

Université de Strasbourg

Mémoire de Master 2 : Géographie, Aménagement, Environnement et Développement (GAED)

Parcours : Fonctionnement et gestion des environnements ruraux et naturels (FERN)

Trajectoires et histoire paysagère sur 67 ans de Fessenheim, un socio-écosystème en transformation : stratégies pour optimiser les transitions d'après-nucléaire



Réalisé sous la direction de Mme. Cybill Staentzel

Co-encadrant : M. Pierre-Alexis Herrault

Par Nathan Ehrstein

Organisme d'accueil : Laboratoire Image Ville Environnement (L.I.V.E – UMR 7362)

Membres du jury :

24 août 2020

Dominique Schwartz (responsable de parcours)

Cybill Staentzel (tutrice de stage)

Pierre-Alexis Herrault (examineur)

Université de Strasbourg

Faculté de Géographie et d'Aménagement

2020

Trajectoires et histoire paysagère sur 67 ans de Fessenheim, un socio-écosystème en transformation : stratégies pour optimiser les transitions d'après-nucléaire

Nathan Ehrstein

Avant-propos / Remerciements

Le présent mémoire de stage s'inscrit dans le cadre de la validation du Master 2 Géographie, Aménagement, Environnement, Développement (GAED) parcours Fonctionnement des Environnements Ruraux et Naturels (FERN) de la faculté de Géographie et d'Aménagement de l'Université de Strasbourg. Après 5 ans passés à étudier la biologie, l'écologie et la gestion des milieux naturels, mon intérêt s'est porté sur la géographie environnementale. Cette formation m'a permis, d'une part d'acquérir de nouvelles connaissances, qui plus est, en totale adéquation avec mon parcours passé, mais aussi d'obtenir une vision plus large et une plus grande ouverture d'esprit, qualités essentielles dans un monde en constant changement et en constante évolution.

Le stage et le présent mémoire qui en découle ont été réalisés au sein du Laboratoire, Ville, Image, Environnement, unité mixte de recherche (UMR) du CNRS et de l'Université de Strasbourg, pour le projet de recherche interdisciplinaire **Juxta Rhenum** dans le cadre de l'Observatoire Hommes-Milieus (OHM) de Fessenheim. Il s'est déroulé sur un période de 6 mois entre janvier et juillet 2020.

Bien que la réalisation de ce stage et du présent mémoire aient été rendus difficiles par une situation inédite que nous vivons toutes et tous actuellement, l'épidémie de Covid-19 n'a pas eu raison de mon travail et de mon envie d'avancer. Le stage a tout de même dû être modifié et adapté à la situation. Une phase de terrain, prévue sur la commune de Fessenheim afin de traiter des questions de naturalité, n'a pu être réalisée en raison du confinement rendant tous les déplacements impossibles et interdits.

Je tiens à remercier profondément ma directrice de stage, **Cybil Staentzel**, professeur et chercheur à la faculté de géographie et à l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES), pour sa confiance, sa bienveillance, son accompagnement et son aide précieuse qui m'ont permis d'adapter mon travail en fonction du nombre important d'aléas inhérents à cette période de confinement et de pandémie.

Je tiens à remercier, **Pierre-Alexis Herrault**, professeur à la faculté de géographie de Strasbourg et co-encadrant de mon stage pour son aide technique et cruciale, ainsi que l'ensemble des idées qu'il a pu apporter. Merci à **Grzegorz Skupinski**, ingénieur de recherche au Laboratoire, Image, Ville, Environnement (L.I.V.E) pour son aide dans la recherche de données géographiques et son aide technique concernant les logiciels de SIG et de télédétections.

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour leur soutien et pour avoir cru en moi tout au long de mes études et plus particulièrement mon frère **Hugo Ehrstein** pour son savoir et son aide apportés à la réalisation d'une application dans le cadre du présent stage. Merci, à mes collègues stagiaires de la salle 301, pour les nombreuses entraides et pour la bonne ambiance que nous avons su mettre en place dès le début de nos stages.

Table des matières:

Avant-propos / Remerciements.....	4
Table des figures	7
Table des tableaux	8
Liste des abréviations :.....	9
Introduction :	11
Chapitre I : Etat de l'art.....	14
1.1. Le paysage, une résultante de l'expression de la biodiversité au travers des usages.....	14
1.1.1. L'étude des paysages : portées et définitions.....	14
1.1.2. Caractériser le paysage et son évolution par l'occupation et l'usage du sol.....	15
1.1.3. Quantifier le changement et les transitions paysagères	17
1.2. La notion de socio-écosystèmes	23
1.2.1. Emergence et définitions	23
1.2.2. Fessenheim et ses territoires (Alsace, France) : un système socio-écologique en transformation.....	24
1.3. Objectifs du mémoire et de l'étude associée	26
Chapitre II : Matériels et Méthodes.....	28
2.1 Etude de la dynamique des paysages	28
2.1.1 Détermination des bornes spatiales et temporelles.....	28
2.1.2 Etapes de digitalisation, typologie et rasterisation	31
2.1.3 Méthodes pour l'étude de la nature des transitions et des dynamiques de changement d'occupation et d'usage des sols.	35
2.1.2. Premiers tests pour le développement d'un outil automatisé visant l'étude des dynamiques et trajectoires évolutives d'un socio-écosystème	40
2.2 Etude de la part de naturalité du socio-écosystème	44
2.2.1 Approche générale : le socio-écosystème	44
2.2.2 Approche ciblée : l'île du Rhin, au droit de la centrale	45
2.3. Trajectoires sociologiques et démographiques mises en regard des dynamiques et indices paysagers	50
2.3.1 Trajectoire démographique	50
2.3.2 Trajectoire sociologique.....	51
Chapitre III : Résultats	53
3.1. Dynamique des paysages et des usages sur le territoire de Fessenheim.....	53

3.1.1 Analyses paysagères de 1951 à 2018.....	53
3.1.2 Analyse quantitative fine des dynamiques et des transitions paysagères	61
3.1.3 Evolution des métriques spatiales	72
3.2 Part de naturalité du socio-écosystème étudié	73
3.2.1 Représentation des classes d'occupation biogènes	73
3.2.2 Profil des communautés végétales de l'île du Rhin	74
3.3 Trajectoires sociologiques et démographiques mises en regard des dynamiques et métriques spatiales	79
3.3.1 Trajectoire démographique et surfaces des classes d'habitats continus et discontinus depuis 1951	79
3.3.2 Trajectoires sociologiques.....	81
Chapitre IV : Discussion, limites et perspectives	84
4.1. Fessenheim : un système socio-écologique en transformation	84
4.2 L'après-nucléaire : quelles options pour la transition écologique ?	86
Conclusion :.....	92
Bibliographie :	95
Annexe 1 :	101
Résumé :	103
Abstract:.....	104

Table des figures

Figure 1: Schéma du processus de photo-interprétation dans le cadre de la cartographie d'occupation et d'usage des sols. (1) analyse de l'image satellitaire, ou de la photographie aérienne, (2) digitalisation des zones homogènes et des éléments paysagers.....	18
Figure 2: Schéma représentant les classifications par apprentissage supervisé et non supervisé (Pelletier 2017).	19
Figure 3: Représentation schématique du concept de matrice de transition	22
Figure 4: Délimitation de la zone d'étude du socio-écosystème de Fessenheim. (a) territoire français, (b) département du Haut-Rhin, (c) zone d'étude : (1) commune de Fessenheim (2) CNPE (3) GCA (4) centrale hydroélectrique (5) Ile du Rhin (6) Rhin.....	29
Figure 5: Comparaison des orthophotographies de 1951 (a) et 1956 (b)	31
Figure 6: Extrait de la table attributaire du raster combiné pour la transition 2011-2018 - (Rowid et Value correspondent à l'identifiant de la transition ; la colonne Count correspond au nombre de pixels, ici une surface m2, ayant subi une transition ; les colonnes 2011 et 2018 identifient la transition entre deux classes d'occupation et d'usage des sols).....	36
Figure 7: Schéma illustrant la représentation graphique d'une transition entre deux dates (2007-2011) 37	
Figure 8: Capture d'écran de l'interface d'importation et de vérification de la résolution et du SRC de l'outil EcoChange	41
Figure 9: Capture d'écran de l'interface des résultats et de leurs d'exportations	42
Figure 10: Capture d'écran de l'interface graphiques récapitulatifs des résultats pour chacun des deux rasters	42
Figure 11: Capture d'écran de l'interface de visualisation des rasters d'entrées et du raster de changements d'états de l'outil EcoChange.....	43
Figure 12: Délimitation de la zone d'étude dans le cadre de l'études des communautés végétales.	46
Figure 13: Occupation du sol en 1951	54
Figure 14: Occupation du sol en 1956, (1) Cité Koechlin (2) Citée temporaire (3) Centrale hydroélectrique de Fessenheim (4) Bassins de décantation de saumure.....	56
Figure 15: Occupation du sol en 1997 (1) CNPE de Fessenheim.	57
Figure 16: Occupation du sol en 2007, (1) Zone d'Activités Koechlin	58
Figure 17: Occupation du sol en 2011	59
Figure 18: Occupation du sol en 2018	60
Figure 19: Localisation des changements d'occupation du sol pour la transition 1951 et 1956.	62
Figure 20: Diagramme de flux pour la transition 1951-1956.....	63
Figure 21: Localisation des changements d'occupation du sol entre la transition 1956-1997.	64
Figure 22: Diagramme de flux pour la transition 1956-1997.....	65
Figure 23: Localisation des changements d'occupation du sol entre la transition 1997-2007.	66
Figure 24: Diagramme de flux pour la transition 1997- 2007.....	67
Figure 25: Localisation des changements d'occupation du sol entre la transition 2007-2011.	68
Figure 26: Diagramme de flux entre 2007 et 2011.....	69
Figure 27: Localisation des changements d'occupation du sol entre la transition 2011-2018.	70
Figure 28: Diagramme de flux entre 2011-2018.....	71

