, il peut être pertinent d'analyser visuellement les images satellite récupérées selon différentes compositions colorées. En effet, cette étape peut nous permettre :

- d'avoir une idée globale de la qualité des images téléchargées,
- de détecter visuellement un certain nombre de changements,
- d'appuyer le choix du nombre de classes utilisées pour la classification, ainsi que les types d'occupation du sol retenus.

Une composition colorée correspond à l'association d'une bande spectrale, qui mesure des valeurs de réflectance, à l'une des trois couleurs primaires de la synthèse additive, soit le rouge, le vert et le bleu. Les valeurs de réflectance sont alors exprimées en valeurs d'affichage (bits), dont le nombre maximum de niveaux d'intensité disponibles dépend de la résolution radiométrique des satellites. Étant donné la résolution spectrale des satellites Landsat, il est possible de distinguer différentes bandes spectrales (visibles, infrarouge etc.). On parle de compositions colorées en vraies couleurs lorsque les bandes du rouge, du vert et du bleu sont associées aux couleurs rouge, vert et bleu. Dans les autres cas, on parle de fausses couleurs.

1- Compositions en Vraies Couleurs

La mer d'Aral en 1986 :
composition colorée en vraies couleurs



La mer d'Aral en 2022 :
composition colorée en vraies couleurs



Notre première analyse des compositions en vraies couleurs nous permet tout d'abord, d'observer que les deux images sont de très bonne qualité du point de vue du couvert nuageux. L'absence de nuages n'est pas étonnante, d'une part, car un filtrage sur le couvert nuageux avait été paramétré au moment de la recherche d'images sur earthexplorer, et d'autre part, car la zone d'étude se caractérise par de très faibles précipitations durant l'intégralité de l'année. En effet, la zone connaît environ 100 mm de pluie par an et ne subit pas l'influence d'éventuelles moussons, du fait de l'existence d'une chaîne montagneuse à l'Est de la plaine sur laquelle elle se trouve.

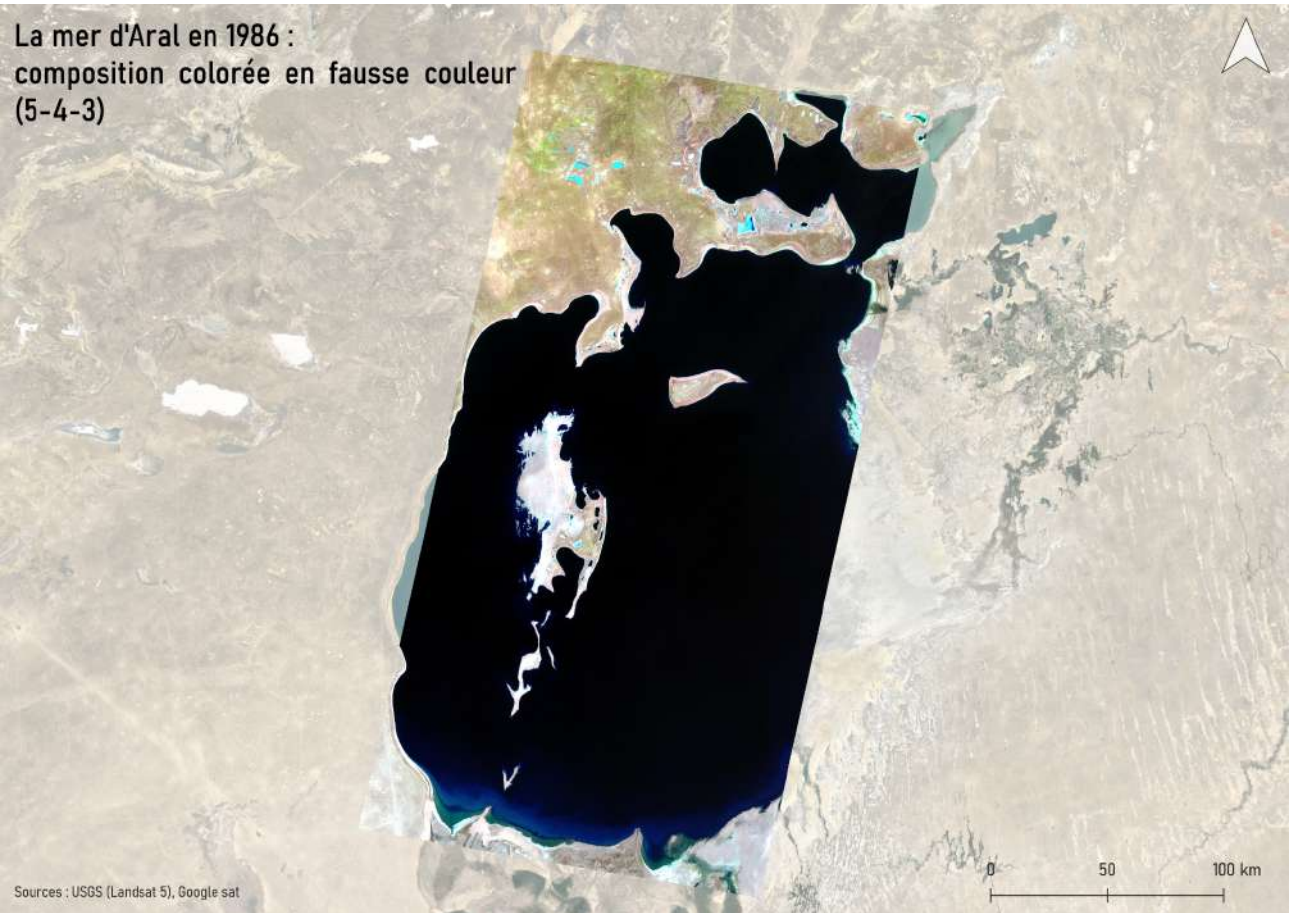
On constate ensuite des différences de couleurs, notamment au Nord-Ouest de la zone, entre 1986 et 2022. Il semble que ces différences ne soient pas liées à des changements d'occupation du sol, mais plutôt des différences directement liées aux satellites, possiblement en termes de résolution radiométrique. En effet, on s'aperçoit en zoomant sur cette zone que la texture est significativement la même entre 1986 et 2022, et semble correspondre à des zones de végétation steppique.

