**Zeitschrift:** Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
**Herausgeber:** Société Vaudoise des Sciences Naturelles
**Band:** 95 (2016)

**Artikel:** Évolution de la rive au sud du lac de Neuchâtel entre 1953 et 2010
**Autor:** Romanens, Rémy / Clerc, Christian / Vittoz, Pascal
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-630437

**Nutzungsbedingungen**
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 13.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

# Évolution de la rive au sud du lac de Neuchâtel entre 1953 et 2010

Rémy ROMANENS[1], Christian CLERC[2], Pascal VITTOZ[1]

**Romanens R., Clerc C. & Vittoz P., 2016. Évolution de la rive au sud du lac de Neuchâtel entre 1953 et 2011. *Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 95 : 33-61.**

**Résumé**

La rive sud du lac de Neuchâtel abrite l'un des plus vastes complexes marécageux de Suisse appelé communément « Grande Cariçaie ». Sa valeur naturelle est reconnue à l'échelle nationale et internationale et la conservation de ses surfaces marécageuses terrestres est un enjeu majeur. L'évolution de la position de la ligne de rive, qui sépare les surfaces terrestres et le lac, est donc l'objet d'une attention particulière. Cet article compare différentes cartes et photos aériennes couvrant la période 1953-2010 afin de quantifier et caractériser l'évolution chronologique de cette ligne de rive.

Durant la période 1953-2010, les mouvements de la ligne de rive ont conduit à la perte de 62.6 hectares et au gain de 69.7 hectares de rives marécageuses. Ce bilan masque d'importantes disparités temporelles et géographiques. La période 1953-1993 est dominée par le recul, notamment avec la disparition d'importantes surfaces de grèves sableuses. Ce recul est particulièrement marqué pour la réserve naturelle des Grèves de Cheseaux-Noréaz. La période 1993-2010 présente une progression de la ligne de rive résultant d'une double action anthropique. D'une part l'amélioration de la qualité des eaux du lac a favorisé l'extension des roselières lacustres, celles-ci protégeant à leur tour les rives. D'autre part l'aménagement d'infrastructures de lutte contre l'érosion sur le littoral des Grèves de Cheseaux-Noréaz a permis de freiner considérablement le recul.

Le cadre légal en vigueur et la valeur archéologique de la Grande Cariçaie (plusieurs sites palafittiques préhistoriques inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO) engagent les gestionnaires à poursuivre leurs actions conservatoires et, parmi elles, la lutte contre l'érosion. Des sites d'action prioritaires ont été sélectionnés et figurent dans le plan de gestion des réserves naturelles pour la période 2012-2023.

***Mots clés :*** cartographie, dune, érosion, Fribourg, marais, phosphate, photographie aérienne, pollution, roselière, sédiments, Vaud, vent

[1] Institut des dynamiques de la surface terrestre, Université de Lausanne, Bâtiment Géopolis, CH-1015 Lausanne ; Suisse

[2] Bureau exécutif de l'association de la Grande Cariçaie, Maison de la Grande Cariçaie, Chemin de la Cariçaie 3, CH-1400 Yverdon-les-Bains ; Suisse

© Société Vaudoise des Sciences Naturelles, 2016. Tous droits de reproduction réservés. CODEN : BSVAA6 ISSN : 0037-9603

**Romanens R., Clerc C. & Vittoz P., 2016. Evolution of the southern shore of the *lac de Neuchâtel* between 1953 and 2010. *Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 95 : 33-61.**

**Abstract**

The southern shore of the *lac de Neuchâtel* shelters one of the largest wetland areas in Switzerland, named « *Grande Cariçaie* ». Its natural value is both nationally and internationally recognized, but the conservation of these marshlands represents a major challenge. The evolution of the shoreline's position, which separates the land from the lake, is of particular interest. To quantify and characterize the temporal evolution of the shoreline this article compares different maps and aerial photographs covering the period ranging 1953-2010.

Between 1953 and 2010, the shoreline receded by a total of 62.6 ha and the marshlands advanced by 69.7 ha. However, this generalisation hides significant temporal and spatial disparities. The period ranging from 1953-1993 is dominated by shoreline regressions, including the disappearance of large areas of sandy shores. This regression was particularly visible in the nature reserve of the *Grèves de Cheseaux-Noréaz*. Contrary to the previous period, the shoreline clearly progresses between 1993-2010, resulting from two anthropogenic interventions. The improvement of the water quality (decrease in phosphate concentration) favoured the extension of reed beds, which in turn protect the shoreline. While the second intervention involved developing local infrastructure to prevent shoreline erosion at the *Grèves de Cheseaux-Noréaz* and significantly slowed the regression.

The national laws and archaeological value of the *Grande Cariçaie* (several prehistoric sites of pile dwelling listed as World Heritage by UNESCO) constrain the ways in which local managers must conserve the region, including the fight against erosion. Several priority sites of conservation action have now been selected and are listed in the 2012-2023 management plan of the nature reserves.

***Keywords:*** aerial photography, erosion, Fribourg, mapping, phosphate, pollution, reeds, sand dune, sediments, Vaud, wetlands, wind

## Introduction

Les zones marécageuses de la rive sud du lac de Neuchâtel forment le plus vaste écosystème riverain de Suisse. Ces zones de hauts-fonds lacustres ont émergé et se sont progressivement végétalisées suite à l'abaissement des eaux des trois lacs subjurassiens (lacs de Neuchâtel, Bienne et Morat) résultant des travaux de régulation de la première correction des eaux du Jura, communément appelés 1re CEJ, réalisés entre 1862 et 1893 (Nast 2006). Leur valeur naturelle, reconnue à l'échelle nationale et internationale, a conduit à leur inscription dans plusieurs inventaires fédéraux de sites naturels d'importance nationale au cours des années 1980. Sept réserves naturelles couvrant environ 2'250 hectares composés de hauts-fonds lacustres, de marais et de forêts alluviales, ont été délimitées et instituées par les Etats de Vaud et Fribourg, propriétaires de l'essentiel des surfaces marécageuses de la rive sud du lac de Neuchâtel. Ces réserves naturelles ont été instituées :

- pour le canton de Vaud : par la Décision de classement des réserves naturelles de la rive sud du lac de Neuchâtel (communes d'Yverdon-les-Bains, Cheseaux-Noréaz, Yvonand, Vully-les-Lacs et Cudrefin) approuvée le 4 octobre 2001 et le 25 mars 2002 par le Chef du Département de la sécurité et de l'environnement ;
- pour le canton de Fribourg : par le Règlement du 6 mars 2002 accompagnant le plan d'affectation cantonal des réserves naturelles sur la rive sud du lac de Neuchâtel.

Soumises aux exigences conservatoires formulées par les ordonnances fédérales promulguées à la suite des inventaires fédéraux, ces réserves naturelles bénéficient de mesures de gestion régulièrement appliquées depuis le début des années 1980. Ces mesures ont pour but principal la préservation des espèces et des milieux naturels caractéristiques des zones inondables, prioritairement celles et ceux des marais non-boisés. Cette priorité, et les moyens qui lui sont alloués, se justifient avant tout par la raréfaction des marais en Suisse, environ 95 % des surfaces de marais ayant disparu du pays depuis la moitié du XIXe siècle (Grünig 2007). Ils se justifient aussi par l'évolution des surfaces de marais encore présentes aujourd'hui qui, souvent contraintes (régulation des eaux) et confinées (agriculture intensive, urbanisation), sont soumises à des phénomènes récurrents d'embroussaillement, d'eutrophisation ou d'érosion susceptibles de péjorer leur valeur naturelle (Klaus 2007). Les mesures de gestion appliquées (fauchage, arrachage, décapage, aménagement d'ouvrages anti-érosion) visent donc à réduire ces phénomènes, en accord avec les principes conservatoires des ordonnances fédérales en vigueur (Association de la Grande Cariçaie 2015).

Les mesures de gestion sont accompagnées de mesures de suivi permettant d'en évaluer l'efficience et de rendre compte de l'évolution générale des milieux naturels. À ce titre cette étude établit une synthèse du suivi de l'évolution chronologique des milieux naturels de la rive sud du lac de Neuchâtel dans sa marge littorale, de part et d'autre de sa ligne de rive. Cette synthèse repose sur la comparaison de plusieurs états cartographiques couvrant la période 1953-2011. En établissant des bilans sectorisés, quantitatifs et qualitatifs, des pertes ou des gains des milieux naturels littoraux, elle met en évidence les mouvements chronologiques de la ligne de rive de la rive sud du lac de Neuchâtel et permet de formuler des hypothèses concernant les principaux facteurs (érosion, sédimentation, colonisation par les roseaux) qui ont modulé ces mouvements depuis le milieu du XXe siècle. Elle pourrait servir d'aide à la décision quant aux éventuelles mesures de gestion à mettre en œuvre pour répondre aux exigences conservatoires du site.

## Matériel et méthodes

### Périmètre de cartographie

Le périmètre de cartographie couvre six des sept réserves naturelles qu'abrite la rive sud du lac de Neuchâtel (figure 1). Géologiquement cette région doit son origine à l'accumulation de sables en milieu marin et lacustre pendant le Tertiaire (formation des « molasses »), puis à leur remodelage, d'abord par les glaciers du Quaternaire. Finalement, après le retrait de ces derniers, la rive s'est formée par érosion de falaises par le lac et redistribution des sédiments par les courants lacustres. Ces réserves naturelles forment un ensemble marécageux riverain communément appelé « Grande Cariçaie », du nom de la laiche élevée (*Carex elata* All.), l'espèce dominant les bas-marais de cet ensemble (Antoniazza & Manuel 1991). Les six réserves naturelles concernées par l'étude couvrent une surface d'environ 2'000 hectares situés à des altitudes variant entre 530 m et 425 m.

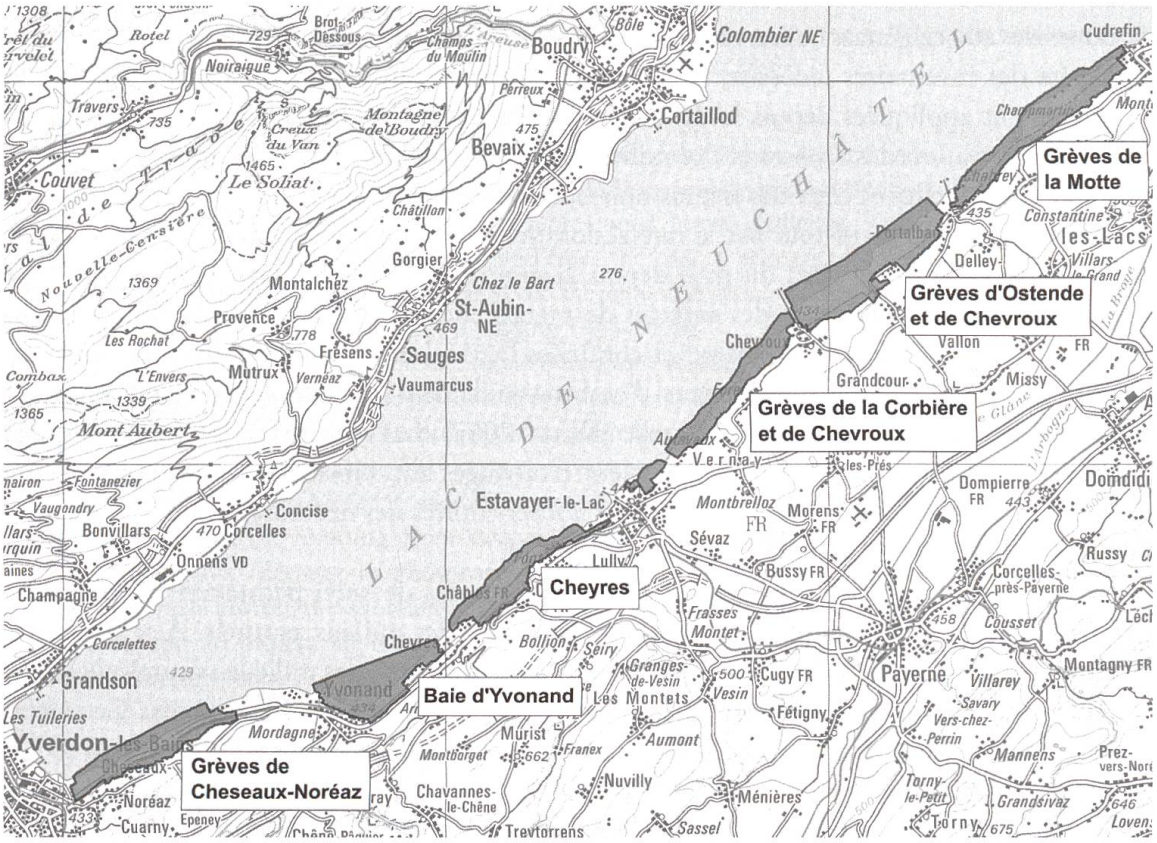



Figure 1. Périmètre de cartographie sur la rive sud du lac de Neuchâtel. Les réserves naturelles sont délimitées par les polygones grisés. Carte reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA16078).