Figure 29: Evolution des métriques spatiales de 1951 à 2018 - PCI : Pixel Change Index, en %; ZCI : Zonal Change Index, en %.....	72
Figure 30: Représentativité des classes biogènes versus non biogènes pour chaque date d'étude, de 1951 à 2018 (Biogène : Végétation arborescente et herbacées, ripisylves, cours d'eau principal, Non biogène : autres classes)	73
Figure 31: Boîtes à moustaches des moyennes des indicateurs lumière, pH du sol et texture du sol pour les 82 relevés de végétation.	76
Figure 32: Boîte à moustache de la moyenne de l'indicateur température pour les 82 relevés de végétation.	77
Figure 33: Boîtes à moustaches des moyennes des indicateurs humidité édaphique, hémérobie et niveau trophique pour les 82 relevés de végétation.....	78
Figure 34: Evolution de la population de la commune de Fessenheim entre 1951 et 2018 (source : base de données Cassini de l'EHESS et INSEE) ainsi que les surfaces en ha des classes habitats continus et discontinus.....	80
Figure 35: Evolution de la population active (25-54 ans) selon la catégorie socioprofessionnelle, de 1968 à 2016 pour la commune de Fessenheim (source : base de données INSEE)	81
Figure 36: Prévisualisation de l'occupation du sol suite au scénario post-nucléaire (2035).....	87

Table des tableaux

Tableau 1: Dates de prise de vues des orthophotographies, leurs sources, leurs résolutions et leurs types de données.....	30
Tableau 2: Typologie, nomenclature et classes d'occupation et d'usage du sol	32
Tableau 3: Résultat du test de rastérisation à 0,5 m, 1 m et 2 m	34
Tableau 4: Différenciation des classes d'origines anthropiques et des classes biogènes	44
Tableau 5: Tableau des traits fonctionnels sélectionnés et leurs coefficients associés	48
Tableau 6: Evolution de 1951 à 2018 des surfaces en ha pour l'ensembles des classes d'occupation et d'usage des sols	53
Tableau 7: Statistiques descriptives de la richesse floristique par relevé de végétation	74
Tableau 8: Les quinze espèces végétales les plus fréquentes dans les 82 relevés de végétation réalisé sur l'Île du Rhin, ainsi que leurs indicateurs associés.	75
Tableau 9: Influences potentielles des projets portés à connaissance sur les trajectoires démographique et sociologique pour les phases de démantèlement et post-démantèlement (où, -- signifie une influence potentiellement fortement négative, + signifie une influence potentiellement positive).....	88

Liste des abréviations :

AVHRR: Advanced Very High-Resolution Radiometer

BDOCS : Base de Données d'Occupation des Sols

BETA : Bureau d'Economie Théorique et Appliquée

CA : Conseil d'administration

CCPRB : Communauté de Communes Pays Rhin-Brisach

CIGAL : Coopération pour l'information Géographique en Alsace

CLC : Corine Land Cover

CNPE : Centre Nucléaire de Production d'Electricité

CNRS : Centre National de la recherche scientifique

CSA : Conservatoire des Sites Alsaciens

EDF : Electricité de France

EHESS : Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales

GCA : Grand Canal d'Alsace

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

INEE : Institut d'Ecologie et d'Environnement

INSEE : Institut National de la Statistique et des Études Économiques

L.I.V.E : Laboratoire Image Ville, Environnement

LC : Land Cover, occupation du sol

LCS : Land Change Science, science du changement d'occupation et d'usage du sol

LU : Land Use, utilisation des sols

LULC : Land Us Land Cover, occupation et usage des sols

MODIS : Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

OHM : Observatoires Hommes-Milieus

PCI : Pixel Change Index

pK : point kilométrique

SES : socio -écosystème

SPOT : Système probatoire d'observation de la Terre

TMM : Transition Matrix Model, matrice de transition

WMS : Web Map Service

ZA : Zone d'Activité

ZCI : Zonal Change Index

Introduction :

Depuis la révolution industrielle, les sociétés occidentales reposent essentiellement leurs développements et leurs croissances sur la consommation d'énergies fossiles et non renouvelables, source forte d'émissions de gaz à effets de serre qui sont à l'origine du réchauffement climatique global. Le réchauffement climatique dont les conséquences multiples ne sont plus à démontrer est un enjeu actuel majeur pour nos sociétés et nous questionne sur nos capacités d'adaptation et à savoir comment l'atténuer et réduire ses nombreux impacts.

Dans ce contexte et dans celui d'une crise environnementale globale s'amplifiant toujours, la transition énergétique, la transition vers une société se basant sur des sources d'énergies renouvelables (solaire, éolien, géothermie, hydraulique), apparaît comme inévitable. Cette transition énergétique s'inscrit dans une transition écologique englobante qui vise à une évolution progressive vers un nouveau modèle énergétique, économique et social basé sur celui du développement durable et celle de la croissance verte afin de répondre aux grands enjeux environnementaux actuels et de demain, ceux du changement climatique, de la raréfaction des ressources, de la perte accélérée de la biodiversité et de la multiplication des risques sanitaires environnementaux.

En France, les objectifs en termes de transition énergétique et écologique ont été matérialisés au sein de la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte. Dans le cadre de ce texte de loi, l'Etat français ambitionne de réduire à 50% la part du nucléaire dans la production d'électricité sur son territoire. Premier pas en ce sens, le 20 juin 2020 marque l'arrêt définitif, après 43 ans d'exploitation, du second et dernier réacteur de la plus ancienne des centrales nucléaires françaises, le Centre Nucléaire de Production Électrique (CNPE) de Fessenheim (Haut-Rhin) situé en bordure du Grand Canal d'Alsace. Dans ce contexte, la compréhension de ces espaces en transformation est majeure pour développer des stratégies transposables et optimiser ainsi la transition écologique et énergétique de nos territoires.

L'avenir de Fessenheim et ses territoires constitue le cœur du projet d'étude pluridisciplinaire Juxta Rhenum et du 13ième Observatoire Hommes-Milieus (OHM).

L'objectif est de suivre, comprendre, anticiper et accompagner l'évolution du socio-écosystème de Fessenheim intégrant la fermeture du CNPE. Il s'agit également d'analyser et de comprendre quels ont pu être les influences et les impacts de sa construction dans les années 1970 et son exploitation pour mieux y appréhender l'après nucléaire. Le présent mémoire et l'étude associée s'inscrivent dans cette démarche et visent à identifier (i) les conséquences de la construction et l'exploitation du CNPE sur le socio-écosystème de Fessenheim et sur ses trajectoires paysagères, naturelles et socio-démographiques, (ii) caractériser les sources du changement au sein du socio-écosystème, et (iii) évaluer la part de naturalité du système, notamment le degré de patrimonialité des composantes naturelles et semi-naturelles. Ainsi, une étude rétrospective et approfondie de la dynamique des paysages et des usages sur plus de 67 ans a été menée sur le socio-écosystème de Fessenheim et ses territoires. Celle-ci a permis de caractériser et de reconstruire les trajectoires (i) paysagères, (ii) naturelles et (iii) socio-démographiques historiques du socio-écosystème pour en déterminer, mesurer et localiser les potentielles influences et conséquences de la construction et de l'exploitation du CNPE et des grands ouvrages anthropiques de la zone.