On s'aperçoit bien entendu de l'assèchement d'une très grande partie de la mer d'Aral, notamment de la "Grande Aral" au Sud, aujourd'hui réduite à une bande d'eau à l'Ouest de la zone. Si l'on s'intéresse plus particulièrement à la jonction entre la "petite" et la "grande" Aral, on s'aperçoit notamment de 2 choses. D'une part, les deux mers sont encore d'un seul tenant en 1986 et d'autre part, un barrage y est présent en 2022. Il s'agit en fait du barrage de Kokaral, financé par la Banque mondiale et le gouvernement kazakh et construit entre 2003 et 2005. Celui-ci a pour but de maintenir un certain niveau d'eau dans la "Grande Aral". L'objectif semble plutôt réussi, car la forme de la "Grande Aral" n'a pas trop changé depuis 1986. De plus, la couleur de l'eau en 2022 y est légèrement plus sombre qu'ailleurs, témoignant d'une profondeur plus importante.

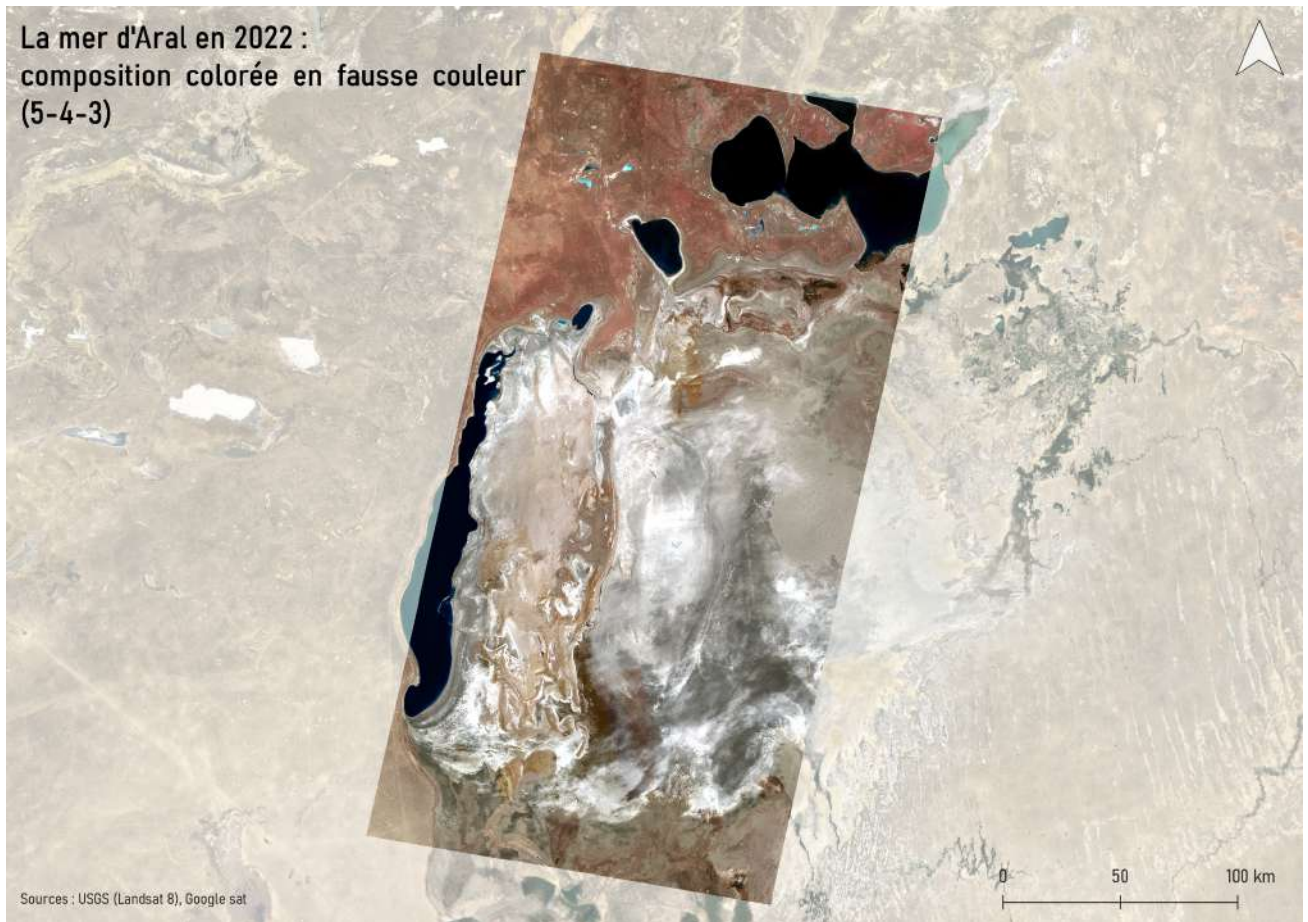
Si les surfaces en eau sont aisément distinguables du reste de la zone et constituent donc une classe bien définie, il est plus difficile d'identifier les autres types d'occupation du sol. Nous mobilisons donc d'autres compositions colorées pour nous aider.