Ces réserves naturelles présentent aujourd'hui un profil transversal schématique caractérisé par :

- une falaise de molasse, presque entièrement colonisée par la forêt, séparant la zone riveraine et l'arrière-pays agricole et presque continue d'un bout à l'autre de la rive du lac ; le pied de cette falaise marque l'ancien rivage du lac, avant la réalisation des travaux de régulation de la 1re CEJ ; l'altitude des falaises varie entre 435 m à son pied et 530 m pour les sites les plus élevés ;
- des forêts alluviales qui ont conquis les surfaces émergées les plus hautes après le retrait des eaux du lac suite aux travaux de régulation de la 1re CEJ ; leur altitude varie entre 430 et 435 m ;
- des prairies marécageuses et des étangs qui ont colonisé les surfaces émergées les plus basses après le retrait des eaux du lac suite aux travaux de régulation de la 1re CEJ ; leur l'altitude varie entre 429 et 430 m ;
- des hauts-fonds lacustres sableux partiellement colonisés par des herbiers aquatiques ; leur altitude varie entre 425 et 429 m.

## Support de cartographie

Les cartographies chronologiques des milieux naturels ont été réalisées sur la base de cinq séries de photographies aériennes redressées (orthophotos) et numérisées (figure 2 et tableau 1).

Série 1 Série 2 Série 3 Série 4 Série 5

Figure 2. Extraits des cinq séries photographiques utilisées pour la cartographie des milieux naturels. Secteur de la Grande Gouille, commune d'Estavayer-le-Lac (FR). Photographies aériennes reproduites avec l'autorisation de swisstopo (BA16078).

Tableau 1. Caractéristiques des séries de photographies aériennes utilisées.

| Série | Date de vol | Qualité | Niveau du lac de Neuchâtel | Secteurs de rive couverts |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 21-05-1953 | Noir et blanc | 429.15 msm | Yverdon - Yvonand |
| | 12-05-1954 | Noir et blanc | 429.34 msm | Cheyres - Cudrefin |
| 2 | 26-09-1979 | Noir et blanc | 429.26 msm | Yverdon - Yvonand |
| | 18-05-1981 | Noir et blanc | 429.31 msm | Cheyres - Cudrefin |
| 3 | 07-04-1992 | Couleur | 429.51 msm | Chevroux - Cudrefin |
| | 09-03-1994 | Couleur | 429.27 msm | Yverdon - Chevroux |
| 4 | 11-05-2001 | Couleur | 429.51 msm | Yverdon - Cudrefin |
| | 24-03-2010 | Couleur | 429.18 msm | Forel - Cudrefin |
| 5 | 06-04-2010 | Couleur | 429.34 msm | Cheyres - Autavaux |
| | 02-04-2011 | Couleur | 429.02 msm | Yverdon - Yvonand |

## Méthode de cartographie

Les cartographies ont été réalisées selon deux méthodes :

- Pour les séries photographiques 1, 2 et 4 : Identification et délimitation des milieux naturels par digitalisation sur les séries photographiques numérisées à l'aide d'un système d'information géographique (SIG).
- Pour les séries photographiques 3 et 5 : Identification et délimitation des milieux naturels sur le terrain à l'aide des séries photographiques et d'une clé d'identification des milieux naturels, puis restitution de ces limites par digitalisation sur les séries photographiques numérisées à l'aide d'un SIG.

Quatre milieux naturels communs aux cinq cartographies caractérisent la marge littorale des réserves naturelles de la Grande Cariçaie (tableau 2 et figure 3).

## Comparaison des cartes

Les cinq cartes obtenues ont été intersectées à l'aide d'un SIG, de façon à obtenir l'évolution des milieux naturels pour quatre périodes, soit :

- Période 1 : Série 1 (1953-1954) à Série 2 (1979-1981) ; ci-après désignée par 1953-1980 ;
- Période 2 : Série 2 (1979-1981) à Série 3 (1992-1994) ; ci-après 1980-1993 ;
- Période 3 : Série 3 (1992-1994) à Série 4 (2001) ; ci-après 1993-2001 ;
- Période 4 : Série 4 (2001) à Série 5 (2010-2011) ; ci-après 2001-2010.

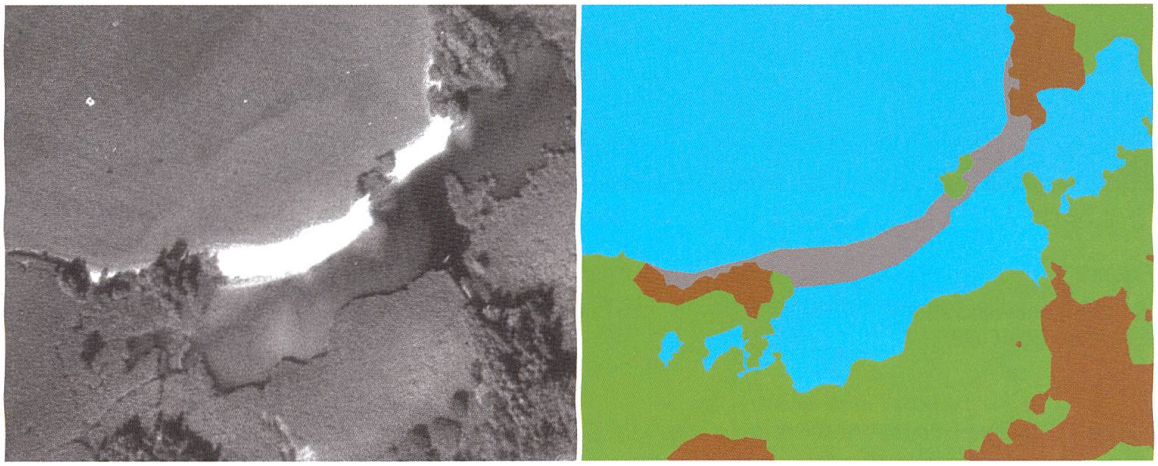


Figure 3. Extrait cartographique pour la série photographique 2. Secteur des étangs de Champ-Pittet, commune de Cheseaux-Noréaz (VD). Bleu: *Eaux calmes*; gris: *Rivages et lieux humides sans végétation*; vert: *Rivages et lieux humides avec végétation*; brun: *Forêts*. Photographie aérienne reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA16078).

Tableau 2. Milieux naturels distingués dans la marge littorale des réserves naturelles de la Grande Cariçaie.

| Milieu naturel | Description |
|---|---|
| Eaux calmes | Surfaces immergées sans végétation émergente (lac, étangs), avec ou sans végétation submergée (p. ex. *Chara* sp., *Potamogeton* sp.) ou flottante (p. ex. *Nymphaeaceae*) |
| Rivages et lieux humides sans végétation | Surfaces émergées sans végétation (sable, sol nu) |
| Rivages et lieux humides avec végétation | Surfaces immergées recouvertes de végétation émergente non-ligneuse (roselières), ou émergées recouvertes de végétation non-ligneuse (prairies à grandes ou petites laiches) |
| Forêts | Surfaces immergées ou émergées recouvertes de végétation émergente ligneuse |

Pour chaque période deux catégories de surfaces ont été sélectionnées et extraites:

- les surfaces caractérisées par leur transformation, au cours de la période, du milieu naturel *eaux calmes* en tout autre milieu naturel
- les surfaces caractérisées par leur transformation, au cours de la période, de tout autre milieu naturel en milieu naturel *eaux calmes*.

Par convention la première catégorie de surfaces a été désignée comme caractéristique d'une progression de la ligne de rive et la deuxième catégorie de surfaces a été désignée comme caractéristique d'une régression de la ligne de rive (figure 4).

Dans le but de ne mettre en évidence que les mouvements chronologiquement réguliers de la ligne de rive, seules les surfaces caractérisées par une progression continue ou une régression continue de la ligne de rive pour les quatre périodes considérées ont été retenues et sélectionnées (figure 5). Les surfaces caractérisées par une progression pour certaines périodes et une régression pour d'autres périodes n'ont donc pas été retenues, celles-ci ne représentant cependant qu'une petite minorité des surfaces.

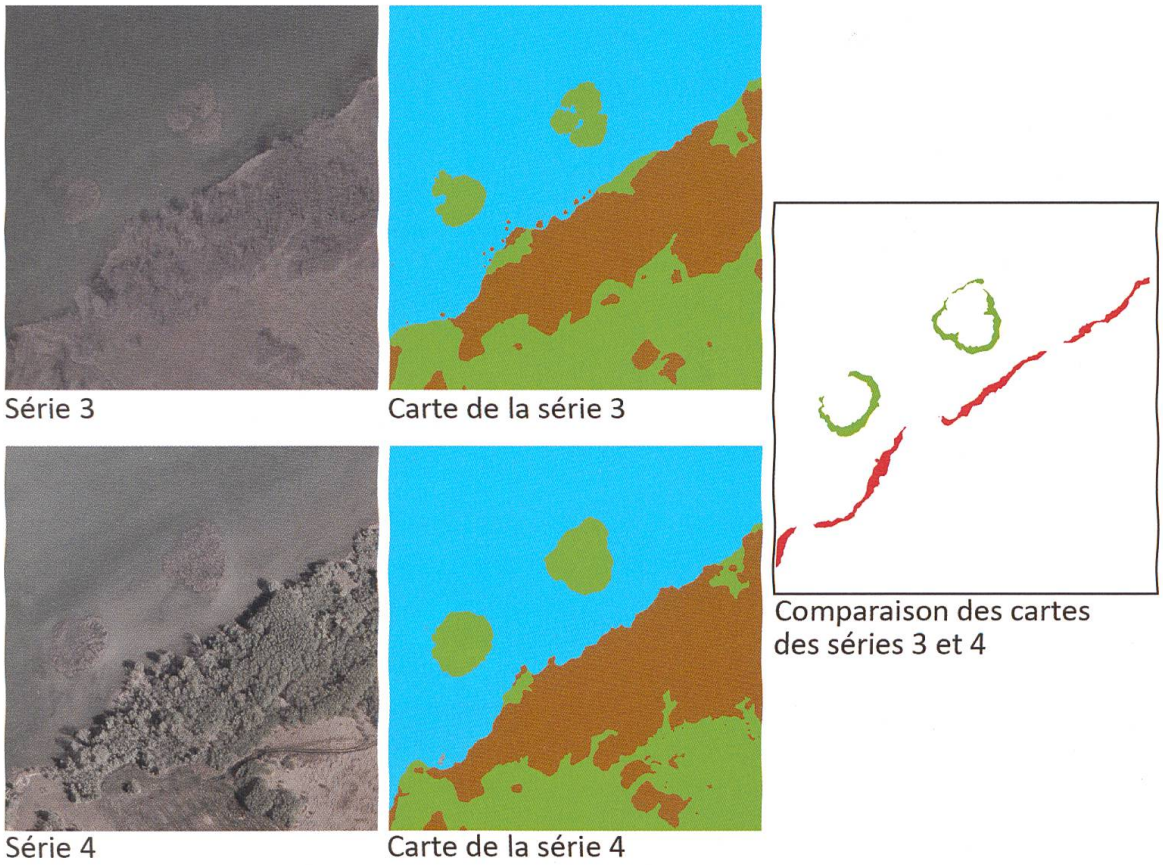



Figure 4. Séries photographiques, cartes et résultat de la comparaison des cartes. Période 3 (1993-2001). Secteur de rive de la réserve naturelle de Cheyres, commune de Châbles (FR). Pour les cartes : voir légende figure 3. Pour la comparaison des cartes des séries 3 et 4 : vert : surfaces désignées comme caractéristiques d'une progression de la ligne de rive ; rouge : surfaces désignées comme caractéristiques d'une régression de la ligne de rive. Photographies aériennes reproduites avec l'autorisation de swisstopo (BA16078).

## Quantification et qualification des mouvements chronologiques de la ligne de rive et de l'évolution des milieux naturels littoraux

Pour quantifier les mouvements chronologiques de la ligne de rive, les résultats cartographiques obtenus ont été superposés, successivement et à l'aide de l'outil SIG, aux périmètres des réserves naturelles de la Grande Cariçaie et à des bandes de 100 m de large perpendiculaires à l'orientation moyenne de la rive sud du lac de Neuchâtel. Un bilan des surfaces caractéristiques d'une régression ou d'une progression continue a été calculé pour chaque bande et chaque période. Sur la base de ce bilan, une vitesse annuelle moyenne de régression ou de progression de la ligne de rive a été calculée pour chaque période et chaque réserve naturelle de la Grande Cariçaie.

Sur la base de la résolution des photographies aériennes, nous avons estimé que les images de 1953 et 1980 permettaient une précision dans la position des lignes de rives de ±2 m et les images de 1993, 2001 et 2010 de ±1 m. De ce fait, les distances mesurées entre deux livres de rives successives sont entachées d'une incertitude de ±4 m (période 1953-1980), ±3 m (période 1980-1993) ou ±2 m (deux dernières périodes). Une estimation de l'incertitude liée aux vitesses annuelles moyennes de régression et progression a donc été obtenue en divisant les valeurs précédentes par le nombre d'années séparant les deux images.