Dans ce mémoire, le contexte thématique, méthodologique, contextuel et opérationnel nécessaire à sa compréhension a été précisé dans un **chapitre I**. La méthodologie utilisée et celle développée pour réaliser l'étude seront décrites et explicitées dans un **chapitre II** et les résultats en découlant y seront présentés dans un **chapitre III**. Pour finir, les résultats, les limites et les perspectives d'évolution et d'études complémentaires seront ensuite discutés dans un **chapitre IV**.

Chapitre I : *Etat de l'art*

Chapitre I : Etat de l'art

1.1. Le paysage, une résultante de l'expression de la biodiversité au travers des usages

1.1.1. L'étude des paysages : portées et définitions

Le rythme, l'ampleur et la portée spatiale des altérations anthropiques de la surface terrestre sont sans précédent (Lambin et al. 2001). Les forces naturelles, géophysiques, autrefois seules sources d'altérations, de dynamismes et de changements au sein de la biosphère, ne le sont plus. Les activités humaines et les perturbations qu'elles engendrent sont devenues la source majeure des changements environnementaux globaux et marquent notre entrée dans l'Anthropocène (Harden et al. 2014). L'action de l'homme à travers le développement et l'intensification de l'agriculture ou l'étalement urbain façonne et altère, de manière continue, les paysages terrestres et aquatiques (Plieninger et al. 2016) et *de facto* les services écosystémiques qui leur sont attribués (Millennium Ecosystem Assessment, 2005 ; Vitousek et al. 1997). L'étude des paysages, de leurs composantes et de leurs évolutions passées, présentes et futures est essentielle. Elle nous renseigne non seulement sur leurs dynamiques naturelles qui sont à l'origine de leurs formes actuelles mais également sur les impacts et les influences de l'homme (D. Liu et al. 2018).

Selon George Bertrand, "le paysage est à la fois social et naturel, subjectif et objectif, spatial et temporel, production matérielle et culturelle, réel et symbolique. Le paysage est un système qui chevauche le naturel et le social. Il est une interprétation sociale de la nature." (Bertrand 1978). La Convention Européenne du Paysage en 2000, elle, désigne le paysage comme une « partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations ». L'ensemble de ces deux définitions souligne le fait que les paysages ne sont aucunement fixes mais évoluent dans une composante spatiale et une

composante temporelle et sont la résultante d'une part des actions anthropiques, sociales et des facteurs et processus naturels et d'autre part de leurs interactions.

1.1.2. Caractériser le paysage et son évolution par l'occupation et l'usage du sol

Pour le géographe, la caractérisation d'un paysage, dans sa spatialité et dans sa temporalité, peut être faite d'après une vue zénithale, "du dessus". Cette approche a l'avantage de permettre l'observation et la détermination de sa structuration horizontale et la caractérisation des différents éléments qui composent sa matrice (Sahraoui 2016). Une des interprétations possibles de la structure d'un paysage est l'occupation et l'usage des sols qui le compose. Dans ce cadre-là il est fondamental d'évoquer la distinction sémantique entre "occupation du sol (*Land Cover, LU* en langue anglaise)" et "utilisation du sol (*Land Use, LU*)". L'occupation du sol décrit la nature biophysique de la surface du sol (type de couvert végétal, réseau hydrographique, sol nu) tandis que l'utilisation des sols en décrit l'usage et les pratiques qu'en font les hommes (Turner et Meyer 1994). L'étude conjointe de l'occupation et de l'usage du sol, est donc fondamentale. Elle offre au géographe l'interprétation du paysage dans sa nature biophysique mais aussi dans son rapport à l'homme, d'un point de vue social et sociétal, à travers l'usage anthropique qu'en est fait de son sol et permet donc d'appréhender les divers processus le structurant, qu'ils soient naturels ou d'origines anthropiques.

Dans le contexte de l'étude de l'évolution spatiale et temporelle des paysages, la transition paysagère peut être définie par un changement fondamental et sur le long terme de l'occupation et l'usage du sol (*LULC, Land Use Land Cover*, en anglais) au sein d'un paysage donné (Van der Sluis et al. 2019). La notion de transition paysagère est donc inhérente à celle du changement et à celle de la perturbation (Sahraoui 2016). Les changements d'occupation et d'usage des sols peuvent être induits par divers facteurs et/ou perturbations qui peuvent être aussi bien naturels (e.g. dynamique et succession végétale, phénomènes météorologiques majeurs) et/ou anthropiques (e.g. réchauffement climatique, intensification de l'agriculture, urbanisation, industrialisation, déforestation) (Sahraoui 2016; Coppin et al. 2004). Dans ce contexte, les changements d'occupation et d'usages des sols, selon leurs types, peuvent être jugés comme des indicateurs de

perturbation au sein d'un paysage étudié (Sahraoui 2016). Il est à noter que certains types de changements d'occupation et d'usage des sols peuvent, au contraire, être sources d'équilibres au sein du paysage ou du système étudié (Sahraoui 2016)(e.g. passage d'une parcelle agricole à une parcelle forestière). Un changement d'occupation du sol peut être de diverses formes, comme la *conversion*, le remplacement complet d'une classe d'occupation du sol par une autre (e.g. conversion d'une parcelle de prairie en une forêt de feuillus) ou une *modification*, changement de nature sans qu'il y ait remplacement d'une classe à une autre (e.g. densité changeante du bâti résidentiel)(Coppin et al. 2004). L'occupation du sol peut être changeante au cours du temps sans que l'utilisation du sol en soit impactée, c'est par exemple le cas d'une parcelle agricole de culture annuelle ; sa couverture végétale change tandis que son utilisation reste à visée productrice. *A contrario*, l'utilisation du sol peut être changeante tandis que l'occupation du sol en reste inchangée, c'est par exemple le cas d'une surface en eau, un lac, dont l'utilisation en serait multiple et changeante au cours du temps (baignade -> pêche -> production hydroélectrique).

Ainsi, le suivi des changements d'occupation et d'usage des sols est primordial pour identifier et comprendre les processus, les influences et les impacts de l'homme sur son environnement et sur les structures paysagères. Ce type de travaux de recherche appartient au champs d'étude du *Land Change Science (LCS)*, que l'on pourrait traduire par "sciences du changement d'occupation et d'usage du sol" (Turner, Lambin, et Reenberg 2007; Bousquet et al. 2013). Ce champs d'étude participe à la compréhension des interactions et interrelations entre les systèmes sociaux et environnementaux et participe à la mise en évidence de l'impact de ces changement sur l'environnement, le paysage et sur les populations humaines (Rindfuss et al. 2004; Sahraoui 2016).

1.1.3. Quantifier le changement et les transitions paysagères

L'étude du changement de l'occupation et de l'usage des sols se base sur la création et la comparaison multi-dates de cartographies de l'occupation et de l'usage des sols (*LULC maps* dans la littérature scientifique anglophone) sur un territoire d'étude, afin de mesurer, de quantifier, caractériser et localiser les-dits changements. Les cartographies d'occupation et d'usage du sol peuvent être produites par le biais de diverses sources, comme la photographie aéroportée, les inventaires de terrains ou l'imagerie satellitaire (Ridding et al. 2020). L'utilisation de l'imagerie satellitaire et des outils de télédétection est d'ailleurs devenue un vecteur important dans l'obtention et la création de données sur l'occupation du sol et pour en mesurer et modéliser les changements afin de détecter les divers processus naturels et anthropiques les occasionnant et dans certains cas de les prédire (Ridding et al. 2020; Lu et al. 2004). La création de cartographies d'occupation et d'usage du sol peuvent suivre deux types d'approches distinctes, une approche manuelle et/ou une approche automatisée (Pelletier 2017).

L'approche manuelle porte sur la création de cartographies d'occupation et d'usage des sols par l'identification de zones homogènes à l'aide de la photo-interprétation de photographies aériennes et d'image satellitaires (Pelletier 2017; Robert et Autran 2012). La photo-interprétation se déroule en trois étapes : **(1)** l'analyse visuelle de l'image, **(2)** la délimitation des contours de zones homogènes ou d'éléments paysagers (processus de digitalisation), **(3)** l'identification de l'occupation et de l'usage du sol (Figure 1).