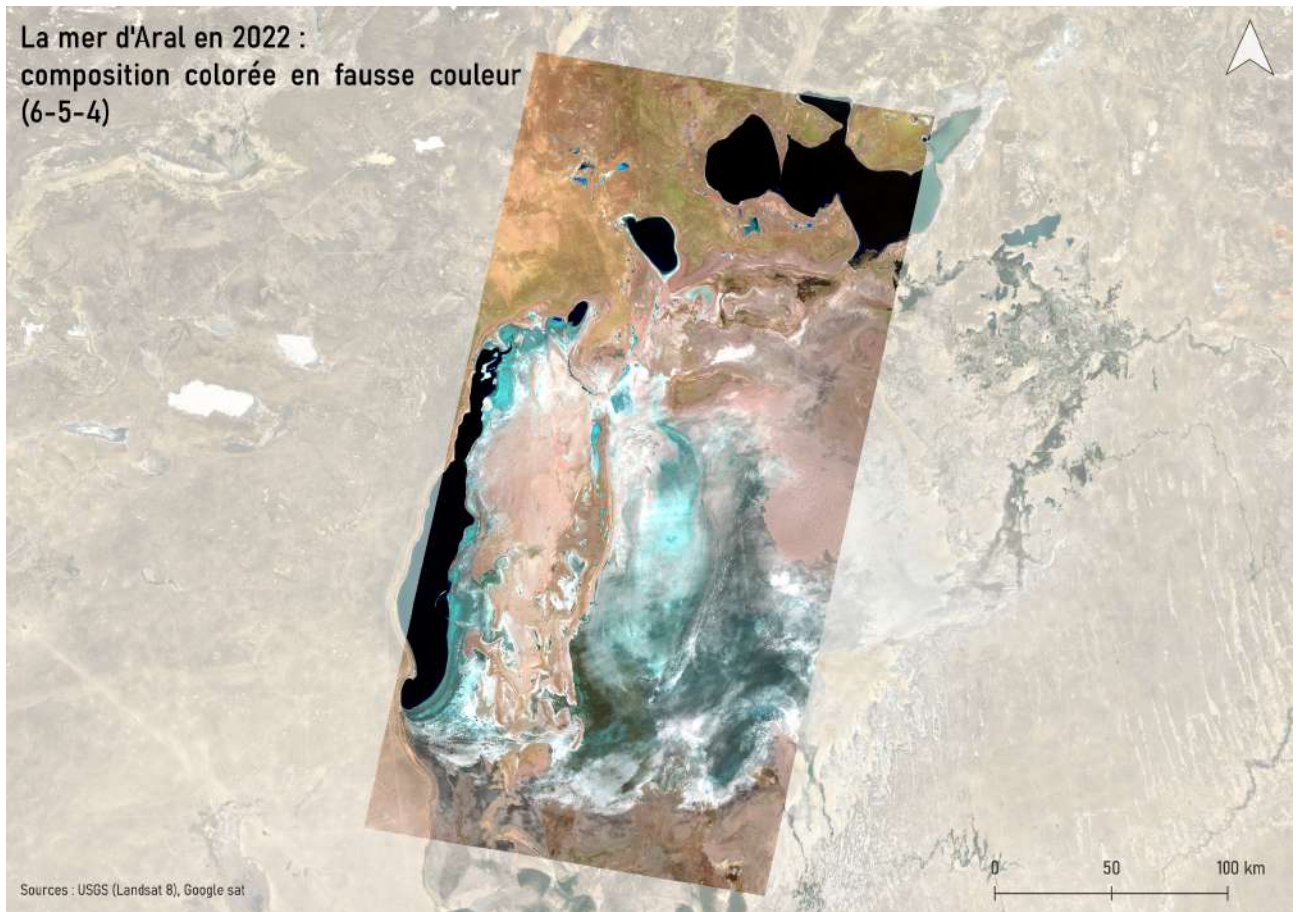
2- Compositions en Fausses Couleurs

En créant deux compositions en fausses couleurs, nous obtenons deux résultats distincts qui nous permettent de visualiser différemment l'espace. Ici, nous présentons d'abord les images obtenues pour 1986 suivies par celle de 2022.



La mer d'Aral en 2022 :
composition colorée en fausse couleur
(5-4-3)





En passant aux compositions en fausses couleurs, nous tentons dans un premier d'analyser les images avec une composition colorée 5-4-3, soit en associant la bande du proche infrarouge au rouge, celle du rouge au vert et celle du vert au bleu.

On s'aperçoit alors que les surfaces en eau sont représentées avec moins de nuances. Il est donc plus difficile de lire les différences de profondeur. De plus, nous observons, pour l'image de 1986, des tâches vert clair, notamment au Nord de la zone. Il s'agit probablement de végétation, puisque le vert est ici associé au rouge. Or, la végétation possède généralement des indices de réflectance plus élevés dans le rouge (et plus encore dans l'infrarouge proche et moyen). Néanmoins, cela reste une teinture assez pâle, qui n'a rien de comparable avec un vert vif que l'on pourrait observer dans un contexte de cultures intensives. Cela confirme l'hypothèse d'une végétation plus éparse et à l'activité chlorophyllienne plus faible, comme la végétation herbacée qui caractérise les steppes de la région. Pour les images de 1986 et 2022, on observe des petites tâches cyan aux endroits où il y avait, dans le visible, des tâches blanches. Cela veut donc dire que ces zones ont de fortes réflectances dans les bandes rouge, vert et bleu mais moins dans l'infrarouge (puisque'il est ici associé à la couleur rouge, couleur absente dans le mélange donnant du cyan). Cela laisse supposer que ces sols sont particulièrement salins, puisque le sel a généralement un aspect blanc, mais sans aucune végétation.

Cette hypothèse semble se confirmer avec la composition colorée 6-5-4, soit deux bandes relevant de l'infrarouge associées aux couleurs rouge et vert et la bande du rouge associée au bleu. En effet, les tâches qui apparaissaient cyan tendent maintenant vers le bleu vif, ce qui veut dire une forte réflectance de la bande du rouge, mais beaucoup moins dans les bandes de l'infrarouge, synonyme d'absence de végétation. Pour confirmer cette interprétation, nous utilisons l'outil Qgis "identifier les entités", afin d'obtenir les valeurs des différentes bandes pour un pixel :



Avec le composition 6-5-4 de 1986, nous obtenons bien des valeurs élevées dans le visible et plus faible dans l'infrarouge pour les zones bleu vif, confortant l'hypothèse selon laquelle il s'agit de sols particulièrement salins.

3- Nos Interprétations

Pour résumer, nous tentons de discriminer quatre classes grâce à ces analyses :

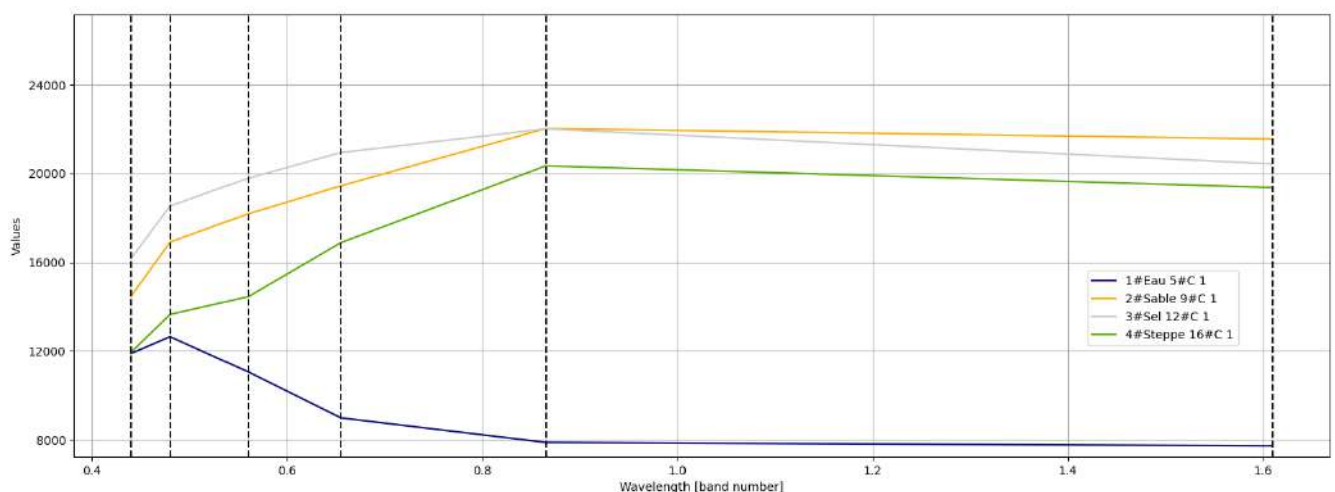
- **Les surfaces en eau** : essentielles à notre étude et facilement discernables par leurs faibles réflectances, particulièrement dans le rouge et au-delà
- **Les sols salins** : possédant une texture lisse et des signatures spectrales qui tendent vers le bleu dans les compositions en fausses couleurs explorées
- **Les sols sableux** : ayant également une texture lisse, mais sans tendance vers le bleu dans les compositions en fausse couleur (voire ayant un aspect rose/orangé, comme dans l'image 6-5-4 de 2022)
- **Les steppes** : ayant quelques teintes vertes dans certaines compositions colorées et une texture beaucoup plus granuleuse que les sols sableux et salins.