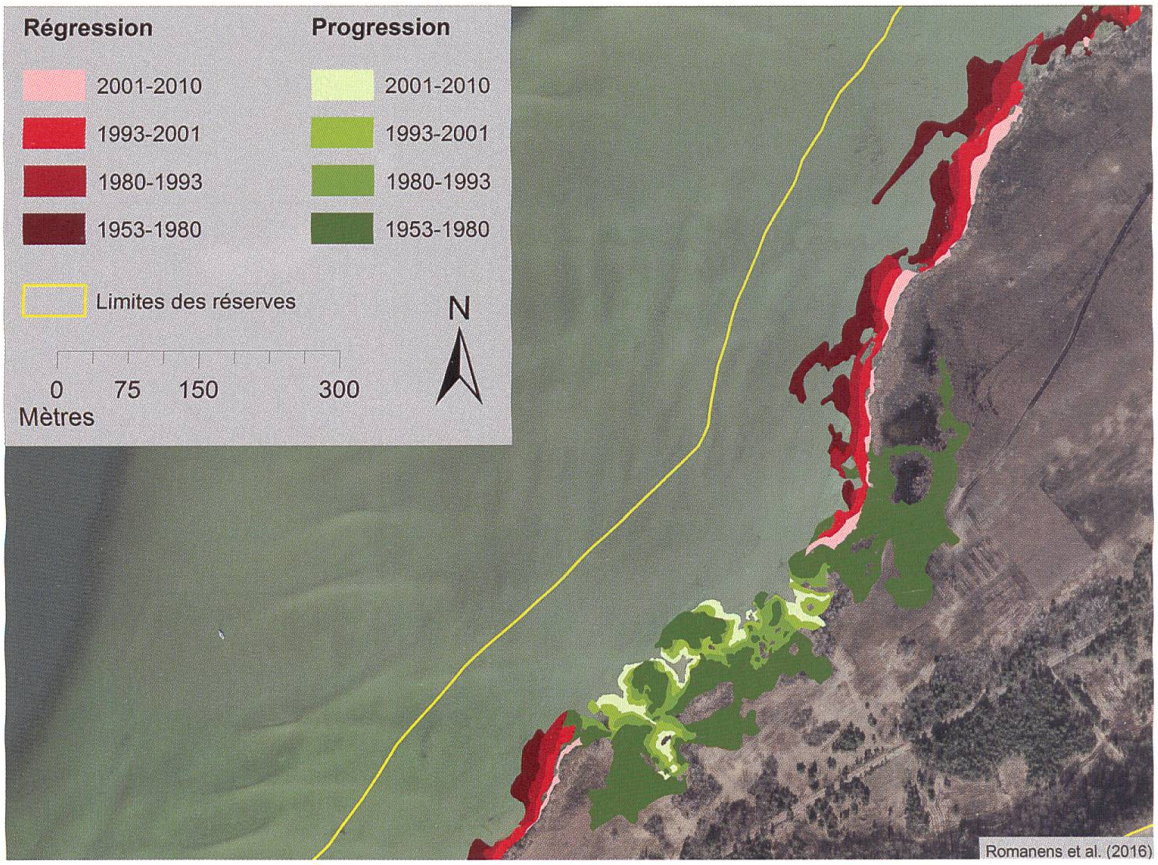



Figure 5. Progression et régression continue de la ligne de rive pour un secteur de rive de la réserve naturelle des Grèves de La Motte, commune de Cudrefin (VD), pour les quatre périodes considérées (1953 à 2010). En vert: surfaces caractéristiques d'une progression continue de la ligne de rive, de la période la plus ancienne en vert foncé à la période la plus récente en vert clair. En rouge: surfaces caractéristiques d'une régression continue de la ligne de rive, de la période la plus ancienne en rouge foncé à la période la plus récente en rouge clair. Série photographique 5. Photographie aérienne reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA16078).

Pour quantifier et qualifier l'évolution des milieux naturels littoraux, les surfaces résultant de la superposition cartographique établie précédemment ont permis de calculer, pour chaque période et chaque réserve naturelle, les surfaces des milieux naturels *forêts*, *rivages avec végétation* et *rivages sans végétation* gagnées ou perdues relativement au milieu naturel *eaux calmes*.

## Résultats

### Mouvements chronologiques de la ligne de rive

Les mouvements chronologiques de la ligne de rive présentent des bilans contrastés suivant la période ou la réserve naturelle considérées (tableau 3). Les périodes 1 (1953-1980) et 2 (1980-1993) sont caractérisées par une vitesse annuelle moyenne du mouvement de la ligne de rive négative. Ces deux périodes ont donc vu la ligne de rive reculer. Pour les périodes 3 (1993 à 2001) et 4 (2001 à 2010) cette vitesse est positive, traduisant une ligne de rive qui avance.

La réserve naturelle des Grèves de Cheseaux-Noréaz est la seule réserve à présenter des vitesses annuelles moyennes négatives pour les quatre périodes, avec un net fléchissement de celle-ci pour les deux dernières périodes. Inversement, les Grèves de la Corbière sont caracté-

Tableau 3. Vitesse annuelle moyenne (m/année) du mouvement de la ligne de rive pour les six réserves naturelles considérées dans la Grande Cariçaie entre 1953 et 2010. L'incertitude est calculée sur la base de l'erreur entourant le positionnement de la ligne de rive à partir des photographies aériennes.

| Réserve naturelle | Période 1953-1980 | Période 1980-1993 | Période 1993-2001 | Période 2001-2010 |
|---|---|---|---|---|
| Incertitudes liées aux moyennes | ± 0.15 | ± 0.23 | ± 0.25 | ± 0.22 |
| Grèves de Cheseaux-Noréaz | -0.79 | -0.70 | -0.37 | -0.25 |
| Baie d'Yvonand | 0.01 | 0.04 | 0.21 | 0.55 |
| Cheyres | -0.06 | -0.40 | -0.24 | 0.43 |
| Grèves de la Corbière | 0.55 | 0.45 | 0.45 | 0.58 |
| Grèves d'Ostende | 0.07 | 0.31 | 0.43 | 0.52 |
| Grèves de la Motte | -0.09 | -0.16 | 0.00 | 0.25 |
| **Toutes les réserves naturelles** | **-0.02** | **-0.05** | **0.10** | **0.35** |

risées par une progression continue importante. Les autres réserves naturelles présentent une situation intermédiaire avec une régression durant les premières périodes, ou un bilan proche de l'équilibre, et une nette progression durant la ou les dernières périodes.

Les incertitudes liées aux moyennes peuvent sembler importantes vis-à-vis de certaines vitesses moyennes calculées. Cependant, il ne faut pas oublier que ces moyennes ne donnent qu'une vision globale des changements à l'échelle de la réserve. En effet, elles recouvrent dans chaque réserve des zones qui progressent et d'autres qui régressent beaucoup plus rapidement que les valeurs moyennes.

### Évolution des milieux naturels littoraux

La répartition des surfaces en régression montre une évolution différenciée au cours du temps (figures 6 à 8). Dans la première période (1953-1980), les *rivages avec* et *sans végétation* montrent des régressions importantes. Mais les *rivages avec végétation* gagnent ailleurs des surfaces, pour un bilan final presque équilibré, contrairement aux *rivages sans végétation* qui ne progressent nulle part. Par la suite, les *rivages sans végétation* sont quasi-inexistants dans les surfaces en régression, celles-ci se partageant entre les *rivages avec végétation* et les *forêts*. La régression des *forêts* est particulièrement importante entre 1980 et 1993. Les surfaces nouvellement gagnées sur les *eaux calmes* sont par contre systématiquement largement dominées par les *rivages avec végétation*.

## Discussion

Cette étude montre une évolution contrastée temporellement et géographiquement des lignes de rive au sud du lac de Neuchâtel. En effet, cinq des six réserves naturelles présentent un bilan presque neutre ou clairement négatif entre 1953 et 1993, alors que cinq des six réserves présentent un bilan clairement positif depuis le début du XXIe siècle. Cela correspond donc, a priori, à une amélioration de la situation relativement aux obligations légales en vigueur en matière de conservation des marais et des zones alluviales. Seule la réserve naturelle des Grèves

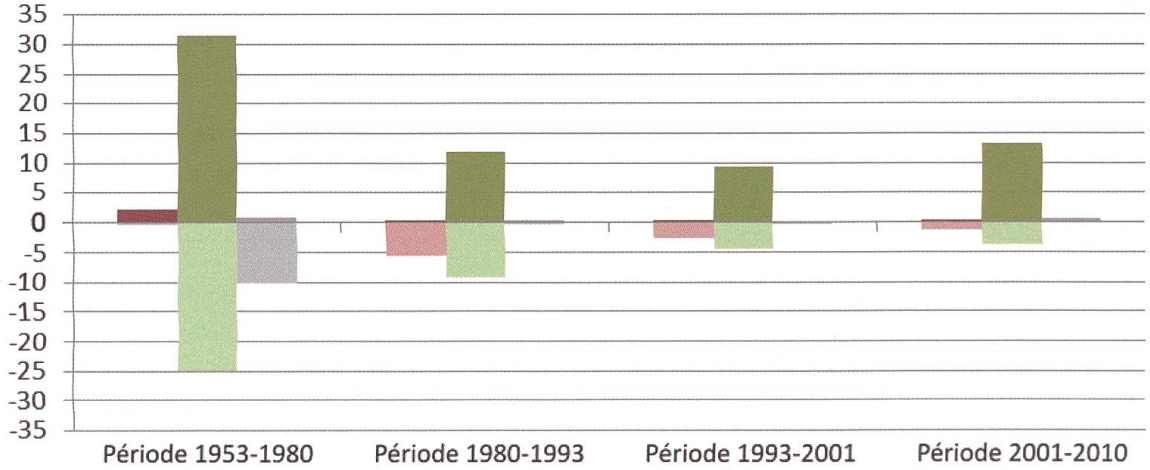



Figure 6. Surfaces (ha) de *forêts* (en brun), *rivages et lieux humides avec végétation* (en vert) et *rivages et lieux humides sans végétation* (en gris) gagnées (valeurs positives) ou perdues (valeurs négatives) relativement aux *eaux calmes* dans les réserves naturelles de la Grande Cariçaie pour les quatre périodes considérées.

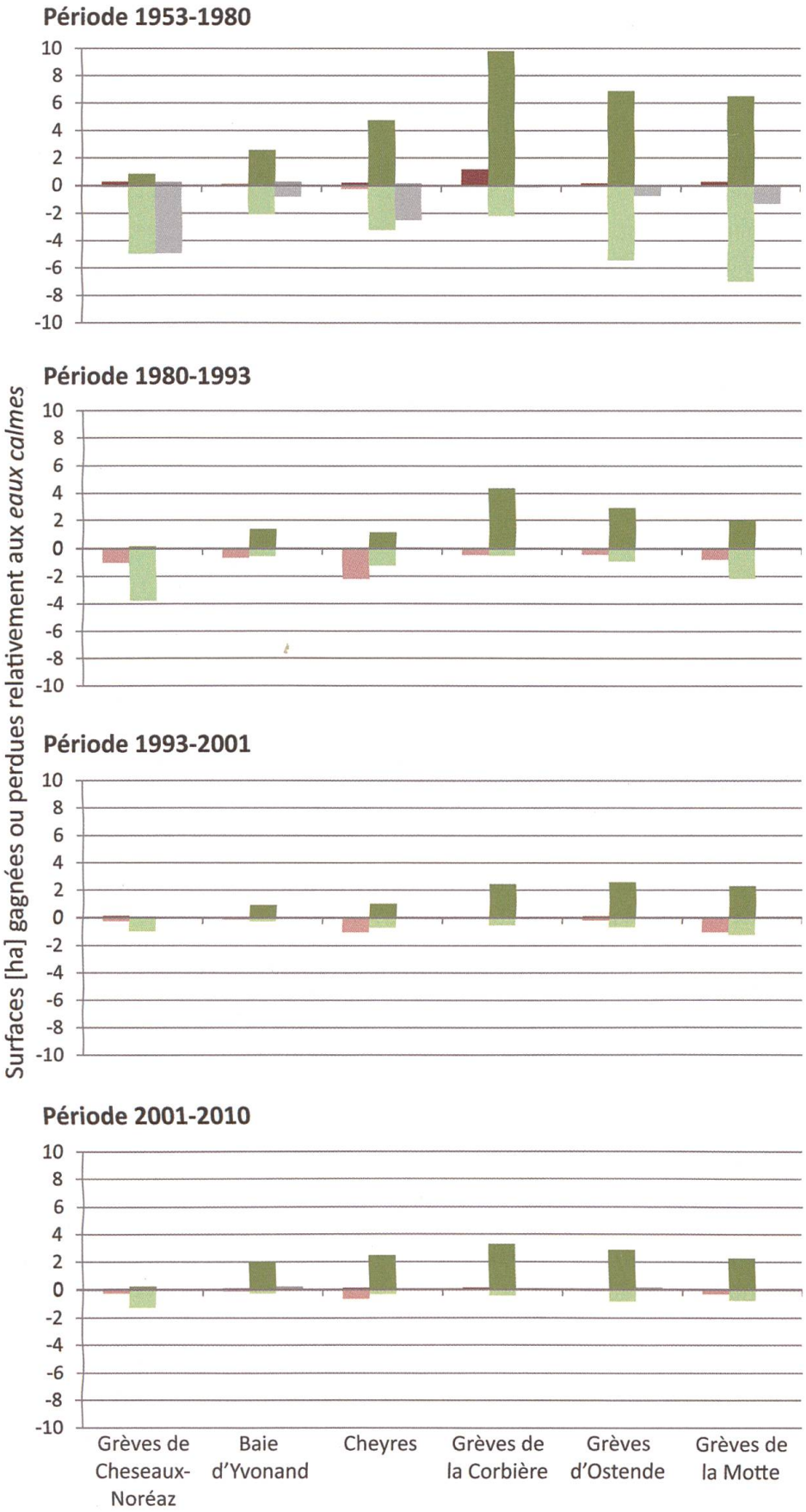
de Cheseaux-Noréaz montre globalement une régression continue depuis plus de 60 ans, bien que plus lente dans les dernières années, alors que la réserve des Grèves de la Corbière montre une progression continue tout au long de la période concernée par cette étude. Au total ce sont 62.6 et 69.7 hectares de surfaces marécageuses qui ont été respectivement perdus et gagnés entre 1953 et 2010 dans les réserves naturelles de la Grande Cariçaie.