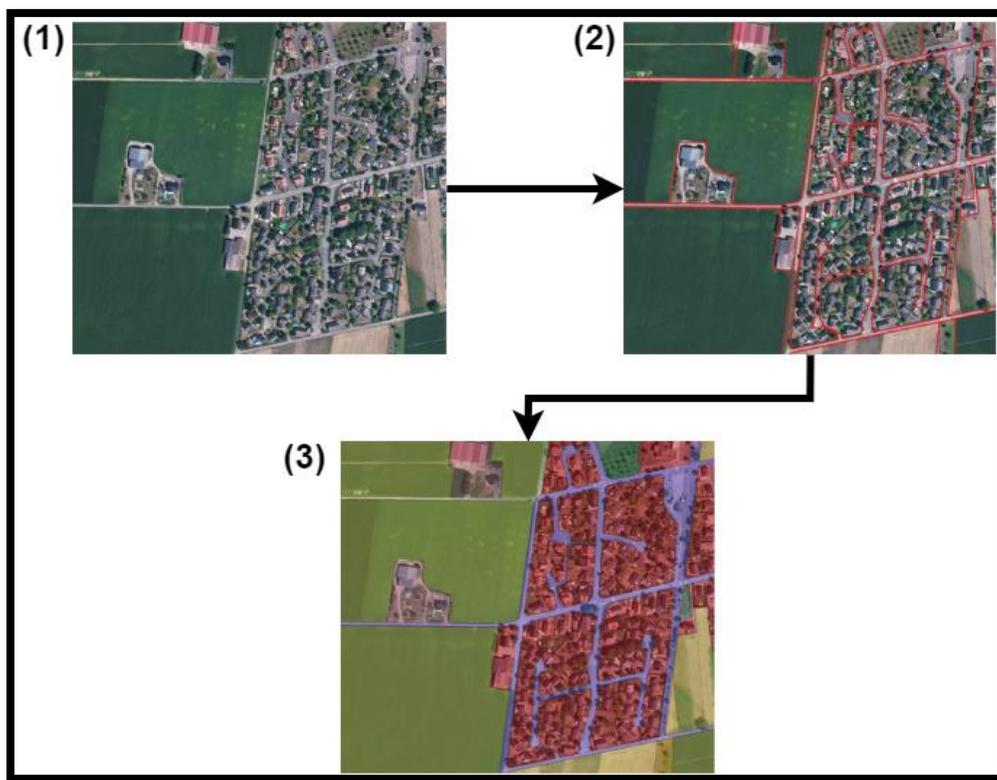


Figure 1: Schéma du processus de photo-interprétation dans le cadre de la cartographie d'occupation et d'usage des sols. (1) analyse de l'image satellitaire, ou de la photographie aérienne, (2) digitalisation des zones homogènes et des éléments paysagers

La photo-interprétation est donc dépendante de l'expertise de l'observateur et de la connaissance de celui-ci envers le territoire cartographié (Pelletier 2017). Bien que cette approche peut être jugée comme chronophage pour des résolutions spatiales, temporelles et thématiques grandes, celle-ci est encore couramment utilisée et permet la production de cartographies de l'occupation et de l'usage du sol de très bonne qualité (Comber, Law, et Lishman 2004; Coppin et al. 2004; Pelletier 2017; D. Liu et al. 2018).

Les approches automatiques, quant à elles, limitent l'intervention humaine par l'utilisation de méthodes de classifications d'images qui peuvent être supervisées et/ou non-supervisées (Pelletier 2017; Lu et al. 2004) (Figure 2). Basées sur le principe de l'apprentissage automatique, ces méthodes permettent d'associer à chaque pixel d'une image satellitaire ou de photographie aéroportée une classe d'occupation ou d'usage du sol (Pelletier 2017). Les classifications par apprentissage supervisé reposent sur l'utilisation de bases de données de référence alors que pour les classifications par apprentissage non-supervisé, les pixels qui composent l'image sont regroupés par similarité (*clustering*) et par la suite, les classes d'occupation et d'usage des sols leur sont attribués par reconnaissance et détermination humaines (Figure 2)(Pelletier 2017).

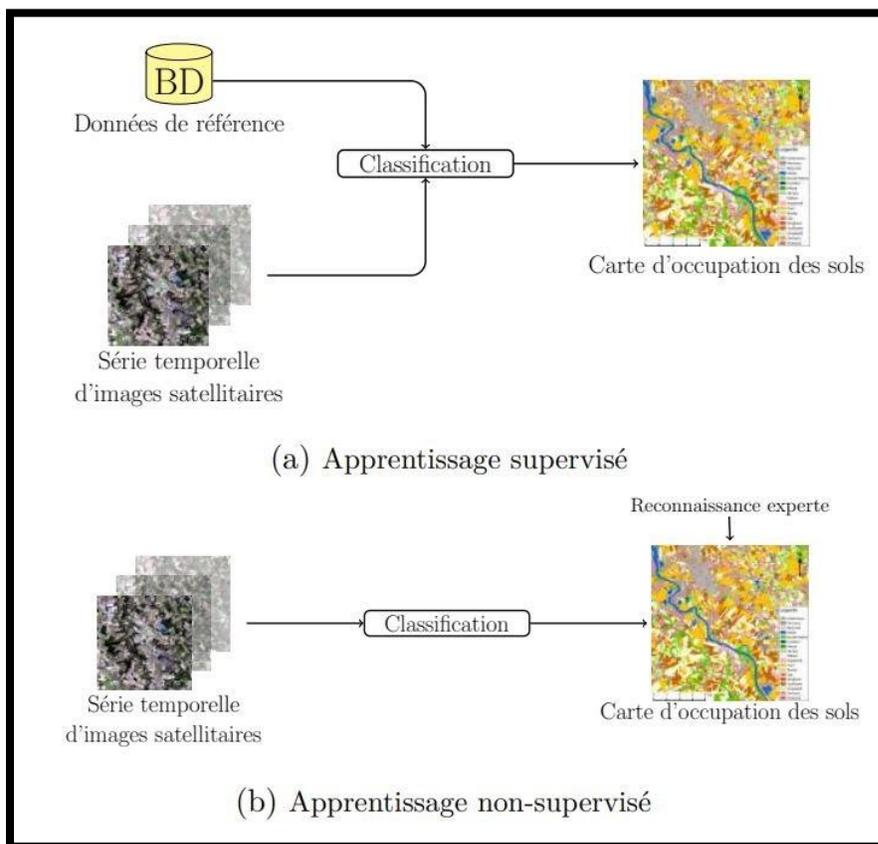


Figure 2: Schéma représentant les classifications par apprentissage supervisé et non supervisé (Pelletier 2017).

Bien que les démarches et méthodes de modélisations des changements d'occupation du sol et d'usage des sols soient diverses et nombreuses (Lu et al. 2004), la plupart d'entre-elles se base sur l'acquisition de données via des satellites aux capteurs multi-spectraux (e.g. **SPOT** pour Système probatoire d'observation de la Terre, le programme **LANDSAT** de la NASA, **MODIS** pour Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer et **AVHRR** pour Advanced Very High Resolution Radiometer) afin de créer des séries temporelles, multi-dates, d'occupation du sol et d'usage du sol (Lu et al. 2004). Ce type d'acquisition permet, en effet, la création de cartographies d'occupation et d'usage du sol mais également la mesure du changement de manière automatisée mais est tributaire de la résolution spatiale et spectrale des capteurs et de la date de mise en service de ces satellites. Les plus anciens d'entre eux datent du début des années 1970 (European Union et Eurostat 2000; Franklin et Wulder 2002).

La résolution spatiale et spectrale des capteurs précédemment cités déterminent leur capacité à détecter et identifier des classes d'occupation et d'usage du sol ainsi que détermine l'échelle à laquelle la cartographie d'occupation et d'usage du sol peut être produite (European Union et Eurostat 2000). Ces capteurs permettent, en général, la création de cartographies d'occupation et d'usage du sol et la mesure du changement aux petites et moyennes échelles géographiques, mais sont inadaptés pour les grandes échelles (European Union et Eurostat 2000; Franklin et Wulder 2002). *A contrario*, les photographies aériennes, plus particulièrement les orthophotographies, du fait de leur grande résolution spatiale, permettent de décrire, d'identifier et de délimiter les objets géographiques les plus petits (European Union et Eurostat 2000; Franklin et Wulder 2002). Elles permettent ainsi la création de cartographies et la mesure du changement aux échelles cartographiques plus grandes (European Union et Eurostat 2000; Franklin et Wulder 2002). De plus, celles-ci sont souvent disponibles à des dates antérieures au lancement des premiers satellites imageurs. A titre d'exemple, à l'échelle nationale, l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) met à disposition du public des orthophotographies réalisées à partir de l'après-guerre (1950) lors de diverses missions d'imagerie aéroportées. De telles données sont précieuses. Elles permettent, en effet, la création de cartographies d'occupation et d'usage du sol, la mesure de

changement ainsi que la détection et la détermination des processus naturels et/ou anthropiques qui les animent en France et ce, depuis 1950.