IV) Les signatures spectrales :

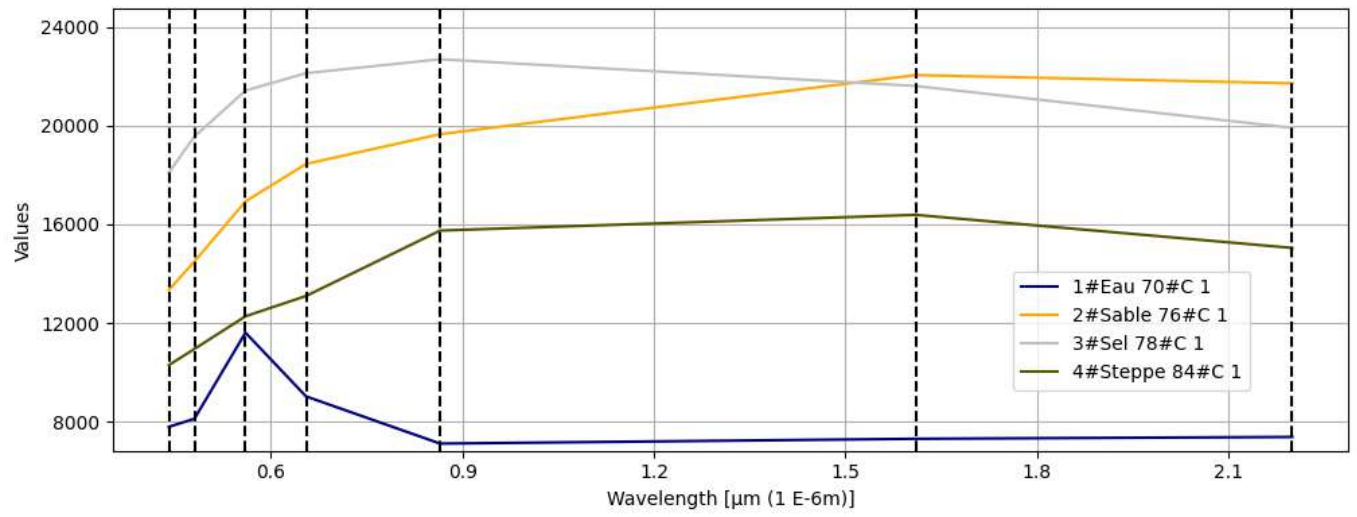
Une fois nos données d'entraînement générées en traçant nos ROI, il est possible de visualiser les signatures spectrales de celles-ci. Voici quelques observations :

- Pour les deux images, les signatures suivent des trajectoires similaires pour chaque classe. Cela témoigne d'une discrétisation en classes plutôt homogène entre l'image de 1986 et celle de 2022
- Les surfaces en eaux ont bien des valeurs de réflectance les plus faibles pour toutes les bandes (avec toutefois un petit pic dans le bleu et le vert, mais toujours moins élevé que n'importe quelle autre classe)
- Les sols salins ont bien des réflectances élevées dans le visible (supérieur aux trois autres classes), ce qui signifie que les rayons électromagnétiques perçus sont peu voire pas absorbés ou transmis. Celles-ci diminuent légèrement dans l'infrarouge. Elles sont alors dépassées par celles du sable.
- Les signatures du sable et du sel sont relativement proches, ce qui peut compliquer la classification
- Les steppes ont une signature spectrale qui correspond plutôt bien à de la végétation, soit des réflectances au plus bas dans le bleu et le vert, puis une légère augmentation dans le rouge et finalement, des réflectances plus fortes dans l'infrarouge.

Signatures spectrales des données d'entraînement de 1986:



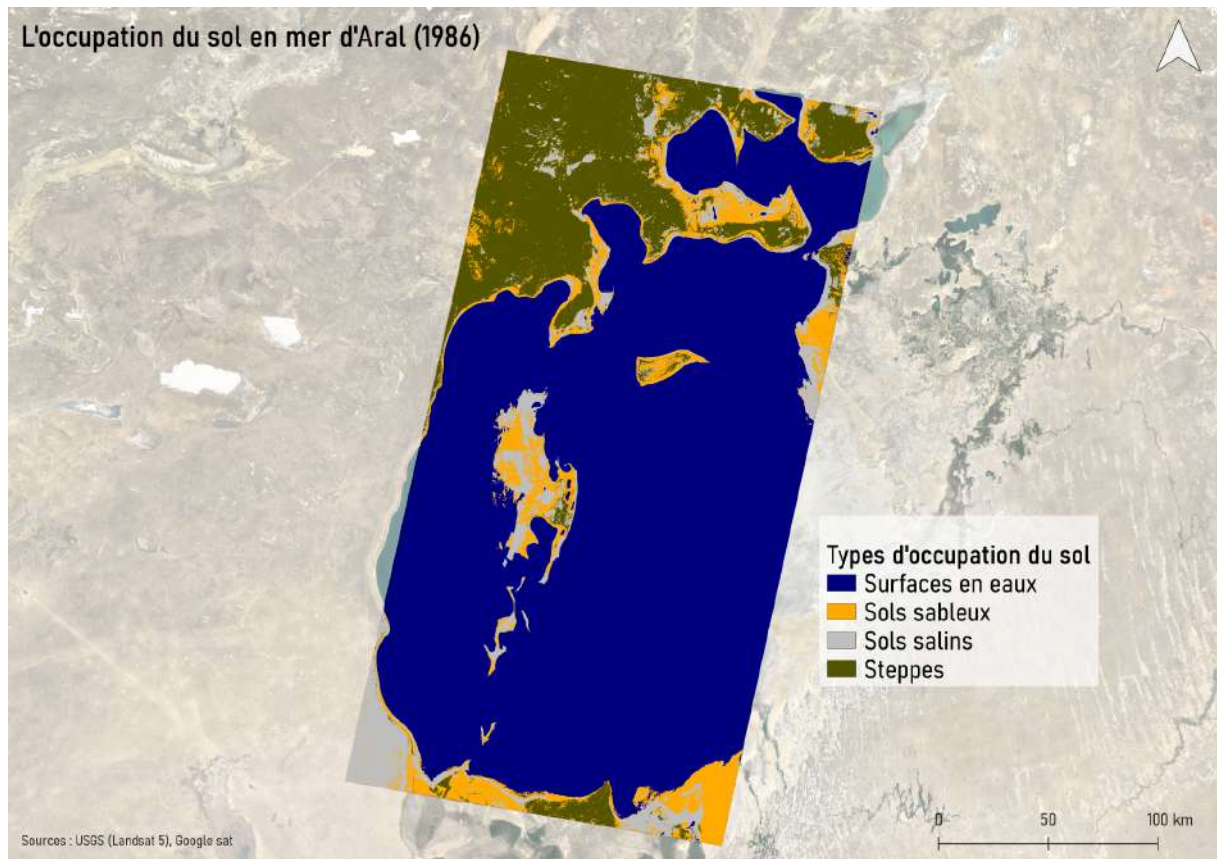
Signatures spectrales des données d'entraînement de 2022 :