La régression des rives a commencé bien avant le début de la période couverte par notre étude. Ainsi, selon Benz (1998), qui a comparé des cartes topographiques historiques au 1:25'000 dans la région d'Estavayer-le-lac, un recul du rivage d'environ 50 m entre 1907 et 1957 est observé. Cette évolution ralentit entre 1957 à 1993, ce qui correspond à nos observations sur la fin de la période concernée. Selon la même méthode Chervet & Huber (1990) ont montré que, dès la fin des travaux de la 1re CEJ (1862-1893), d'importantes masses de sable ont été déplacées par les courants lacustres, conduisant à une réduction des surfaces émergées suite à cette correction.

## Facteurs à l'origine des régressions et progressions de la ligne de rive

L'évolution de la ligne de rive n'est que la partie visible d'un phénomène de plus grande ampleur. Avant la 1re CEJ, lorsque le lac atteignait le pied des falaises de molasse, l'érosion due aux vagues a déposé de grandes quantités de sédiments sableux à proximité, formant des hauts-fonds lacustres appelés « beine lacustre ». Suite à cette correction, ces hauts-fonds ont été en partie exondés (les marais actuels) et les vagues ont repris leur travail d'érosion sur les nouvelles rives. Plusieurs facteurs, interdépendants, conditionnent la mise en suspension, le transport et la sédimentation des matériaux sableux par les courants lacustres sur la rive sud du lac de Neuchâtel et, de ce fait, modulent la position de sa ligne de rive. Les principaux facteurs sont :

Figure 7 (à droite). Surfaces (ha) de *forêts* (en brun), *rivages et lieux humides avec végétation* (en vert) et *rivages et lieux humides sans végétation* (en gris) gagnées (valeurs positives) ou perdues (valeurs négatives) relativement aux *eaux calmes* dans les réserves naturelles de la Grande Cariçaie. De gauche à droite sur la figure, l'ordre des réserves naturelles correspond à leur position le long de la rive du sud-ouest au nord-est.


Période 1953-1980
Période 1980-1993
Période 1993-2001
Période 2001-2010
Surfaces [ha] gagnées ou perdues relativement aux *eaux calmes*
10
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
Grèves de Cheseaux-Noréaz
Baie d'Yvonand
Cheyres
Grèves de la Corbière
Grèves d'Ostende
Grèves de la Motte

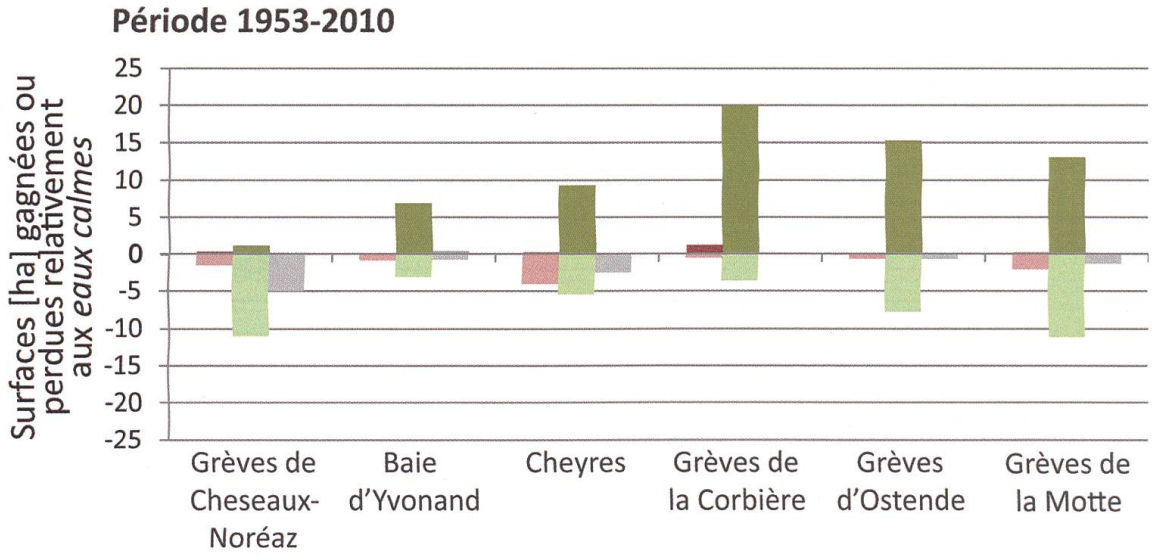



Figure 8. Surfaces (ha) de *forêts* (en brun), *rivages et lieux humides avec végétation* (en vert) et *rivages et lieux humides sans végétation* (en gris) gagnées (valeurs positives) ou perdues (valeurs négatives) relativement aux *eaux calmes* dans les réserves naturelles de la Grande Cariçaie sur l'ensemble de la période d'étude.

- **Le fetch de bise:** La bise est le vent dominant sur le lac de Neuchâtel. Elle peut souffler violemment et de manière continue pendant plusieurs jours. Entrant dans le lac de Neuchâtel par sa pointe nord-est, son fetch, soit la longueur, au-dessus d'une surface d'eau, que peut parcourir un vent sans rencontrer d'obstacle, est maximal dans la moitié sud-ouest du lac, générant dans ce secteur de rive les plus hautes vagues (Chervet & Huber 1990). À ce titre, les réserves naturelles des Grèves de Cheseaux-Noréaz et de Cheyres, situées dans cette deuxième moitié de lac, présentent les bilans d'évolution de ligne de rive les plus défavorables (figure 7 et 8).
- **La largeur des hauts-fonds lacustres:** Cette largeur varie entre 100 m et 1 000 m. Plus la largeur des hauts-fonds augmente, plus ceux-ci peuvent agir comme amortisseur des courants lacustres en absorbant l'énergie mécanique des vagues. La réserve naturelle des Grèves de la Corbière, protégée par les hauts-fonds les plus larges, présente le bilan de mouvement de ligne de rive le plus favorable (figure 7 et 8).
- **La géométrie de la rive:** Les baies, avec une ligne de rive concave, sont des zones de sédimentation privilégiée. C'est le cas de la réserve naturelle de la Baie d'Yvonand. Malgré sa position au sud-ouest du lac qui l'expose particulièrement à la bise, elle échappe partiellement à la règle de l'érosion continue, montrant au contraire une progression continue de sa ligne de rive dans sa moitié ouest, là où l'échancrure de la baie est la plus profonde (figure 9).
- **La nature du substrat:** Certains secteurs de rive, formés de placages morainiques ou de sables de molasse compactés, résistent à la mise en suspension des sédiments. À ce titre, la réserve naturelle des Grèves de la Corbière n'a souffert de l'érosion que sur des surfaces très limitées durant la période étudiée.
- **La végétalisation des hauts-fonds lacustres:** Le développement d'herbiers de macrophytes ou de massifs de roselière lacustre stabilise les sédiments, voire même favorise

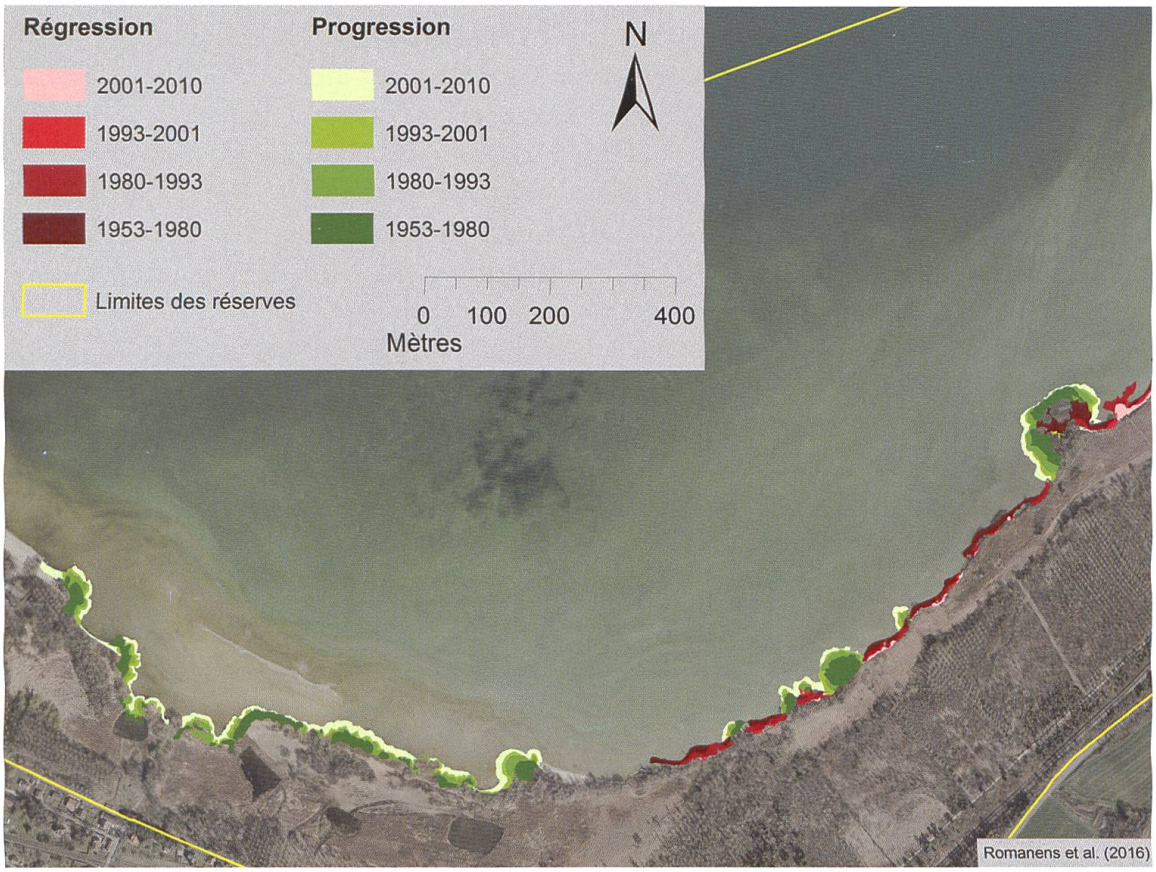



Figure 9. Évolution de la ligne de rive dans la réserve naturelle de la Baie d'Yvonand entre 1953 et 2010 : la ligne de rive progresse sur la partie ouest de la baie (sédimentation favorisée par la topographie) alors qu'elle régresse simultanément sur la partie est. Mêmes couleurs que figure 5. Photographie aérienne reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA16078).

la sédimentation. Ces types de végétation sont largement dépendants de la qualité des eaux. Les stations d'épuration peu nombreuses et l'utilisation importante de phosphates dans les lessives ont conduit à des taux de phosphore dépassant les 50 µg/l dans le lac de Neuchâtel vers 1980 (Service de statistique, canton de Neuchâtel 2016), à l'image de l'eutrophisation généralisée des lacs suisses constatée entre 1950 et 1990. Cette abondance de nutriments stimulait la croissance des roseaux (*Phragmites australis* (Cav.) Steud.) mais les affaiblissait aussi, les rendant plus vulnérables à l'action des vagues et des bois flottés (Ostendorp 1993). Elle réduisait le développement des herbiers de macrophytes, dominés par les characées, algues croissant en milieu méso- à oligotrophe. Suite à l'aménagement de stations d'épuration et à l'interdiction des phosphates dans les lessives (1986), le taux de phosphore du lac a baissé, pour se stabiliser autour de 10 µg/l dès 2004. Cette amélioration de la qualité chimique des eaux explique probablement en partie la progression de la ligne de rive observée depuis la période 1993-2001, presque généralisée après 2001. Les roseaux à nouveau plus solides colonisent certaines rives, formant des peuplements de plus en plus étendus.

- **La présence d'infrastructures humaines :** De nombreux aménagements riverains (ports, habitats de villégiature, ouvrages de protection, chemins) ont été réalisés dès la

fin de la 1re CEJ, particulièrement à partir des années 1950, stabilisant la ligne de rive là où ils ont été construits et perturbant localement les mouvements des sédiments. À titre d'exemple, la diminution de l'érosion observée à partir de la période 1993-2001 dans la réserve des Grèves de Cheseaux-Noréaz (figure 7) est essentiellement due aux travaux de protection de la rive entrepris entre 1997 et 2000 : 17 digues, palissades de bois et récifs artificiels immergés ont été construits le long de cette rive pour briser les vagues et réduire leur pouvoir érosif. Ces travaux, coûteux, ont donc eu un effet positif sur la rive du secteur.