Dans de nombreux cas, les études du changement se basent sur la comparaison d'uniquement deux cartographies d'occupation et d'usage des sols de la même zone correspondant à deux points temporels (Reis 2008; Hooftman et Bullock 2012; Cousins et al. 2015). De plus, l'approche est souvent concentrée sur les augmentations/diminutions surfaciques pour chacune des classes sur la période étudiée comme il est possible de le constater dans les travaux de D. Liu et al. 2018. Ainsi, celles-ci ne rendent pas toujours compte de la nature et quantification des transitions (surface passant d'une classe d'occupation et d'usage du sol à une autre, "de-à"). Ces limites rendent difficile la détermination et la compréhension des dynamiques paysagères et des processus naturels ou anthropiques à l'origine de changements sur l'entièreté de la période étudiée (Ridding et al. 2020).

Toutefois, les matrices de transitions (*TMM*, *Transition Matrix Model* en anglais) semblent résoudre une part de ces problématiques. En effet, elles permettent de détailler et quantifier l'ensemble des changements de classes typologiques, sous la forme de matrices numériques, dans un système spatial déterminé et sur une période donnée (Figure 3). Celles-ci contiennent uniquement les états des éléments étudiés aux temps initiaux et finaux, sans rendre compte de la distribution spatiale et les causes des changements mais permettent de les quantifier (Figure 3). L'avantage des *TMMs* réside donc dans leurs manières synthétiques et quantitatives de présenter l'ensemble des informations passées ainsi qu'actuelles sous la forme de transitions quantitatives entre classes typologiques (Delbosc et al. 2018).

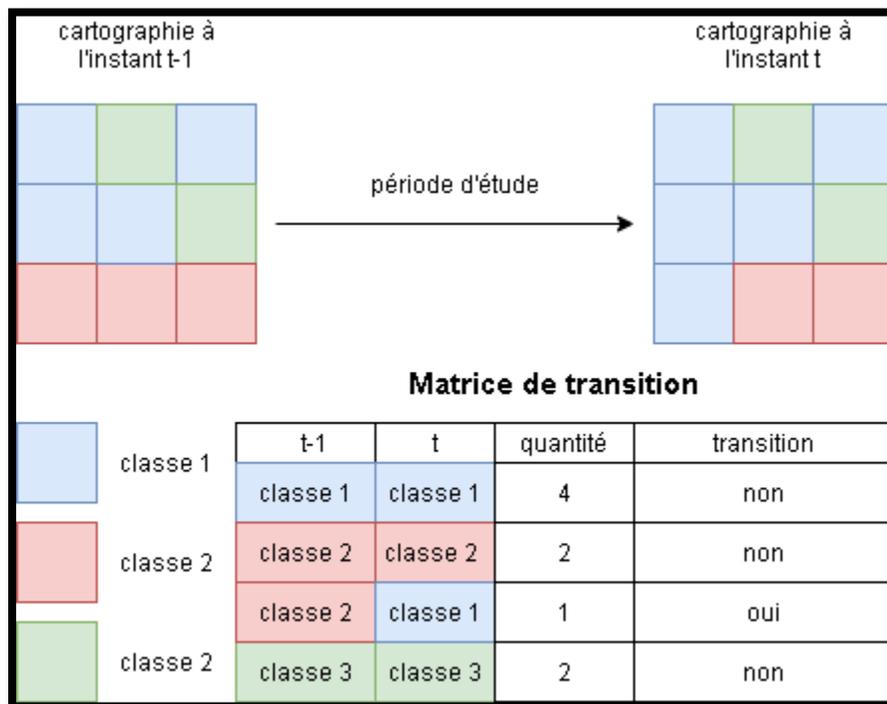


Figure 3: Représentation schématique du concept de matrice de transition

Cette méthodologie a principalement été développée et utilisée dans le domaine de la géographie. Du fait de leurs utilisations possibles de façon multiscale et de leurs potentialités transdisciplinaires, les TMMs ont été utilisées pour l'étude de l'évolution paysagère et plus particulièrement dans l'étude de l'évolution et des changements de l'occupation du sol de certains territoires, comme au Togo et au Bénin (Kpedenou, Boukpepsi, et Tchamie 2013; Ayena, Totin, et Amoussou 2017), dans l'Himalaya (Munsi et al. 2010) ainsi qu'en Chine (mesure des effets de travaux de restaurations sur l'occupation du sol)(Zhao et al. 2017) et dans les Pyrénées françaises (Sheeren et al. 2012). Etudiant des zones d'études de grande taille, aux échelles régionales, l'ensemble des études précédemment citées base ses analyses sur un faible nombre de classes d'occupation du sol (faible résolution thématique), rendant ainsi difficile la mise en lumière de processus locaux naturels ou d'origines anthropiques influençant les transitions et les trajectoires paysagères des systèmes étudiés. Un nombre limité de chercheurs s'est intéressé à leur transposition dans des champs disciplinaires annexes tels que l'écologie.

Son application à des cartographies diachroniques de végétation a permis une étude fine des dynamiques de végétations (Usher, 1992 ; Mobaied et al. 2015). Son utilisation a également mis en lumière les effets de certaines actions de restaurations sur des communautés végétales alluviales et prairiales (Delbosc et al. 2018; Gallet et Sawtschuk 2015; Staentzel et al. 2018).

La faible utilisation des TMM est expliquée par l'aspect chronophage de la méthodologie et le manque de visuels graphiques synthétiques en sortie. A ce jour, aucun outil automatisé ne propose des analyses sur la base des TMM et les visuels graphiques restent complexes à lire.

1.2. La notion de socio-écosystèmes

1.2.1. Emergence et définitions

La notion de “socio-écosystème” (SES, ou *socio-ecological system*, en anglais) est relativement récente. Ce terme est apparu au sein des sciences sociales et écologiques à partir des années 90, suite à la prise de conscience internationale concernant les questions de développement durable (Brundtland, 1987) et des *common pool resources* (Ostrom, 1990) mais également dans le cadre de recherches sur le concept de résilience réalisées au sein du Resilience Center de Stockholm. Les SES sont définis comme des systèmes intégrés et complexes où l'humain est en interaction avec la composante naturelle (J. Liu et al. 2007) ou plus largement comme “*des systèmes liant l'homme et la nature. Le terme met l'accent sur le fait que l'homme doit être considéré comme faisant partie de la nature et non comme en étant séparé - que la délimitation entre les systèmes sociaux et écologiques est artificielle et arbitraire.*” (Stockholm Resilience Center, 2020). Cette approche vise le rapprochement de deux champs disciplinaires anciennement dissociés ; les sciences de l'environnement et les sciences sociales (J. Liu et al. 2007). Il est donc, de ce fait, important pour l'étude des socio-écosystèmes, non pas de créer une discipline nouvelle, mais de prôner la dimension interdisciplinaire de la recherche (J. Liu et al. 2007; Lagadeuc et Chenorkian

2009): biologie de la conservation, psychologie de la conservation, des sciences politiques et de l'économie écologique.

1.2.2. Fessenheim et ses territoires (Alsace, France) : un système socio-écologique en transformation

Le territoire de la commune de Fessenheim (Haut-Rhin) héberge la première centrale nucléaire française REP900 en exploitation commerciale (depuis 1978), implantée en bordure du Grand Canal d'Alsace. L'annonce récente de la fermeture de la centrale induit une volonté de transition énergétique pouvant mener à une modification profonde des interactions homme-milieux au sein de ce territoire. Cette transition énergétique s'inscrit dans une transition écologique globale, étant une évolution vers un nouveau modèle économique et social, un modèle de développement durable qui renouvelle nos façons de consommer, de produire, de travailler, de vivre ensemble pour répondre aux grands enjeux environnementaux. Ce socio-écosystème est ainsi en pleine transformation.