V) Classifications supervisées

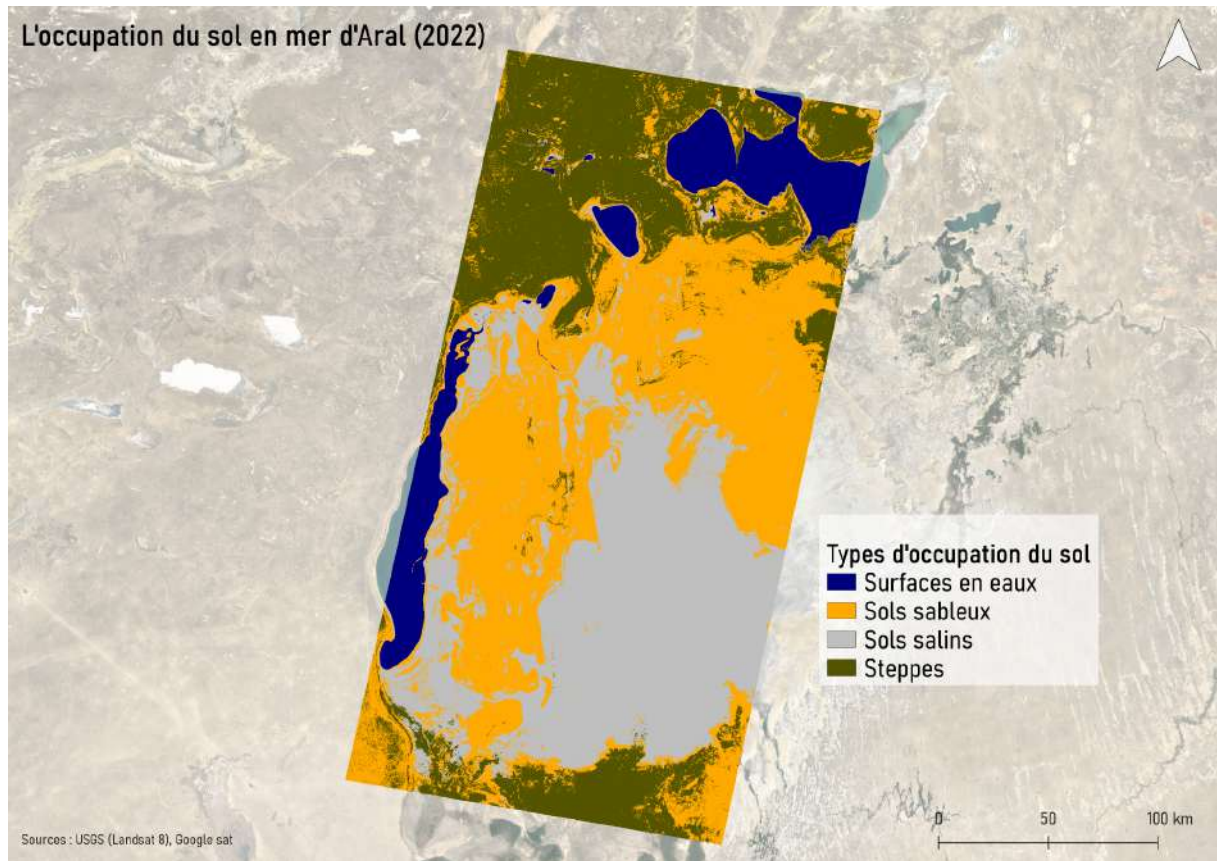
1- Mise en place de la Classification

À partir des données d'entraînement, il est possible de réaliser les classifications avec la méthode du maximum de vraisemblance. Voici, pour chaque année, le résultat de la classification (après criblage) :



L'occupation de la zone d'étude des différentes classes en 1986

Class	PixelSum	Percentage %	Area [metre ²]	surface km ²
1 (Eau)	45294898	68.82	40765408200	40765,41
2 (Sable)	5050833	7.67	4545749700	4545,75
3 (Sel)	4877516	7.41	4389764400	4389,76
4 (Steppe)	10589615	16.09	9530653500	9530,65



L'occupation de la zone d'étude des différentes classes en 2022 :

Class	PixelSum	Percentage %	Area [metre ²]	Surface km ²
1 (Eau)	5515613	8.38	4964051700	4964,05
2 (Sable)	25361363	38.54	22825226700	22825,23
3 (Sel)	19329950	29.37	17396955000	17396,96
4 (Steppe)	15605942	23.71	14045347800	14045,35

Cette classification nous permet ainsi de quantifier les changements observés jusqu'alors "à l'œil nu". Toutefois, il est préférable de vérifier la qualité de cette classification avant de l'interpréter.

Avant cette validation, nous pouvons déjà nous rendre compte d'un certain nombre d'erreurs, non pas liées à la qualité de la classification, mais à la définition même des ROI. Particulièrement, la zone tout au Sud-Ouest de l'espace étudié est classée en 1986 comme du sol salin, alors qu'elle est classée plutôt comme sol sableux en 2022. Il s'agit d'une erreur pour deux raisons. D'une part, parce qu'on peut distinguer sur les images satellites de l'époque, des routes et une zone habitée. Or, les sols salins ne sont

généralement pas habités, du fait de leur toxicité (notamment lors de tempêtes de sel générées par l'arrivée de vents secs).

D'autre part, après vérification manuelle des valeurs de réflectance des différentes bandes pour les pixels de cette zone (outil "identifier des entités"), il s'avère que cette dernière relève plutôt d'un sol sableux.