## Milieux naturels perdus et gagnés

Après l'abaissement du niveau du lac résultant de la 1re CEJ, de grandes surfaces de sables nus, humides à périodiquement inondés, sont apparues sur la rive sud du lac de Neuchâtel. Ces surfaces, propices aux espèces pionnières et à une végétation temporaire des grèves (*Littorellion*, selon Delarze *et al.* 2015) ont continuellement régressé, colonisées sur les zones les plus élevées par les marais puis les forêts et érodées par les vagues sur la rive. La régression importante des *rivages et lieux humides sans végétation* entre 1953 et 1980 marque la fin de ce processus et correspond à leur quasi-disparition de la Grande Cariçaie. Ainsi, certaines espèces, comme la littorelle uniflore (*Littorella uniflora* (L.) Asch.) et la renoncule radicante (*Ranunculus reptans* L.), ont totalement disparu de la région, alors qu'elles y étaient observées jusque dans les années 1970. Ces milieux ont aussi souffert de la deuxième correction des eaux du Jura (2e CEJ, 1962-1973) dont l'objectif était de réduire les fluctuations annuelles du niveau du lac. Avant cette correction, plus de 1 m séparait les hautes et basses eaux moyennes du lac, permettant l'exondation de larges surfaces sableuses lors des basses eaux. Cet écart étant actuellement réduit à environ 50 cm, les surfaces sableuses sont trop faibles et trop brièvement émergées pour laisser la possibilité à ces espèces de se développer. En Suisse, les rivages du lac de Constance, dont le niveau n'est pas régulé artificiellement, abritent les plus beaux exemples en Suisse de cette végétation originale devenue extrêmement rare.

Les *forêts* ont également régressé pendant toutes les périodes et dans presque toutes les réserves naturelles considérées par cette étude. Ces forêts, entourées de surfaces de marais et situées au-dessus de la zone inondable, se sont développées sur les dunes de sable formées probablement dans les premières années suivant l'abaissement des eaux résultant de la 1re CEJ. Elles correspondent essentiellement aux communautés des dunes côtières et sont dominées par des saulaies à saule blanc (*Salix alba* L.), saule pourpre (*Salix purpurea* L.) et saule cendré (*Salix cinerea* L.), mais aussi par des ripisylves de transition diversifiées. Sous l'effet de l'érosion, de nombreuses dunes ont été réduites et ont complètement disparu, ou alors ont été stabilisées pour la construction d'habitats de villégiature. Les conditions écologiques et la composition particulière de ces forêts côtières font que leur régression n'est nullement compensée par la colonisation des marais par l'aulne glutineux (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), l'aulne blanc (*Alnus incana* (L.) Moench) ou la bourdaine (*Frangula alnus* Mill.), progression contre laquelle l'Association de la Grande Cariçaie lutte avec des travaux de débroussaillage, de fauche et de décapage effectués chaque hiver dans les marais (Association de la Grande Cariçaie, 2015).

À l'opposé, les *rivages et lieux humides avec végétation* présentent un bilan positif pour toutes les périodes considérées. Comme le montre la comparaison de cartes détaillées de la végétation

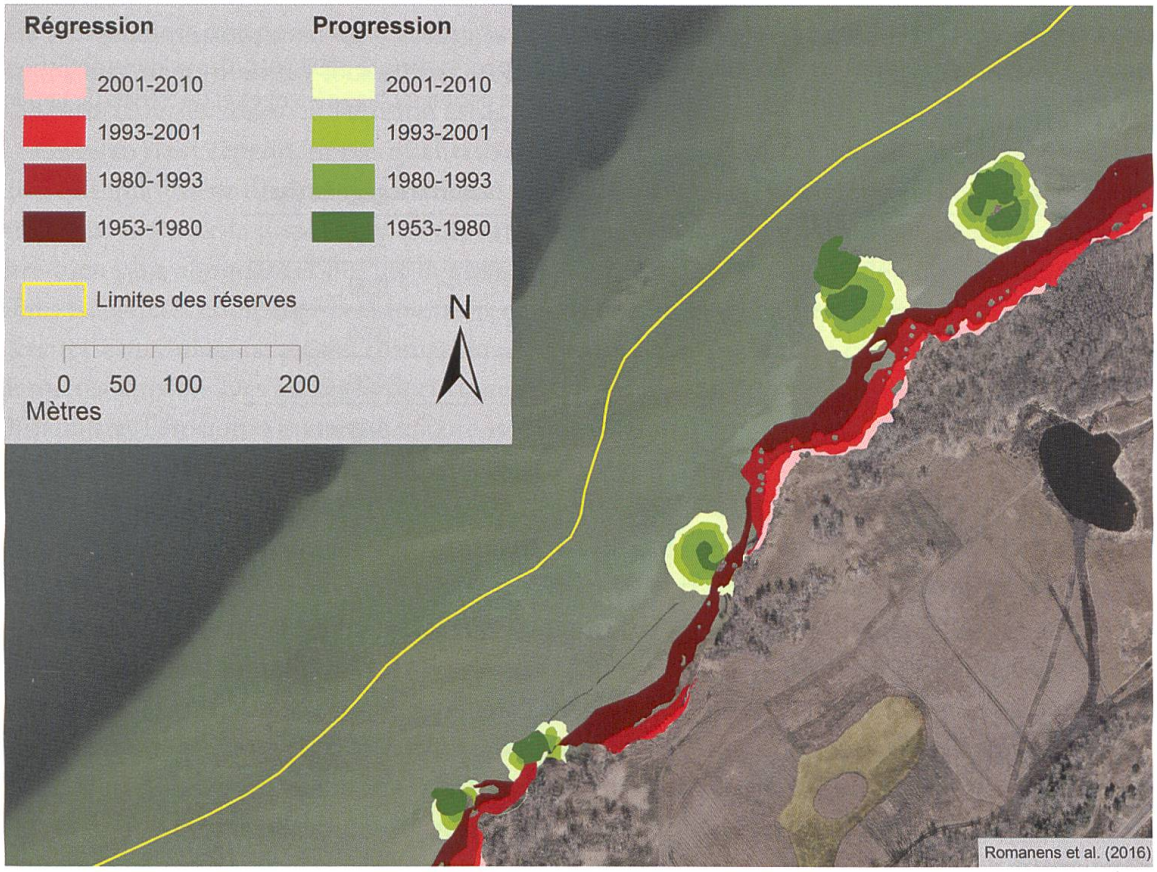



Figure 10. Évolution d'un segment de ligne de rive dans la réserve naturelle de Cheyres entre 1953 et 2010. Malgré une régression continue de la rive par érosion, les roselières lacustres progressent au large par colonisation centrifuge des roseaux. Mêmes couleurs que figure 5. Photographie aérienne reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA16078).

établies en 1993 (série 3) et 2010 (série 5 ; cf. tableau 1), cette progression se fait surtout par celle des roselières lacustres (*Phragmition*) sur le lac, avec la colonisation de nouvelles surfaces par les rhizomes des plantes déjà en place (tableau 4). Cette progression peut prendre la forme d'îles séparées du rivage principal, voire se développer en parallèle à une érosion continue, comme le montrent certains secteurs de la réserve naturelle de Cheyres (figure 10). Ces nouvelles surfaces ne remplacent cependant pas la diversité des surfaces perdues, l'érosion conduisant à la disparition de surfaces de roselière lacustre (*Phragmition*), mais aussi à celle de roselière terrestre (*Phalaridion*), de magnocariçaie (*Magnocaricion*), de formation à marisque (*Cladietum*) et de forêt. Par contre, ces roselières jouent un rôle important pour de nombreuses espèces animales, comme certains oiseaux nicheurs (locustelles, rousserolles, panure à moustaches, grèbe huppé), et la ponte de certains poissons (Delarze *et al.* 2015).

## Limites de la méthode

L'utilisation d'images aériennes, faites à un moment précis, est susceptible de biaiser les résultats. En effet, ces instantanés ne peuvent tenir compte de la variabilité entre mois ou entre années. La végétation des milieux retenus étant constituée essentiellement d'espèces pérennes, présentes toute l'année, la variabilité interannuelle et le degré de développement au moment

Tableau 4. Surfaces (ha) des types de végétation (selon Delarze *et al.*, 2015) gagnées ou perdues relativement aux *eaux calmes* dans les réserves naturelles de la Grande Cariçaie pour la période 1993-2010. Ces valeurs sont issues de deux cartes détaillées de la végétation établies sur la base de photographies aériennes et de relevés de terrain en 1993 et 2010.

| Milieu naturel | Surface perdue (ha) | Surface gagnée (ha) |
|---|---|---|
| *Forêts* | 4.46 | 1.05 |
| *Molinion* | 0.00 | 0.00 |
| *Caricion davallianae* | 0.03 | 0.00 |
| *Cladietum* | 0.28 | 0.00 |
| *Magnocaricion (sans Cladietum)* | 1.10 | 0.09 |
| *Phalaridion* | 3.03 | 1.19 |
| *Phragmition* | 3.82 | 21.93 |

où les images ont été prises ne devraient pas trop influencer le résultat. Par contre, le niveau du lac est susceptible de fausser les résultats : un lac bas dégage de plus grandes surfaces de sable. Comme les images de 1953 et 1954 ont été prises alors que le niveau du lac était particulièrement bas (tableau 1), une partie de la diminution des *rivages et lieux humides sans végétation* observée ensuite peut être attribuée au niveau du lac. Mais les photographies de 2010 et 2011 ont été faites avec un niveau du lac tout aussi bas, sans réapparition de ces surfaces de sable dépourvues de végétation. Cela montre qu'il y a bel et bien eu régression de ce milieu, soit par érosion, soit par colonisation par les roselières (*rivages et lieux humides avec végétation*).

Afin de mettre en évidence les tendances générales, mais non des fluctuations momentanées, nous avons exclu des analyses les rives qui ont montré un changement de direction entre les périodes considérées, c'est-à-dire une régression pendant certaines périodes et une progression à d'autres moments. De ce fait, les changements de tendance observés pour une même réserve naturelle (tableau 3, par ex. réserves de Cheyres ou des Grèves de la Motte qui montrent globalement une régression au début de la période considérée et une progression à la fin) correspondent à des régressions et progressions intervenant sur des secteurs différents. Cependant, les zones de rives qui ont passé d'une régression à une progression entre 1953 et 2010 sont peu nombreuses et leur exclusion ne modifie donc que peu l'image générale. Les annexes C1 à C11, qui illustrent la totalité des rives considérées, montrent que la plupart des surfaces naturelles ou semi-naturelles présentent soit une régression continue, soit une progression continue.

## Conclusion

Sur les près de 60 ans couverts par cette étude, ce sont 62.6 ha de rives marécageuses qui ont été perdus dans les réserves naturelles de la Grande Cariçaie, essentiellement entre 1953 et 1993, et 69.7 ha de rives marécageuses qui ont été gagnés, principalement par extension des roselières lacustres.

Dans un sens, ce bilan est quantitativement positif, montrant que les mesures prises durant les décennies passées (protection des rives contre l'érosion, épuration des eaux, interdiction

des phosphates) ont porté leurs fruits : la régression de la ligne de rive a été stoppée, ou a au moins fortement diminué localement, et de nouvelles surfaces de végétation marécageuse sont apparues dans les zones où l'érosion est la moins active.

Ce bilan n'est cependant pas qualitativement neutre. Les rives et lieux humides sans végétation ont quasiment disparu de la Grande Cariçaie. La période considérée ne couvre probablement que la fin de la disparition de ces surfaces nues et temporairement inondées qui devaient être bien plus abondantes durant la première moitié du XX^e^ siècle. Seule l'extension des roselières lacustres a compensé la disparition de plusieurs milieux naturels (roselière lacustre, roselière terrestre, magnocariçaie, formation à marisque, forêts de dunes côtières) au cours des 60 dernières années. Des cortèges floristiques particuliers ont donc été perdus et continuent de disparaître, l'érosion n'étant pas encore stoppée partout.

Ces pertes ne satisfont pas aux exigences du cadre légal en vigueur, particulièrement aux articles de l'Ordonnance sur la protection des bas-marais d'importance nationale, qui encouragent la gestion conservatoire de bas-marais tels que ceux qu'abritent les réserves naturelles de la Grande Cariçaie. À la nécessité de préserver les valeurs naturelles de ces rives marécageuses vient encore s'ajouter aujourd'hui celle d'en préserver le patrimoine archéologique, la Grande Cariçaie abritant plusieurs sites palafittiques préhistoriques inscrits en 2011 au patrimoine mondial de l'UNESCO.

La lutte contre ces pertes territoriales doit donc être poursuivie. Plusieurs moyens ont été envisagés et testés pour certains. La renégociation du règlement de régulation du lac de Neuchâtel en est un, rapidement confronté cependant à de multiples intérêts prépondérants en matière d'économie des eaux. Le remblayage de hauts-fonds riverains en est un autre, testé avec succès dans la réserve naturelle de Cheyres, mais aujourd'hui stoppé par les contraintes légales en matière de protection des eaux. Seule la lutte contre l'érosion, par l'aménagement d'infrastructures adaptées, semble pouvoir être planifiée et réalisée. À ce titre le plan de gestion des réserves naturelles de la Grande Cariçaie pour la période 2012-2023 propose une sélection de sites prioritaires, qui cumulent enjeux de protection de la nature et enjeux archéologiques, où cette lutte pourrait être poursuivie.

## Bibliographie


Antoniazza M. & Manuel F., 1991. La Grande Cariçaie. Les rives sauvages du lac de Neuchâtel. Editions 24 heures, Lausanne. 247 p.

Association de la Grande Cariçaie, 2015. Plan de gestion Période 2012 - 2023. Rapport interne non publié.

Benz V., 1998. Évolution chronologique d'un paysage riverain par interprétation cartographique. L'exemple de la région d'Estavayer-le-lac, de 1889 à 1993. Travail de Diplôme. Université de Fribourg, Institut de Géographie. 61 p.