Sur le plan national, l'étude des socio-écosystèmes et de leurs transformations est retranscrite *via* un dispositif de recherche et d'accompagnement des territoires que sont les Observatoires Hommes-Milieux (OHM). Les Observatoires Hommes-Milieux ont commencé à être mis en place en 2007 par l'Institut d'Ecologie et d'Environnement (INEE) du Centre National de la recherche scientifique (CNRS) (INEE, 2018). Les OHM sont décrits comme des dispositifs de recherche dont le but premier est de travailler à la compréhension des socio-écosystèmes complexes, très anthropisés et artificialisés (INEE, 2018). Leur création sont motivées par trois fondements. Le premier consiste en un fait ou événement majeur structurant le socio-écosystème (*socio-ecological framework*), citons par exemple, la présence d'un bassin minier modifiant en profondeur le territoire et son paysage où il est implanté, d'un point de vue tant sociologique, économique, qu'écologique (INEE, 2018). Le second consiste en un événement fondateur (*Disrupting event*), qui, dans l'exemple pris précédemment, correspond à la fermeture de ce même bassin minier, source lui aussi de changements profonds et

majeurs (INEE, 2018). Le troisième est l'Objet focal (*Focal Object*) ; il est le produit résultant des deux premiers et constitue l'objet et la problématique étudiés par les OHM (INEE, 2018).

L'Observatoire Homme-Milieus de Fessenheim a été créé en 2018. Sa création repose sur un *fait structurant* correspondant à la construction du Centre Nucléaire de Production d'Electricité (CNPE) de Fessenheim achevée en 1977 et sur un *événement fondateur* qui est la décision d'arrêt de son exploitation par EDF (Electricité de France, décision du CA d'EDF le 6 avril 2017). Ces deux événements ont été à l'origine de nombreuses transformations au sein du SES de Fessenheim, aussi bien environnementales que socio-économiques.

Le projet idex (initiative d'excellence) Juxta Rhenum, nommé ainsi de par la proximité immédiate de sa zone d'étude avec le Rhin, a pour objectif de mettre en place une méthodologie interdisciplinaire permettant de comprendre les interactions et les relations qui lient le CNPE au SES de Fessenheim et d'en suivre leurs influences respectives et leurs évolutions passées et futures. La méthodologie visée permettrait ainsi de comprendre, modéliser et anticiper l'évolution du SES et de ses composantes dans un cadre et un contexte de transition écologique et énergétique et répondant, de ce fait, aux objectifs de l'OHM de Fessenheim. Afin de permettre le développement de cette méthodologie, l'Université de Strasbourg et le CNRS, à travers divers laboratoires de recherches aux divers champs de compétences et d'expertises, ont formé une équipe pluri et interdisciplinaire. L'axe 2 du projet a été délégué au Laboratoire Image Ville, Environnement (L.I.V.E) et au Bureau d'Economie Théorique et Appliquée (BETA) de l'Université de Strasbourg pour répondre à la question suivante : *“Comment identifier, cartographier et analyser la zone d'impact globale du CNPE en intégrant la dimension économique, paysagère et territoriale en sus de la dimension environnementale ?”*

1.3. Objectifs du mémoire et de l'étude associée

Le présent mémoire et le stage associé s'inscrivent au sein de l'axe 2 du projet Juxta Rhenum et visent à répondre aux deux questions suivantes :

1. Quelles ont été les conséquences de la construction de CNPE sur le socio-écosystème de Fessenheim et sur ses trajectoires paysagères, naturelles et socio-démographiques ?
2. La construction du CNPE se place-t-elle comme seule source de changements au sein du socio-écosystème ?
3. Est-ce que l'île du Rhin est une source majeure de la naturalité au sein du socio-écosystème de Fessenheim ?

Afin de répondre à ces questions, une étude approfondie de la dynamique des paysages et des usages sur 67 ans a été menée sur le socio-écosystème de Fessenheim et ses territoires, intégrant l'île du Rhin. Les trajectoires évolutives ont été transcrites *via* une étude rétrospective de l'occupation du sol et de l'usage des sols basée sur l'application d'outils transdisciplinaires, les matrices de transitions, ayant d'ores et déjà démontré leurs potentialités (Staentzel et al. 2018)(paragraphe 1.1.2). Dans ce contexte, une méthode d'automatisation dans l'étude des trajectoires temporelles et paysagères de socio-écosystèmes a été développée pour élargir leur utilisation. Une caractérisation de la part de naturalité et des trajectoires de naturalité a également été réalisée pour rendre compte des influences potentielles de la construction du CNPE et d'autres grands ouvrages anthropiques au sein du socio-écosystème sur les attributs biogènes d'un paysage.

Les trajectoires paysagères ont ensuite été couplées aux trajectoires socio-démographiques du socio-écosystème afin de caractériser les interrelations. Pour finir, dans une logique prospective, les influences potentielles de différents projets d'aménagements et développement territoriaux à venir ont été analysées pour envisager l'après nucléaire.

Chapitre II : *Matériels et méthodes*

Chapitre II : Matériels et Méthodes

2.1 Etude de la dynamique des paysages

2.1.1 Détermination des bornes spatiales et temporelles

Un travail d'observation et d'analyse d'images satellitaires actuelles et passées de la commune de Fessenheim et de ses territoires a permis de définir l'emprise spatiale du site d'étude. L'emprise comprend le territoire administratif de la commune de Fessenheim. Celui-ci a été tronqué à l'Ouest afin de ne pas prendre en compte une zone uniquement agricole où très peu de changements ont été observés sur l'ensemble des photographies aériennes étudiées (Figure 4). Le territoire de la commune de Fessenheim intègre une partie de l'Île du Rhin (zone située entre le Grand Canal d'Alsace et le Vieux Rhin ; Figure 4). Il a été décidé d'étendre la zone d'étude au nord ainsi qu'au sud, au niveau de l'Île du Rhin, en suivant l'emprise de la ZNIEFF de type II ("Île du Rhin et Vieux Rhin de Ottmarsheim à Vogelgrun" code ZNIEFF 420012990; Figure 4), en prenant comme limite les points kilométriques pK 207 et 212 du Vieux Rhin. Ce choix a été motivé par la dimension naturelle qu'expose le complexe "Vieux Rhin, Île du Rhin et Grand Canal d'Alsace", proche du CNPE, afin d'en suivre son évolution spatiale et temporelle, potentiellement tant d'un point de vue écologique qu'anthropique. Ainsi, la zone d'étude couvre une surface totale de 1 501 586 m² soit 150,1586ha.