VI) Validation de la classification et analyses statistiques

Matrice de confusion (1986) :

classif/valid ation	1	2	3	4	Area (m ²)
1	0.6881	0.0000	0.0000	0.0000	4076014230 0.0000
2	0.0015	0.0757	0.0003	0.0000	4584737700. 0000
3	0.0022	0.0030	0.0689	0.0000	4381935300. 0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.1605	9504760500 .0000
Total	0.6918	0.0786	0.0691	0.1605	5923157580 0.0000

Précision globale [%]99.3136

Kappa hat classification = 0.9859

Matrice de confusion (2022) :

classif/verif	1	2	3	4	Area
1	0.0838	0.0000	0.0000	0.0000	4961660400. 0000
2	0.0000	0.3855	0.0000	0.0000	2283551730 0.0000
3	0.0000	0.0000	0.2935	0.0000	1738486890 0.0000
4	0.0000	0.0528	0.0000	0.1844	1404953460 0.0000
Total	0.0838	0.4383	0.2935	0.1844	59231581200

					.0000
--	--	--	--	--	-------

Précision globale [%]94.7161

Kappa hat classification = 0.9239

Concernant la validation des classifications, on s'aperçoit tout d'abord que les indices de kappa et de précision globale sont très bons. La précision globale se calcule en divisant la somme des pixels bien classés par la somme totale des pixels. Ainsi, pour la classification de 1986, plus de 99% de pixels ont été bien classés. L'indice de kappa permet également d'avoir une idée de la qualité de la classification. Il est recommandé de valider une classification uniquement si son indice de kappa dépasse 0,80. C'est le cas pour nos classifications.

Les classifications ne sont toutefois pas parfaites, notamment à cause de certaines limites.

Tout d'abord, la difficulté de distinguer le sable des steppes. En effet, dans certains milieux de la zone d'étude, il n'existe pas de séparation nette entre sable et steppe, mais plutôt un gradient (la végétation herbacée de la steppe se trouvant de plus en plus éparse). On retrouve bien cette limite en analysant la matrice de confusion de la classification de 2022 : un certain nombre de pixels classés comme "steppe" avec les données d'entraînement ont été classés en "sable" avec les données de validation.

Ensuite, on peut citer une distinction parfois difficile entre sel et sable. En effet, les deux surfaces ont une texture plutôt lisse et des signatures spectrales proches. Dans une moindre mesure, la présence de vase altère parfois les niveaux de réflectances de ces sols, augmentant le risque de confusion.

On observe ainsi des confusions de sable vers sel et inversement dans la matrice de confusion de la classification de 1986.

VII) Détection des changements

Grâce à l'outil "changement d'occupation des sols" du plugin SCP, nous avons pu générer un certain nombre de cartes mettant en avant les changements dans la zone. Nous nous sommes basés, d'autre part, sur les tableaux montrant l'évolution des surfaces par classe entre 1986 et 2022, également issus de l'outil "changement d'occupation des sols".

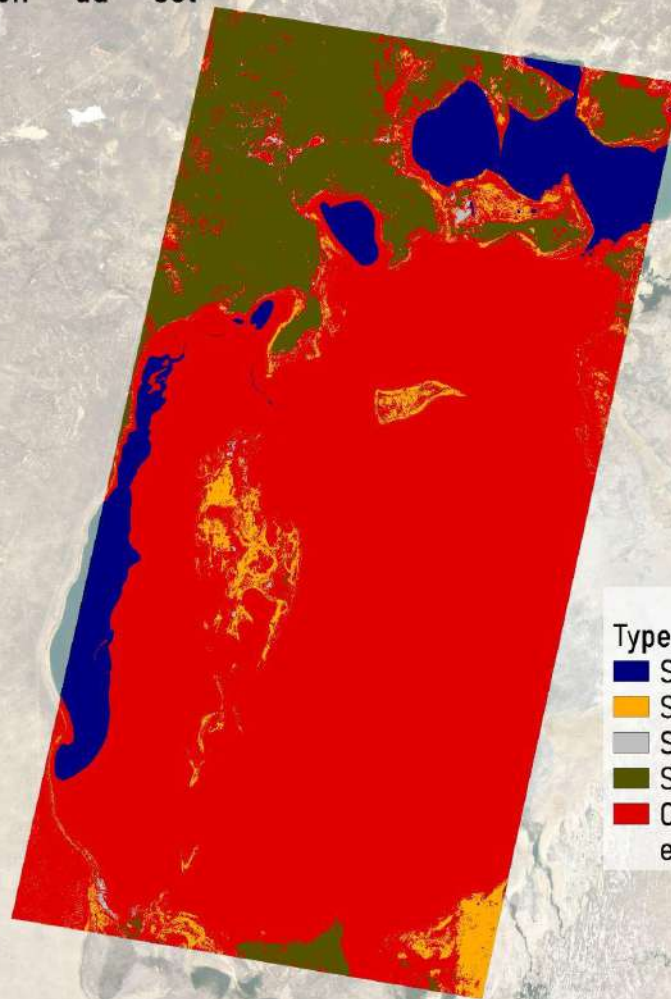
Type de sol	Surface km ² (1986)	Surface km ² (2022)	Solde
Eau	40765,4	4964,1	-35801,4
Sable	4545,7	22825,2	18279,5
Sel	4389,8	17397	13007,2
Steppe	9530,7	14045,3	4514,7

Type de sol	%age zone d'étude (1986)	%age zone d'étude (2022)	Solde
Eau	68,82	8,38	-60,44
Sable	7,67	38,54	30,86
Sel	7,41	29,37	21,96
Steppe	16,09	23,71	7,62

Tableaux quantifiant les changements d'occupation du sol

La première carte nous montre l'extension spatiale des zones ayant connu un changement, peu importe sa nature. La zone d'étude a ainsi énormément changé entre 1986 et 2022, puisque environ 42 620 km² de surface ont connu un changement, soit près de 72 % de la zone étudiée.