Chervet A. & Huber A., 1990. Érosion de la rive sud du lac de Neuchâtel - Examen des causes - Prévision de l'évolution future - Recommandations sur les mesures à prendre. École polytechnique fédérale de Zürich, Laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques. Rapport 956/1 F. 61 p.

Delarze R., Gonseth Y., Eggenberg S. & Vust M., 2015. Guide des milieux naturels de Suisse. Écologie, menaces, espèces caractéristiques. 3^e^ édition. Rossolis, Bussigny. 435 p.

ECF-RSLN (2004). Lutte contre l'érosion sur la rive sud du lac de Neuchâtel. Bilan 1999-2004 du tronçon pilote de Cheseaux-Noréaz (VD). Résumé du rapport final de l'entreprise de correction fluviale. Lausanne.

Grünig A., 2007. Marais et marécages en mutation. *Hotspot* 15 : 4-5.

Klaus G., 2007. État et évolution des marais en Suisse. Résultats du suivi de la protection des marais. *État de l'environnement* n° 0730. OFEV, Berne. 97 p.

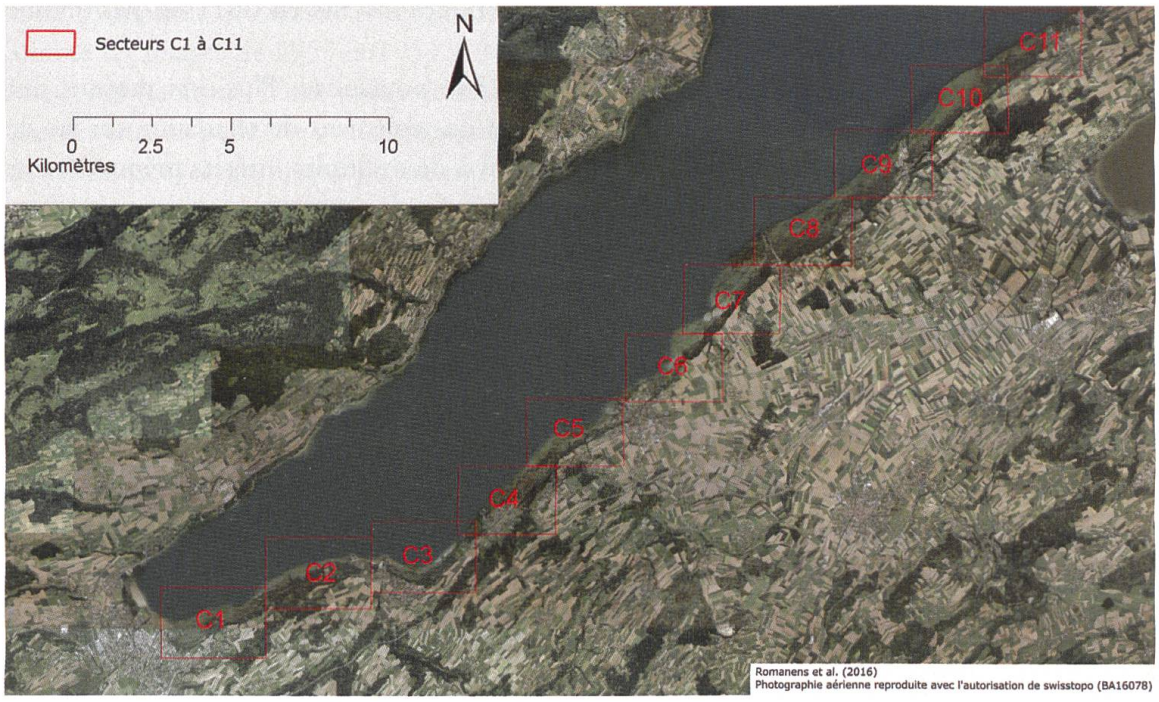
Nast M., 2006. Terre du lac. L'histoire de la correction des eaux du Jura. Verein Schlossmuseum Nidau, Nidau. 192 p.

Ostendorp W., 1993. Schilf als Lebensraum. *Beihefte zu den Veröffentlichungen für Naturschutz und Landschaftspflege in Baden-Würtenberg* 68 : 173-280.

Service de la statistique, Canton de Neuchâtel, 2016. Teneures en phosphore et en oxygène, lac de Neuchâtel : http://www.ne.ch/autorites/DEAS/STAT/domaines/Documents/2_3_1.xlsx (consulté 10.07.2016).

## Annexes

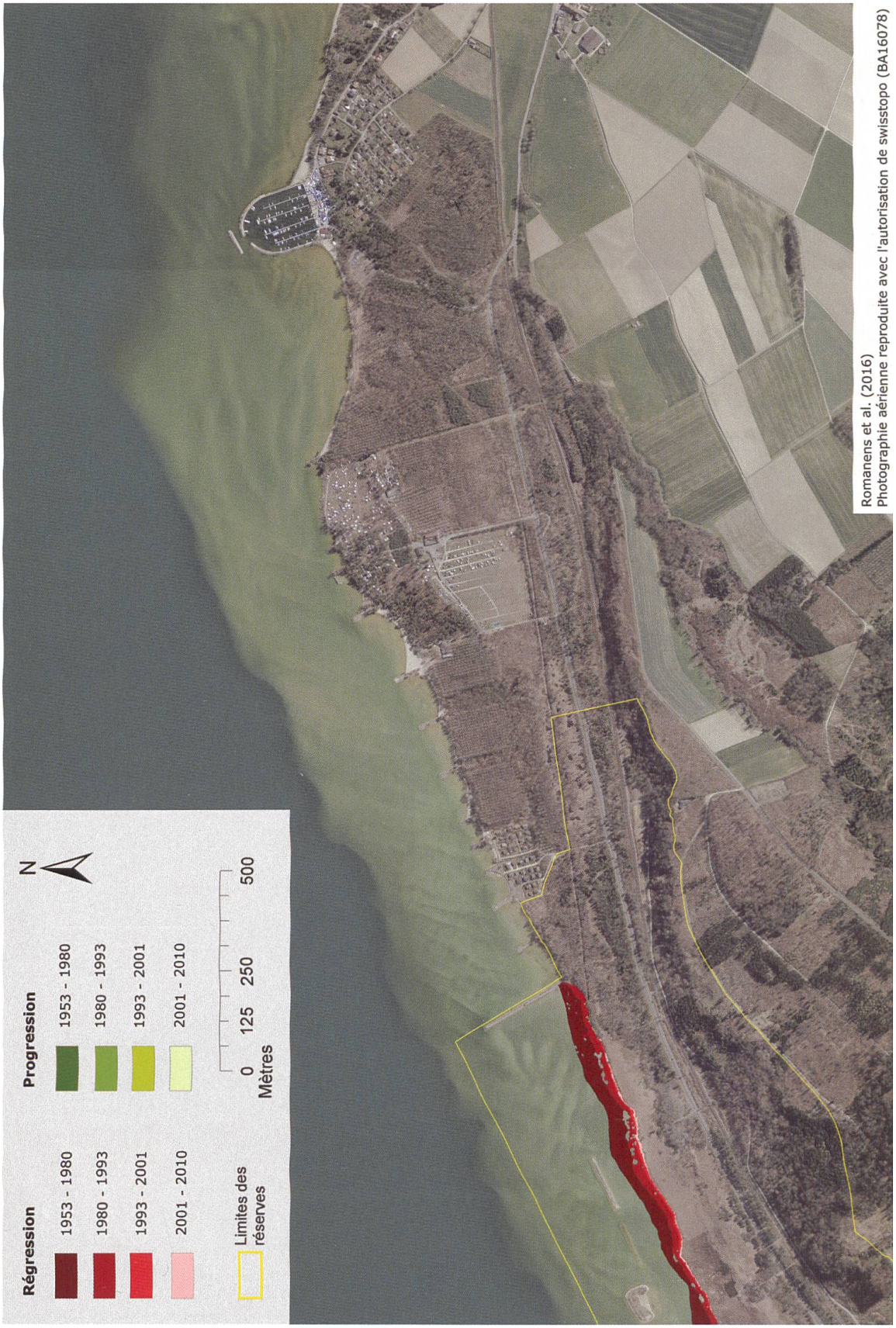
Les annexes C1 à C11 présentent, secteur par secteur de la rive sud du lac de Neuchâtel, les progressions (en vert) et les régressions (en rouge) de la ligne de rive entre 1953 et 2010 (voir explications des couleurs pour la figure 5). Les limites des réserves naturelles sont indiquées en jaune. Toutes les photographies aériennes sont reproduites avec l'autorisation de swisstopo (BA16078).




Découpage de la rive sud du lac de Neuchâtel en 11 cartes (C1 à C11).

Romanens et al. (2016)
Photographie aérienne reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA16078)

C1 : partie sud de la réserve naturelle des Grèves de Cheseaux.

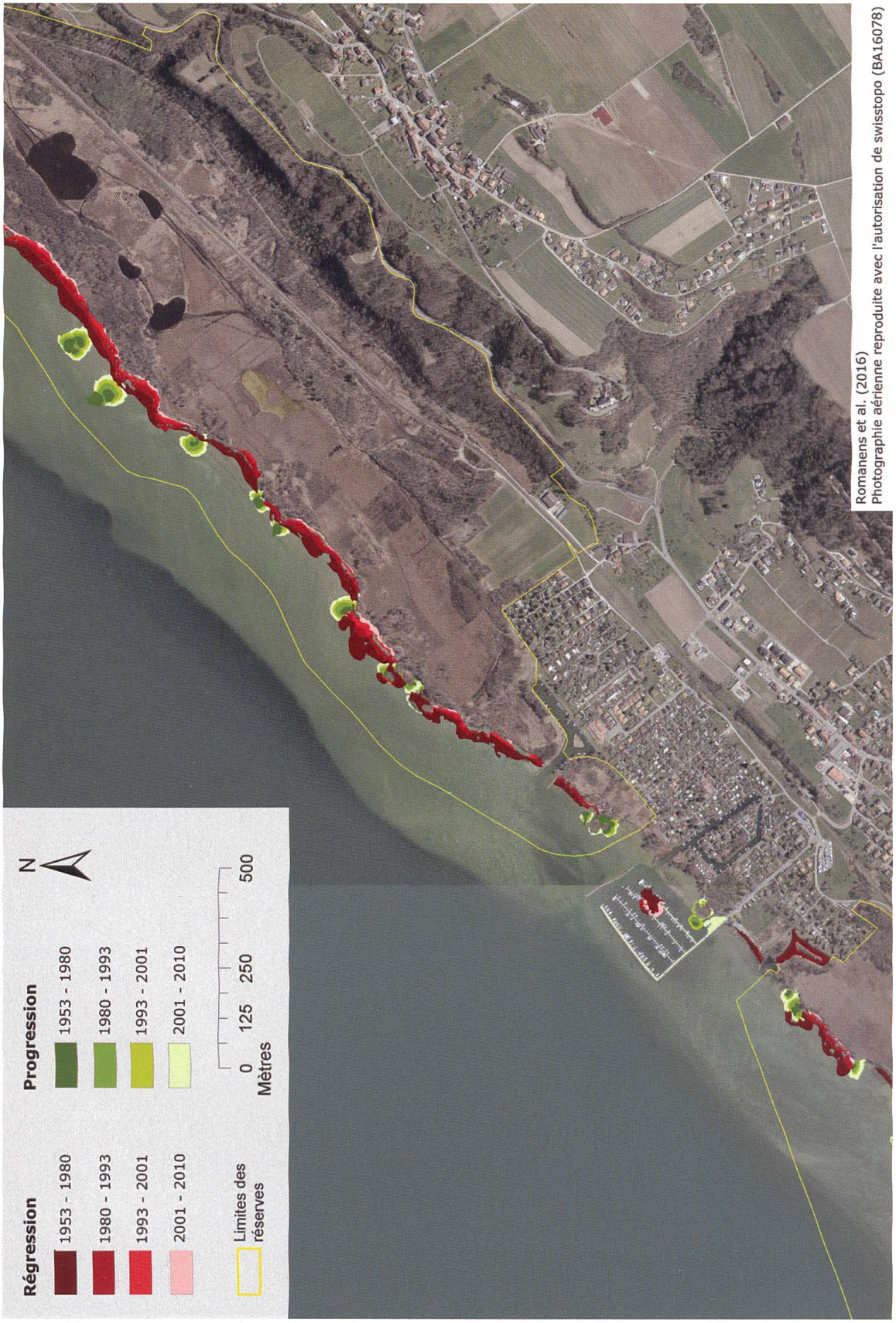



Romanens et al. (2016)
Photographie aérienne reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA16078)