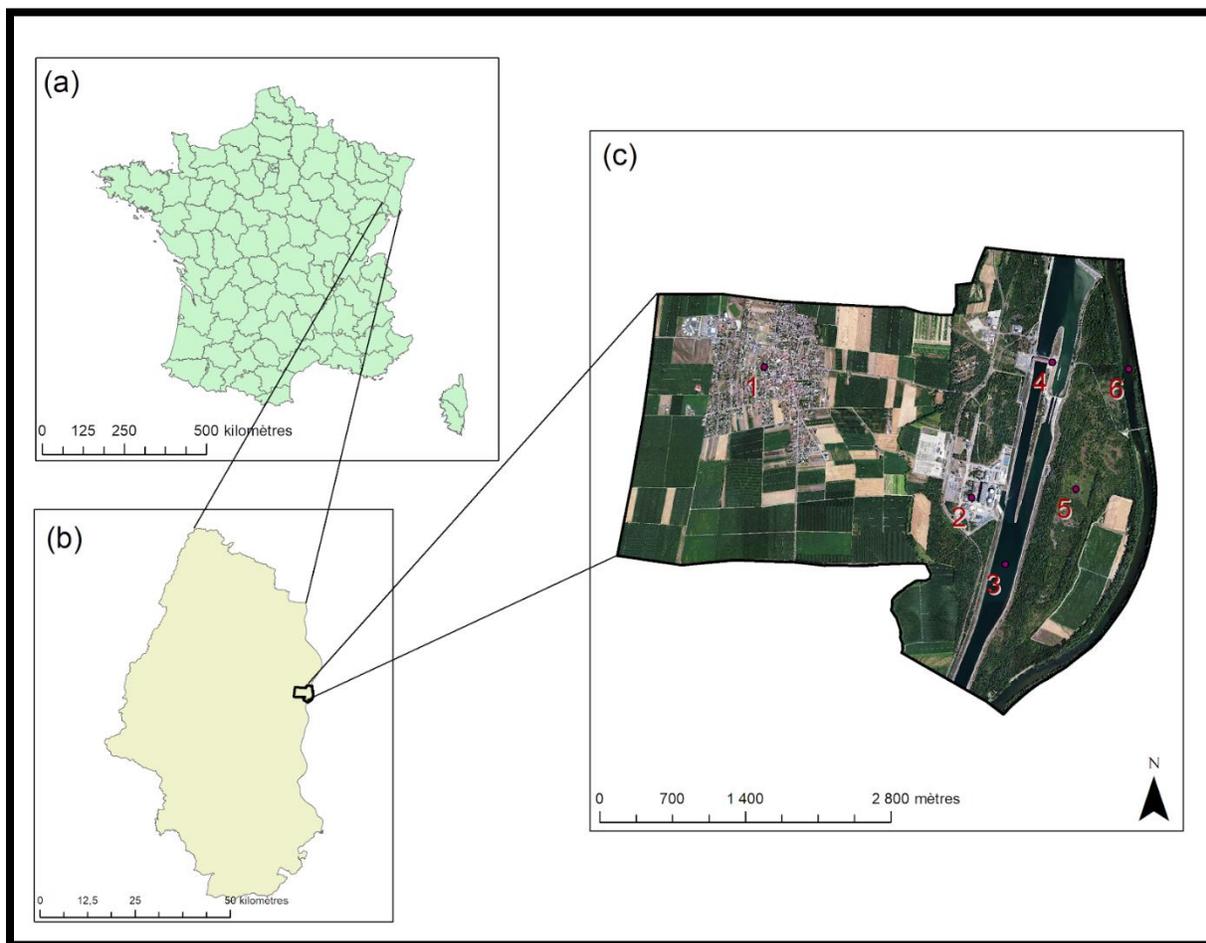


Figure 4: Délimitation de la zone d'étude du socio-écosystème de Fessenheim. (a) territoire français, (b) département du Haut-Rhin, (c) zone d'étude : (1) commune de Fessenheim (2) CNPE (3) GCA (4) centrale hydroélectrique (5) Ile du Rhin (6) Rhin.

L'IGN a entrepris des campagnes ponctuelles de prises de vues aériennes à partir de 1919 à l'échelle nationale et sur quelques territoires français. Ces campagnes se généralisent à l'ensemble du territoire pendant la période d'après-guerre, entre 1950 et 1965. Les flux WMS de GéoGrandEst ont permis d'obtenir un ensemble de six orthophotographies correspondant aux dates suivantes : 1951, 1956, 1997, 2007, 2011, 2018 (Tableau 1). Ces dates ont été choisies en fonction de leur disponibilité et leur accessibilité, tout en essayant de couvrir le plus largement possible la période d'étude, de 1951 à 2020, et ce, par pas de temps réguliers.

Tableau 1: Dates de prise de vues des orthophotographies, leurs sources, leurs résolutions et leurs types de données

DATES	SOURCES	RESOLUTION (TAILLE DU PIXEL)	TYPE
1951	WMS GéoGrandEst + remonterletemps.ign.fr	50cm	dalles d'orthophotographies aériennes en noir et blanc numérisées
1956	WMS GéoGrandEst	50cm	dalles d'orthophotographies aériennes en noir et blanc numérisées
1997	WMS GéoGrandEst	50cm	dalles d'orthophotographies aériennes numériques en couleur
2007	WMS GéoGrandEst	50cm	dalles d'orthophotographies aériennes numériques en couleur
2011	WMS GéoGrandEst	20cm	dalles d'orthophotographies aériennes numériques en couleur
2018	WMS GéoGrandEst	20cm	dalles d'orthophotographies aériennes numériques en couleur

Le début de notre étude se base ainsi sur les premiers clichés réalisés sur notre zone d'étude en 1951. Cette date est importante puisqu'elle se situe avant le début des grands travaux d'aménagements réalisés sur le Rhin entre 1951 et 1956 avec la construction du grand canal d'Alsace (GCA) et de la centrale hydroélectrique de Fessenheim. Une étape de géoréférencement a été nécessaire pour utiliser cette donnée. En effet, un décalage a été observé entre les orthophotographies de 1951 et 1956. Il a donc été nécessaire d'acquérir deux orthophotographies de 1951 couvrant la zone d'étude où le décalage a été observé. Les clichés ont été obtenus *via* le site <https://remonterletemps.ign.fr/> (service gratuit de l'IGN). Le processus de géoréférencement a été rendu délicat de par les modifications et mutations majeures et profondes de l'occupation du sol au niveau du Rhin entre 1956 (date de référence) et 1951 (date à géoréférencer) (Figure 5). Ces modifications, illustrées par les travaux du grand canal d'Alsace (GCA) commencés en 1950, ont rendu difficile et fastidieuse la détection de points de calage. Des points de calages fiables, au nombre 30 pour les deux clichés ont toutefois été trouvés. Malgré la précision et le nombre important de points de

calage, un décalage entre les orthophotographies reste observable. Mais ce décalage, faible en moyenne (moins de 3 m) n'affecte que très peu le processus de digitalisation.

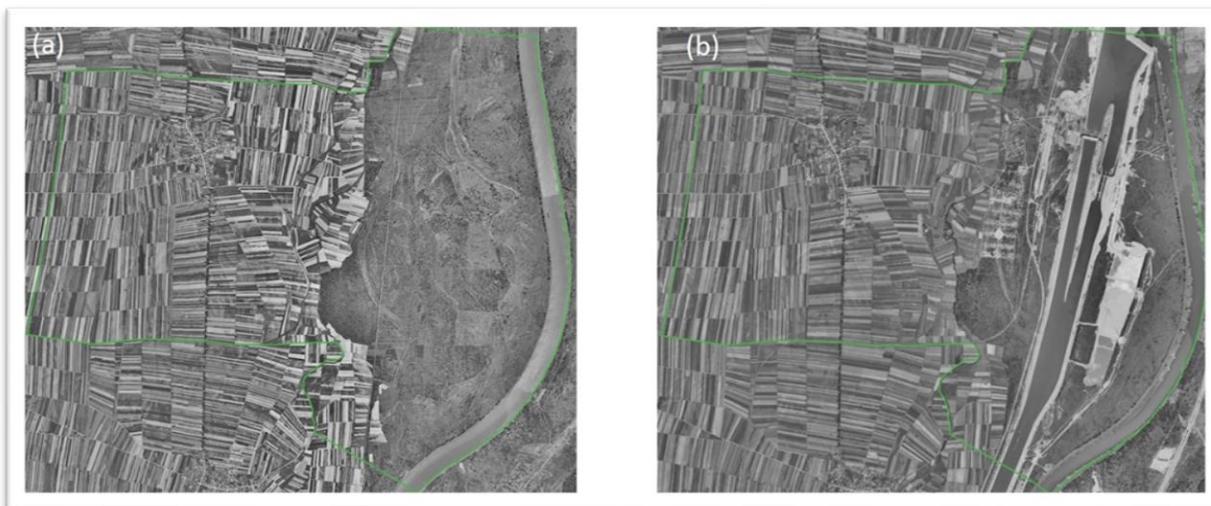


Figure 5: Comparaison des orthophotographies de 1951 (a) et 1956 (b)

Il est à noter l'absence de photographies de la zone d'étude entre 1970 et 1997. En effet, ces clichés ne sont pas accessibles, puisque à ces dates aucun survol ni prise photographique ne sont autorisés du fait de la haute sensibilité du site de la centrale nucléaire de Fessenheim (dans sa phase de construction et de début d'exploitation ; IGN-communication personnelle).

2.1.2 Etapes de digitalisation, typologie et rasterisation

La digitalisation s'est déroulée en deux étapes *via* **(1)** la recherche de données existantes et **(2)** un travail de photo-interprétation. Dans un premier temps, les référentiels d'occupation des sols européens type Corine Land Cover (CLC) ou régionaux type BDOCS (Base de Données d'Occupation des Sols) de CIGAL (Coopération pour l'information Géographique en Alsace) ont permis d'aider à l'identification de certains objets géographiques. Cependant, les résolutions spatiales n'étaient que peu satisfaisantes pour la présente étude (CLC - 100m ; BDOCS - 10 m, 2012). Bien que cette dernière ait permis des observations complémentaires, un travail de photo-interprétation a été nécessaire.

Le processus de digitalisation s'est effectué de la date la plus récente (2018) à la date la plus ancienne (1951) pour éviter l'apparition d'erreurs topologiques. Les dates les plus récentes basées sur des orthophotographies numériques aériennes à haute résolution ont ainsi servi de référence pour une meilleure interprétation des structures paysagères ou objets géographiques au niveau des dates plus anciennes dont les clichés numérisés aériens argentiques en noir et blanc sont de faibles résolutions. Afin de produire des données homogènes sur l'ensemble de la zone d'étude et pour toutes les dates retenues, l'échelle de digitalisation a été fixée au 1/1200ème et le système de coordonnées pour l'ensemble du projet est en Lambert 93 - RGF93.