Changements d'occupation du sol en mer d'Aral (1986 - 2022)

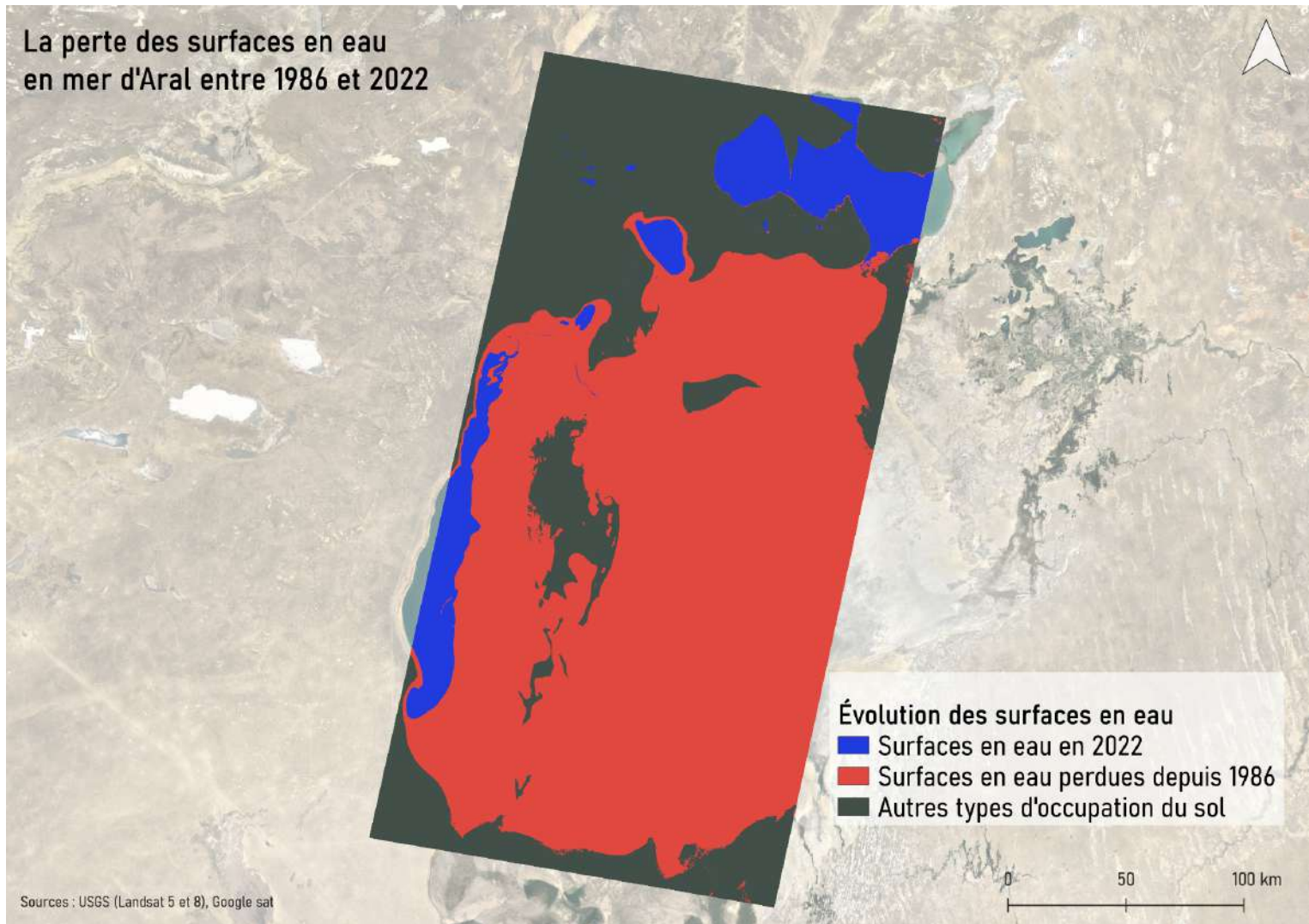


Types d'occupation du sol

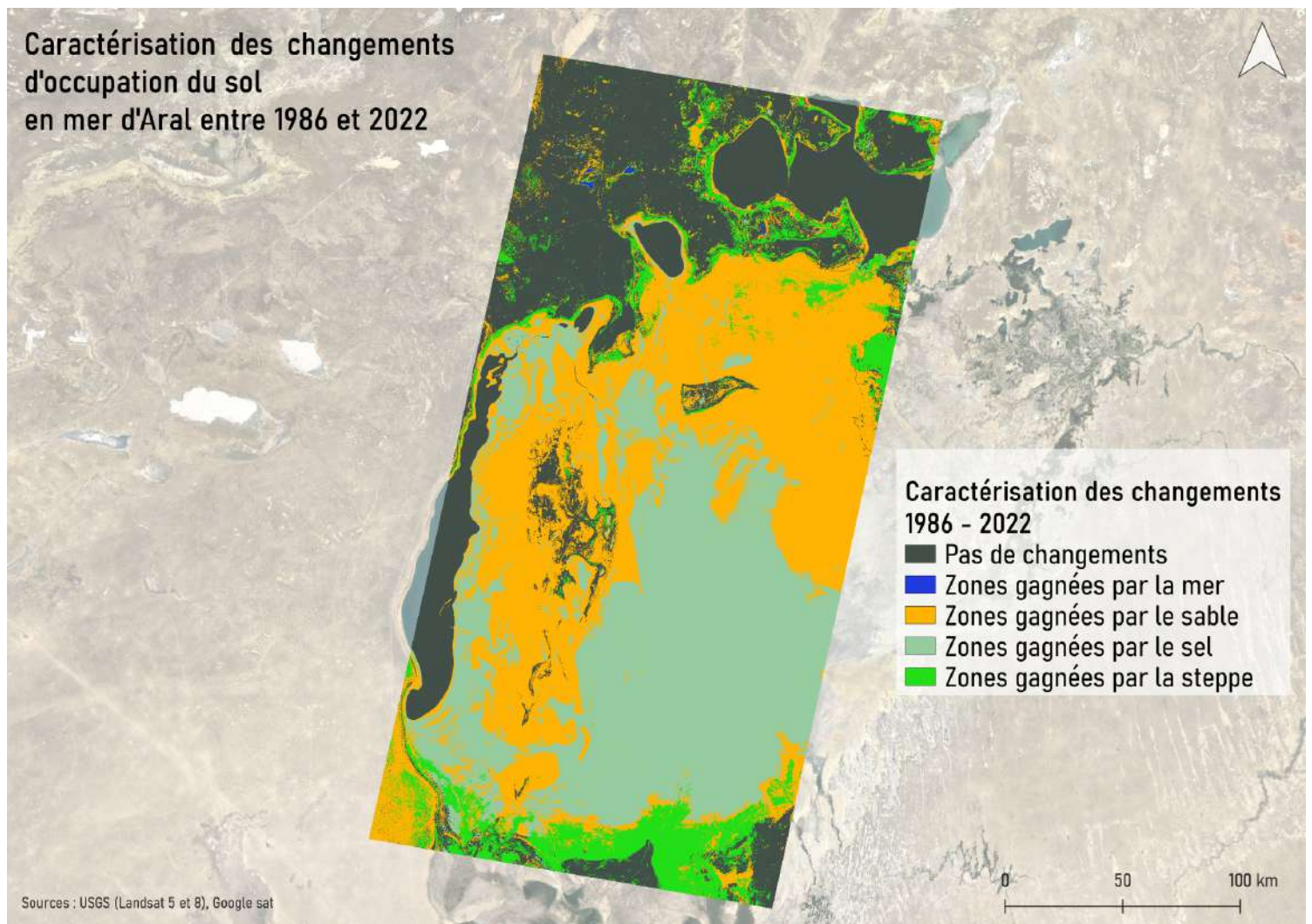
- Surfaces en eaux
- Sols sableux
- Sols salins
- Steppes
- Changements d'occupation du sol entre 1986 et 2022