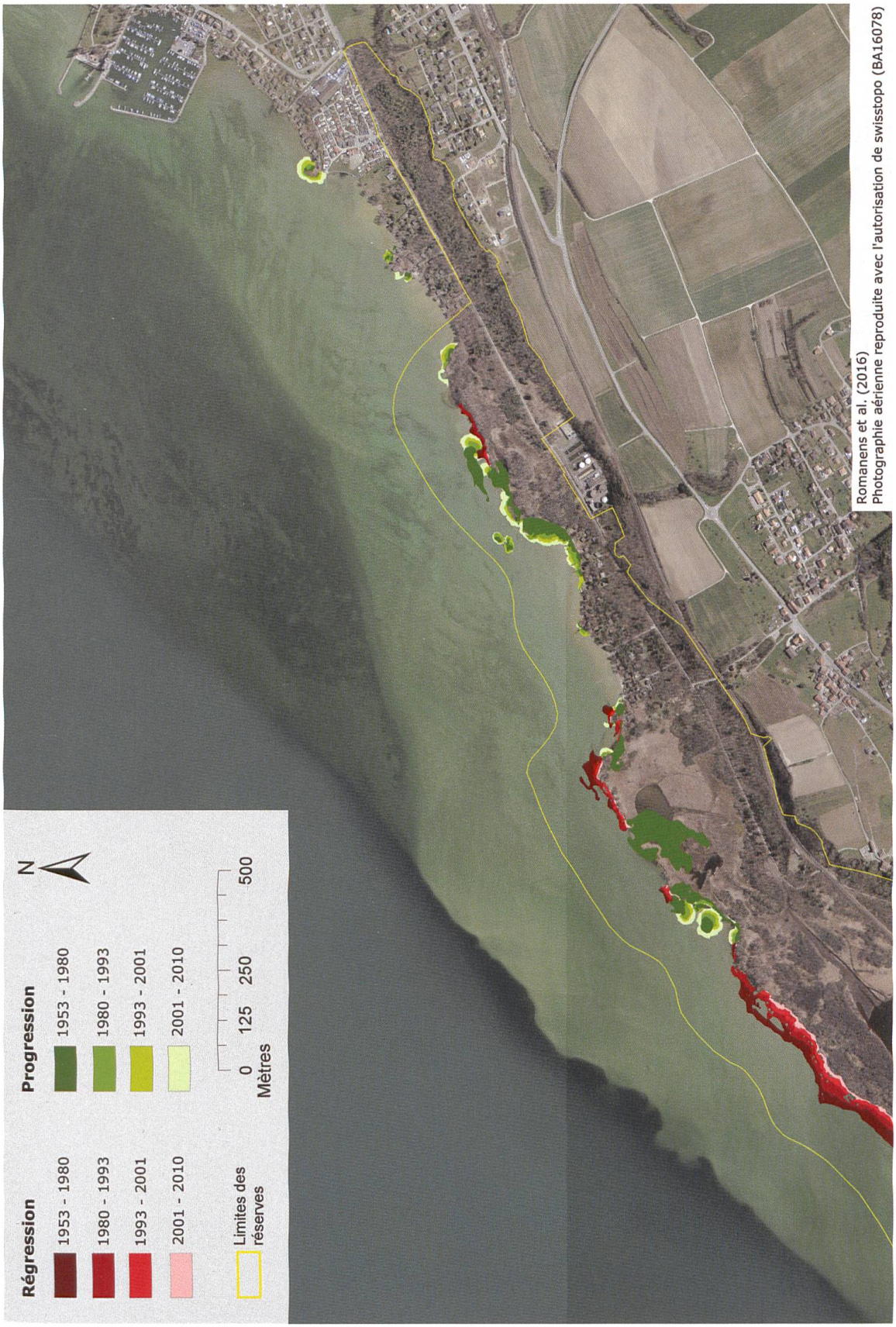
C2 : partie nord de la réserve naturelle des Grèves de Cheseaux.

Romanens et al. (2016)
Photographie aérienne reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA16078)

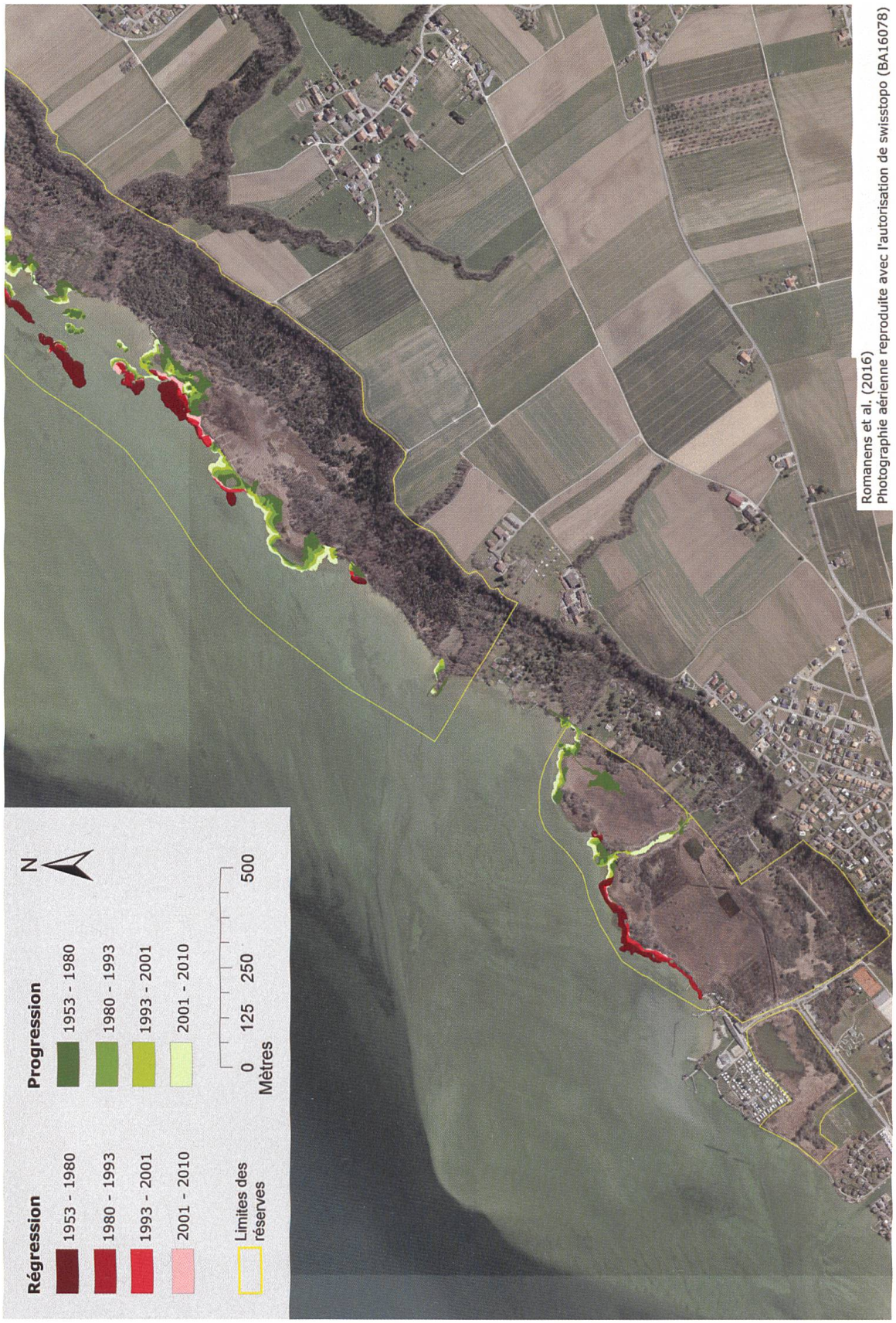
C3 : partie sud de la réserve naturelle de la Baie d'Yvonand.



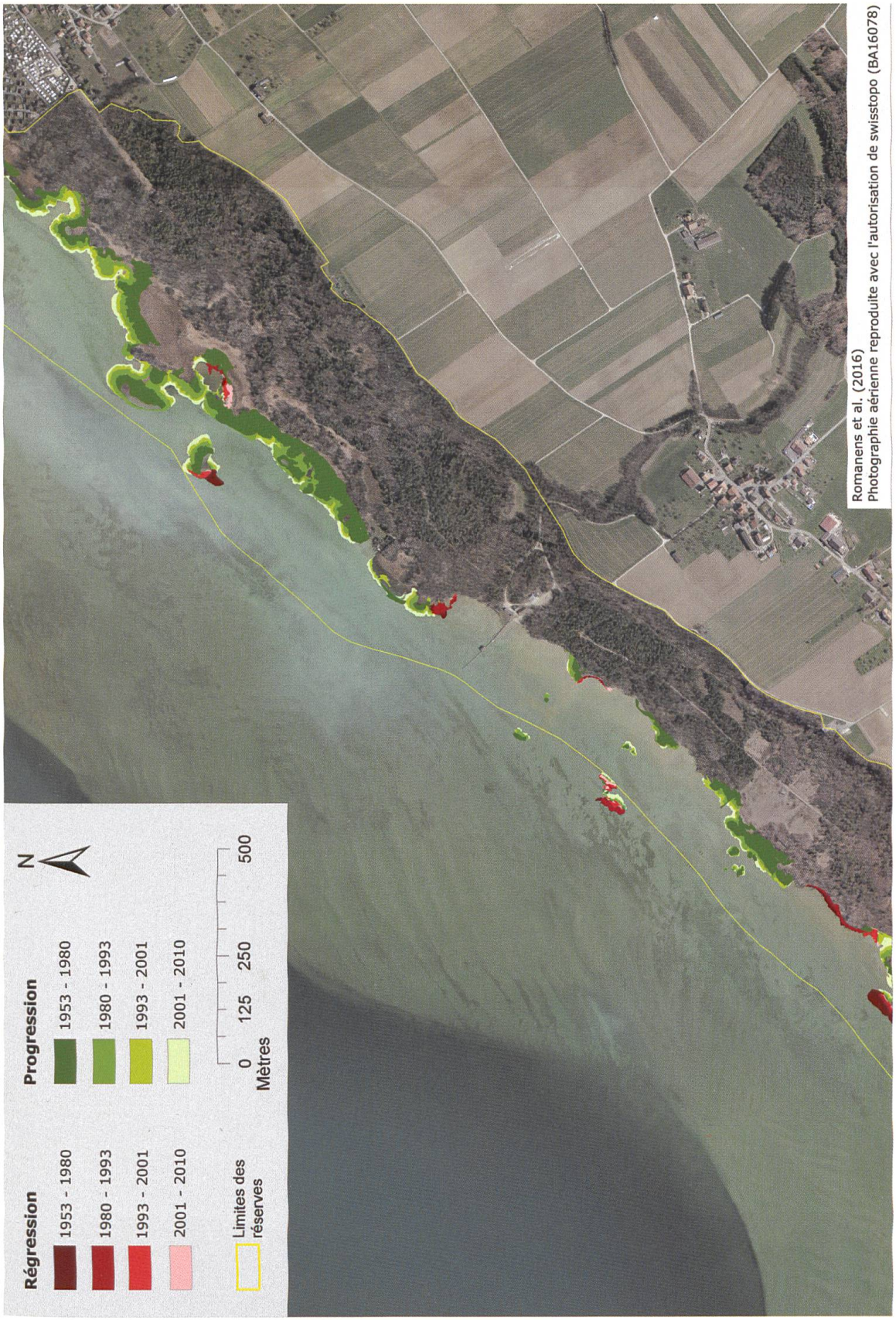

C4 : partie nord de la réserve naturelle de la Baie d'Yvonand, port de Cheyres et partie sud de la réserve de Cheyres.



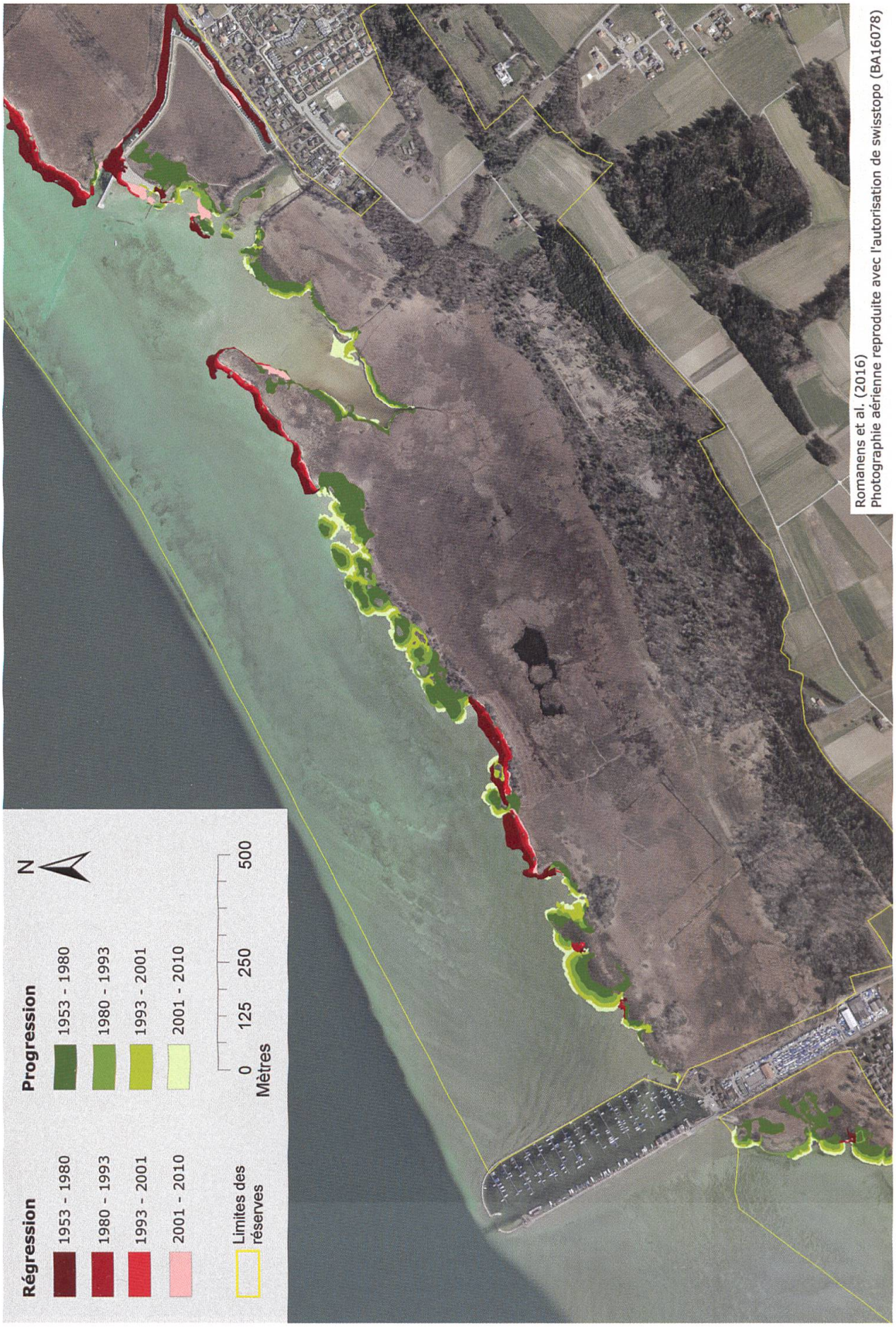

C5 : partie nord de la réserve naturelle de Cheyres et port d'Estavayer-le-Lac.



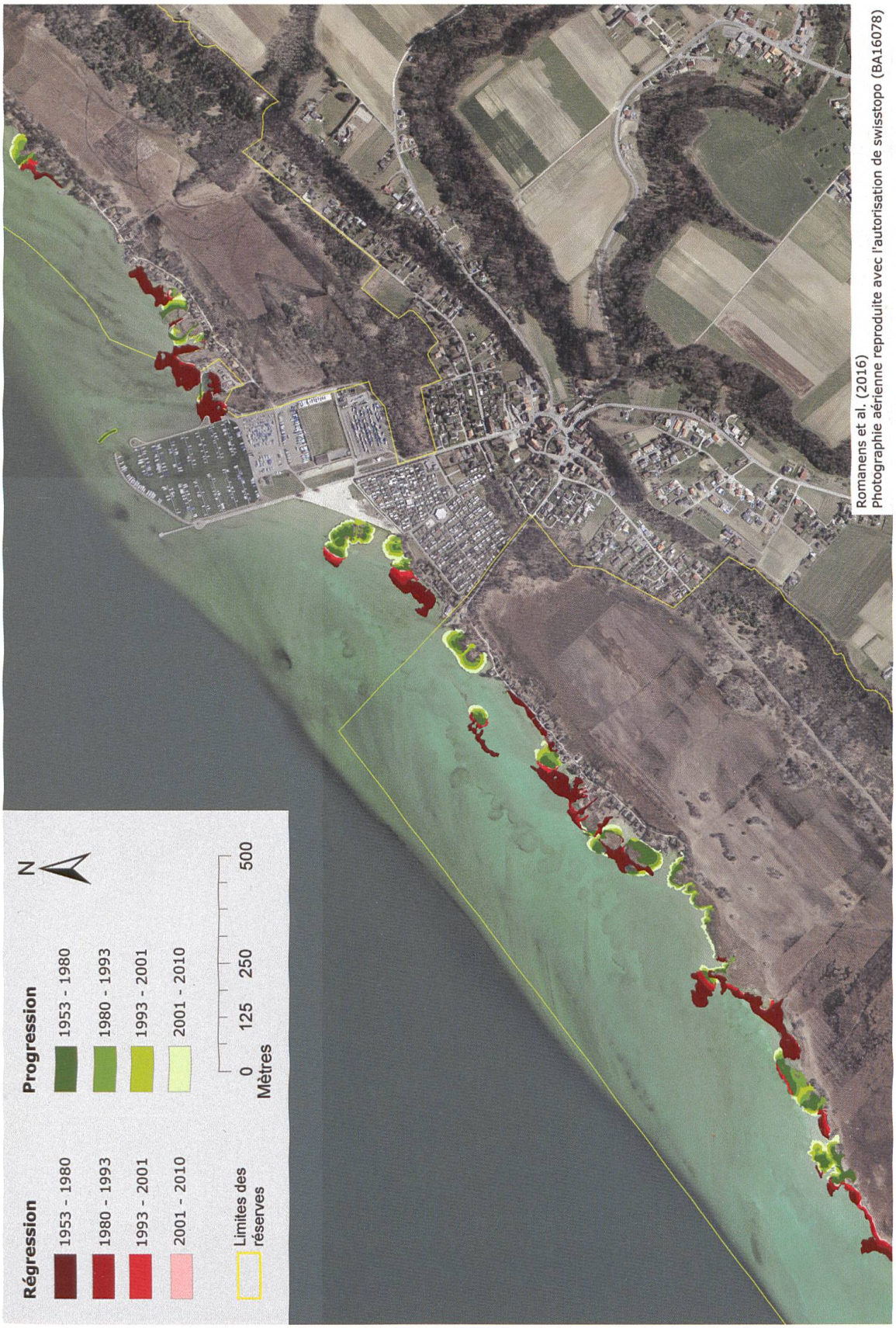

C6 : réserve naturelle des Grèves de la Corbière et partie sud de la réserve naturelle de Chevroux.




C7 : partie nord de la réserve naturelle de Chevroux.

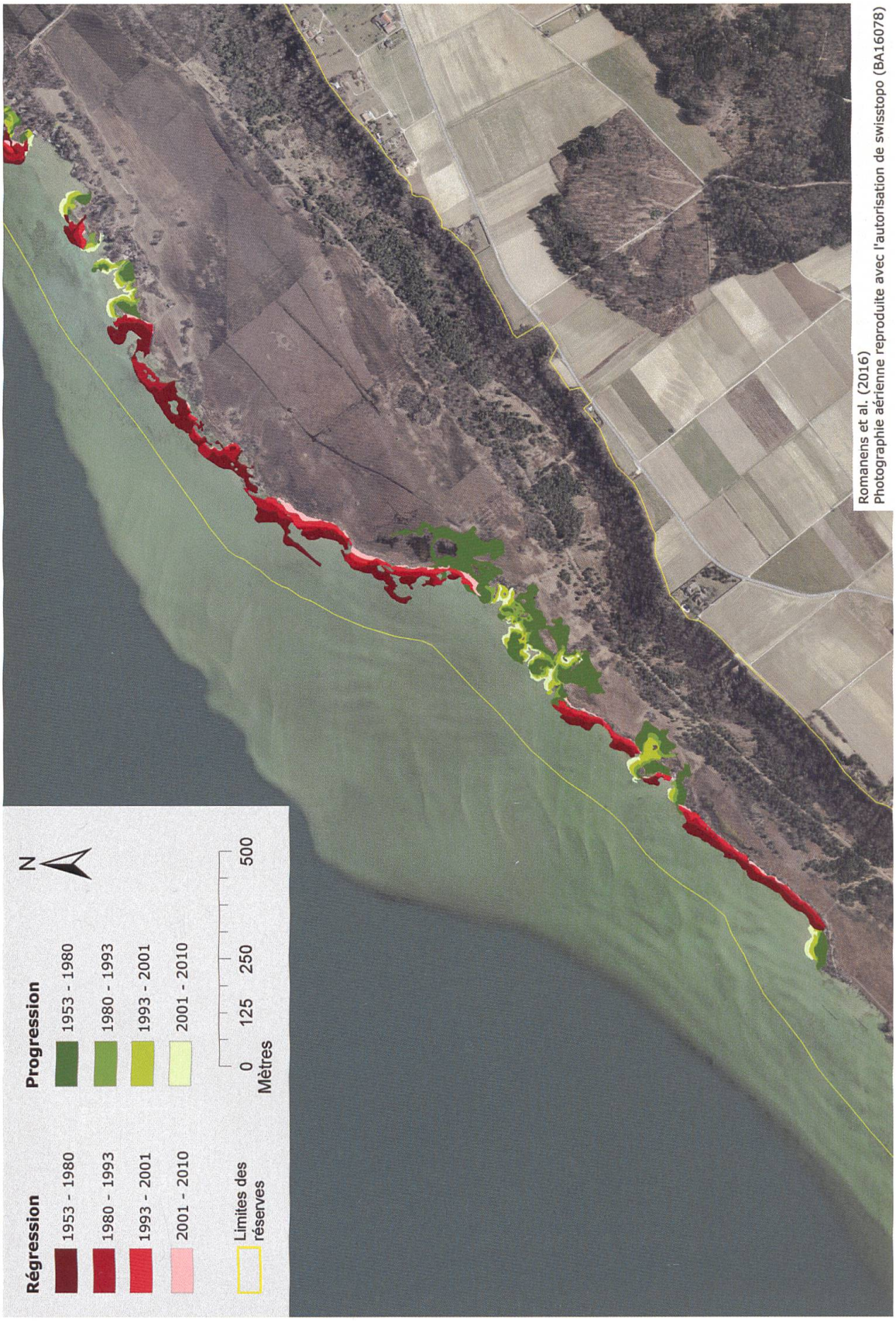



C8 : port de Chevroux et partie sud de la réserve naturelle des Grèves d'Ostende et de Chevroux.



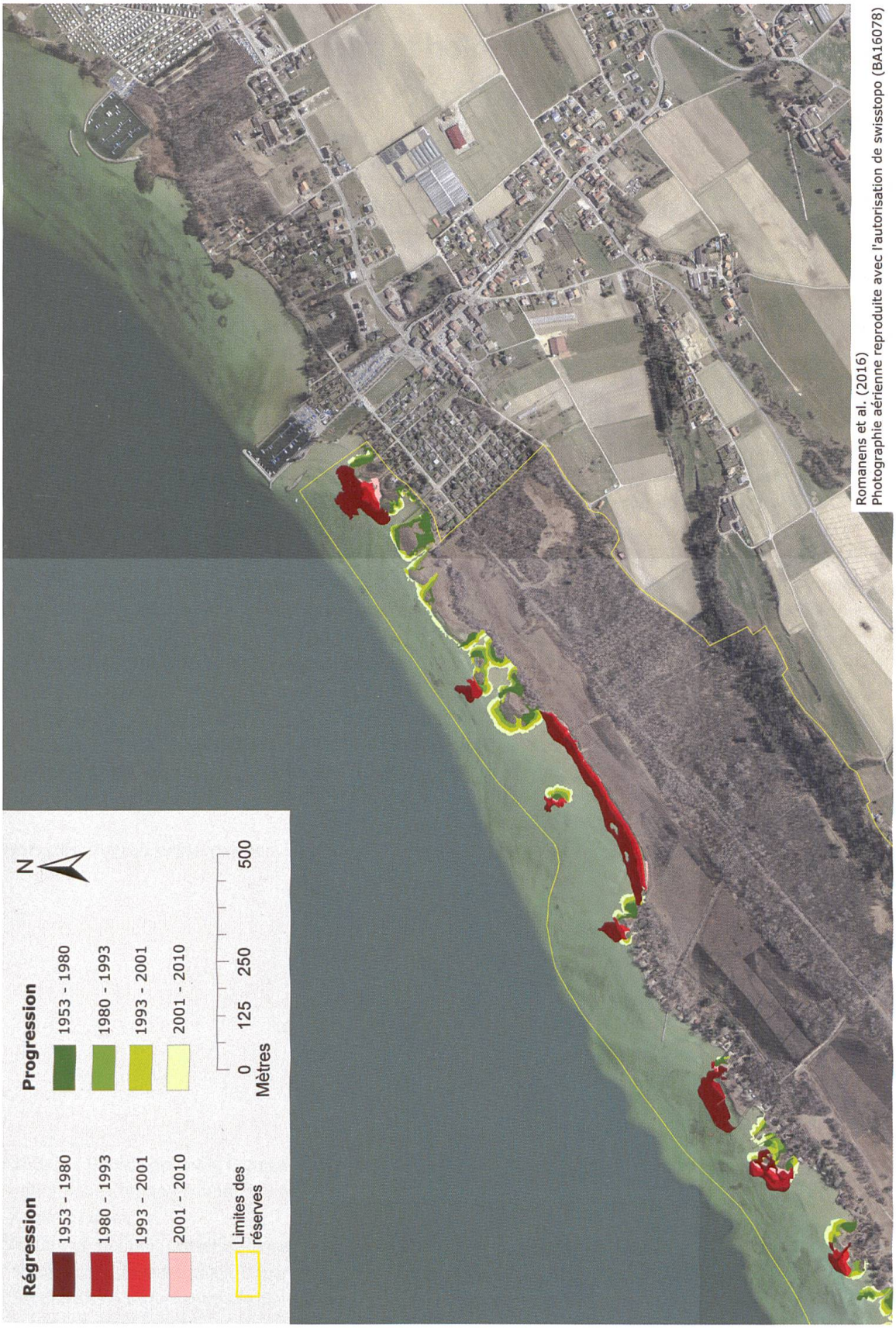

Romanens et al. (2016)
Photographie aérienne reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA16078)

C9 : partie nord de la réserve naturelle des Grèves d'Ostende et de Chevroux, Portalban et partie sud de la réserve naturelle des Grèves de la Motte.




Romanens et al. (2016)
Photographie aérienne reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA16078)

C10 : réserve naturelle des Grèves de la Motte.




Romanens et al. (2016)
Photographie aérienne reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA16078)

C11 : partie nord de la réserve naturelle des Grèves de la Motte et port de Cudrefin.