Sources : USGS (Landsat 5 et 8), Google sat

Notre deuxième carte permet quant à elle de mettre en avant l'évolution des surfaces en eau. C'est évidemment le type d'occupation du sol qui a connu la plus forte réduction, passant d'une occupation de 40 765,4 km² (68,82 % de la zone) en 1986 à 4 964,1 km² (8,38 %) en 2022, soit une réduction de 35 801,4 km².



La troisième carte montre l'espace gagné par chacun des types d'occupation du sol. Bien que la steppe progresse, ce sont les sols sableux et salins qui ont le plus vu leur surface augmenter, particulièrement dans la zone où la mer s'est retirée (respectivement +18279,5 et +13007,2 km²).



Conclusion

Il convient désormais de mettre ces changements en perspective. Comme énoncé plus haut, la situation actuelle s'explique par plusieurs événements historiques dont l'impact est prouvé aujourd'hui. Le premier acteur aujourd'hui pointé du doigt est l'URSS, avec son exploitation intensive des terres et de la ressource de l'eau dans la zone.

En effet, à partir des années 1950, l'union soviétique a souhaité développer l'agriculture intensive dans les steppes de l'actuel Ouzbékistan et Turkménistan. Ce sont particulièrement les cultures de coton qui furent mises en place, nécessitant une grande quantité d'eau et de main d'œuvre. Des populations furent donc installées dans la région, et des travaux d'irrigation débutèrent, indispensable pour l'agriculture dans les steppes. Il s'agit d'un chantier agricole immense, puisque plus d'un million de tonnes de coton sont cultivées par an de 1960 à 1970, et l'Ouzbékistan devient même l'un des 1ers exportateurs de coton dans les années 1980. Cette irrigation nécessite des prélèvements massifs dans les fleuves Amou-Daria et Syr-Daria, réduisant leur débit (passage de 55 à 7 millions de mètres cube) et donc l'approvisionnement en eau en aval, dans la mer d'Aral. Outre les quantités d'eau prélevées, la qualité des ouvrages hydrauliques est mise en cause. C'est notamment le cas du canal du Karakoum, construit en 1959 par des ingénieurs soviétiques. Celui-ci dévie les eaux de l'Amou-Daria dès son entrée dans l'actuel Turkménistan. Son problème majeur est qu'il est creusé à même le sol désertique sur 1300 km, l'infiltration de l'eau dans le sol est donc énorme, comparé à un canal de béton.

Les réductions de débit ne pouvant être comblées par les précipitations trop faibles en mer d'Aral, ses eaux s'évaporèrent donc progressivement à partir de cette période.

L'assèchement de la mer d'Aral a produit un ensemble de conséquences, parfois dramatiques. Tout d'abord, la forte salinisation de l'eau, puisque de 1960 à 2002, celle-ci a augmenté de 10 à environ 40 g/kg, tuant une grande partie des poissons présents (20 espèces endémiques se sont éteintes, en lien avec ces changements). Cette disparition des poissons (et de l'eau en elle-même) a pu entraîner une réduction de la biodiversité des oiseaux, ainsi que le départ des nombreuses populations de pêcheurs installés dans la région. Ensuite, une grande partie des zones où l'eau s'est retirée étant couverte de sel, aucune valorisation y est possible. Enfin, cette stérilisation des milieux et l'utilisation de pesticides dans les cultures intensives en amont de la mer d'Aral ont fait augmenter la toxicité de la région pour ses habitants, qu'il s'agisse de l'air avec de véritables tempêtes de sel ou de la nourriture consommée. On retrouve notamment de fortes prévalences de maladies telles que les diarrhées, néphrites, hépatites, cancers, maladies pulmonaires, anémies ainsi qu'une mortalité infantile très élevée.

Cette dégradation des conditions de vie a entraîné une forte émigration sous forme de réfugiés climatiques, ce qui a pu contribuer à une colère envers le pouvoir soviétique central, et ainsi un renforcement des sentiments nationaux dans la région.

Pour revenir à notre étude, il aurait pu être intéressant de comparer le niveau de la mer non pas à partir de 1986, mais avant, au moment du début des politiques agricoles ayant transformé le paysage. C'est malheureusement impossible de trouver de l'imagerie satellite pour cette époque, en tout cas pas avec la constellation Landsat. Il aurait également pu être intéressant d'élargir la zone d'étude, afin de réellement prendre en compte l'ensemble de la mer (celle-ci étant légèrement rognée dans notre étude) et d'ajouter à notre analyse des zones urbaines plus importantes, que l'on peut apercevoir un peu plus loin des bords de la mer (permettant ainsi de mesurer l'émigration des populations en termes de morphologie urbaine).

Sources :

- MAINGUET M., LÉTOLLE R., DUMAY F., “Le système régional d'action éolienne (SRAE) du bassin de l'Aral (Kazakhstan, Ouzbékistan et Turkménistan)”, *Comptes Rendus Geoscience*, 2002, [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(02\)01772-8](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(02)01772-8)
- “Climat Baikonour (Kazakhstan)”, Climate Data, <https://fr.climate-data.org/asie/kazakhstan/kyzylorda-province/baikonour-28012/>
- GUICHARD F., XUZHANAZAROV M., LE CALLONEC L., SULAJMONOV R., TUCOLKA P., « La mer d'Aral reviendra-t-elle ? », *Cahiers d'Asie centrale*, 2002, <http://journals.openedition.org/asiacentrale/677>
- “Comment la mer d'Aral a disparu”, Brut., 2020, <https://www.brut.media/fr/nature/comment-la-mer-d-aral-a-disparu-840c75b0-1f2e-488d-accf-9a980f7d7ee4>
- “Mer D'Aral Une Catastrophe Écologique”, *Le dessous des cartes*, 1991, <https://www.youtube.com/watch?v=HscXTk2XxGs>
- “Mer d'Aral”, Wikipedia, 2018 (1re mise en ligne), https://fr.wikipedia.org/wiki/Mer_d%27Aral
- “Barrage de Kokaral”, Wikipedia, 2012 (1re mise en ligne), https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_de_Kokaral