Pour définir les limites de différents objets géographiques et regrouper des parcelles/polygones de même classe typologique, la couche vectorielle du parcellaire cadastrale de 2019 a été utilisée pour accompagner le travail plus conventionnel de digitalisation.

Une nomenclature a été définie en fonction, d'une part, des objectifs de l'étude et d'autre part, de la visibilité des objets géographiques identifiables sur l'ensemble de la zone et des dates étudiées. Un total de 19 classes d'occupation et d'usage du sol a été sélectionné voire modifié par l'adaptation des nomenclatures utilisées par la BDOCSV2 de niveau 4 et de Corine Land Cover (Tableau 2).

Tableau 2: Typologie, nomenclature et classes d'occupation et d'usage du sol

Types	Code	Description
Habitats	111	Habitats continus (centre bourg, centre-ville)
	112	Habitats discontinus (hors centre bourg, cités ouvrières, fermes isolées)
Grandes emprises	121	Emprises industrielles, Emprises commerciales et artisanales
	124	Zones de travaux, chantiers et remblais
	125	Emprise réseau ferré
	126	Emprise réseau routier
	127	Chemins (hors routes)
	128	Emprises hydroélectriques (aménagement hydrauliques, centrales hydroélectriques, berges aménagées)
Espaces verts artificialisés	131	Espaces verts urbains (Pelouses et zones arborées, Jardins ouvriers)
	132	Equipements sportifs et de loisirs

Emprises agricoles	210	Emprises agricoles (plein champs)
	222	Emprises liées à l'agriculture (bosquets et haies)
Espaces forestiers et semi-naturels	310	Végétations arborescentes
	320	Ripisylves
	340	Végétations herbacées (pelouses, prairies)
	350	Sols nus
Milieux hydrographiques	410	Cours d'eau principaux
	411	Canaux principaux
	412	Etangs et lacs

Les habitats continus caractérisent l'ensemble du bâti résidentiel concentré au centre du bourg alors que les habitats discontinus caractérisent l'ensemble du bâti résidentiel présent hors du centre historique (cités ouvrières et fermes situées en zones agricoles). Dans la présente étude, ils ont été différenciés pour mettre en évidence la présence de deux cités ouvrières proches du site de la centrale nucléaire et de la centrale hydroélectrique de Fessenheim.

Notons l'absence d'une classe représentant une végétation mixte, dite "arbustive" ou de transition entre une végétation "arborée" (recouvrement majoritairement représenté par des arbres) et une végétation "herbacée" (recouvrement majoritairement représenté par une végétation prairiale). En effet, par limite de temps ainsi que par la faible résolution de certaines orthophotographies, il a été décidé de ne pas prendre en compte cette classe plus difficilement identifiable.

L'ensemble des couches vectorielles obtenues a été vérifié à l'aide du vérificateur topologique d'ArcGis afin d'identifier et de corriger l'ensemble des erreurs topologiques et géométriques (juxtaposition des polygones ou absence de superposition, de géométrie invalide ou de trou). Les tables attributaires ont été également vérifiées pour détecter la présence d'erreurs dans l'identification des objets géographiques et de leurs classes associées.

Les différentes couches vecteurs produites ont été rastérisées, c'est-à-dire pixellisées. Le choix du grain ou de la taille du pixel détermine la précision des données ainsi que la résolution spatiale des rasters qui en résultent. Afin de déterminer la taille de pixel la plus appropriée à notre étude, un test a été réalisé sur la couche vectorielle de 2018. Le test porte sur trois rasterisations à trois tailles de pixels différentes : (i) 0,5 m (surface de pixel égale à 0,25 m²), (ii) 1 m (surface de pixel égale à 1 m²) et (iii) 2 m (surface de pixel égale à 2 m²). Il a pour but de comparer l'ensemble des surfaces par classes typologiques issues de la couche vecteur et des trois rasters, afin d'y déterminer pour chaque taille de pixels la sur/sous-estimation totale.

Tableau 3: Résultat du test de rasterisation à 0,5 m, 1 m et 2 m

CLASSES	VECTEUR	0,5M	ABS 0,5M	1M	ABS 1M	2M	ABS 2M
111	798091,69	21,44	21,44	51,69	51,69	59,69	59,69
112	67013,73	72,23	72,23	-6,27	6,27	233,73	233,73
121	631680,91	5,41	5,41	48,91	48,91	-143,09	143,09
125	24496,13	-36,37	36,37	13,13	13,13	-27,87	27,87
126	500723,07	-121,68	121,68	47,07	47,07	87,07	87,07
127	95391,78	11,78	11,78	-86,22	86,22	-128,22	128,22
128	268065,68	4,43	4,43	11,68	11,68	-90,32	90,32
131	229027,46	78,96	78,96	70,46	70,46	131,46	131,46
132	29374,90	0,90	0,90	7,90	7,90	-9,10	9,10
210	6479454,95	97,20	97,20	-91,05	91,05	-393,05	393,05
222	79478,65	32,90	32,90	17,65	17,65	-129,35	129,35
310	3582100,52	82,27	82,27	26,52	26,52	-51,48	51,48
320	42783,16	156,16	156,16	196,16	196,16	119,16	119,16
340	654900,79	-15,71	15,71	36,79	36,79	200,79	200,79
350	7214,09	0,84	0,84	-0,91	0,91	2,09	2,09
410	523500,09	-12,16	12,16	-22,91	22,91	140,09	140,09
411	997002,61	2,86	2,86	-17,39	17,39	102,61	102,61
412	5701,50	-2,00	2,00	5,50	5,50	-6,50	6,50
TOTAL :	15016001,71		755,30		758,21		2055,68

Le calcul est réalisé comme suit :

- Vecteur = surface par classe en m² issue de la couche vecteur 2018
- Raster 0,5m, Raster 1m, Raster 2m = surface par classe en m² issue de la couche vecteur 2018 - surface par classe issue des rasters
- Abs 0,5m, Abs 1m, Abs 2m = valeurs absolues de Raster 0,5m, Raster 1m, Raster 2m
- Total = somme des valeurs absolues

Pour une rasterisation à 0,5 m, à 1 m et à 2 m, on constate une sur/sous-estimation totale respective de 755,30 m² et 758,21 m² et 2055,68 m² (Tableau 3). A la vue de ces résultats, le choix de la taille de pixel s'est porté sur une rasterisation à 1 m, qualifiée de bon compromis entre précision et vitesse de calcul. En effet, la valeur totale de sur/sous-estimation est semblable à celle issue de la rasterisation à 0,5m et bien inférieure à celle issue de la rasterisation à 2m. Un autre paramètre à prendre en compte dans le processus de rasterisation est la méthode d'attribution de la valeur au pixel. Celle choisie n'est pas celle par défaut (valeur au centre du pixel) mais celle de la surface maximale. Celle-ci a été choisie car, après test à rasterisation de 1m, elle ne semble pas sur ou sous-estimer les classes dites "linéaires" comme les chemins, routes, ripisylves.

2.1.3 Méthodes pour l'étude de la nature des transitions et des dynamiques de changement d'occupation et d'usage des sols.

Les méthodes et outils permettant d'analyser les transitions et dynamiques paysagères sont apparus dans les années 1990 (Usher, 1992). Employées communément sur des objets géographiques, ces méthodes ont récemment été transposées à des problématiques d'ordre environnemental. Le travail réalisé dans cette présente étude s'inscrit dans une perspective similaire aux travaux de recherche de (Staentzel et al. 2018). Il s'agit de quantifier les changements de classes typologiques d'occupation et d'usage des sols au cours de l'histoire socio-écologique de Fessenheim et de ses territoires de 1951 à 2018. La méthode utilisée est celle ayant été détaillée dans (Staentzel et al. 2018).

- **Création des matrices de transitions**

Pour chacune des transitions entre deux dates, le raster de la couche la plus ancienne est combiné avec la plus récente en utilisant la fonction *Combine (Spatial Analyst)* du logiciel *ArcGis*. Ce traitement permet d'obtenir un raster détaillant l'ensemble des changements d'occupation et d'usages des sols possibles et réalisés entre les deux dates. Un total de six matrices de transitions a été créé, correspondant aux transitions suivantes : 1951-1956, 1956-1997, 1997-2007, 2007-2012, 2012-2018 et 1950-2018. La figure ci-dessous présente une partie de la table attributaire du raster issu du traitement pour la transition 2012-2018 :

	Rowid	VALUE	COUNT	2011	2018
▶	0	1	94540	127	127
	1	2	114782	340	310
	2	3	637471	340	340
	3	4	3431898	310	310
	4	5	77	340	126
	5	6	487763	126	126
	6	7	6474225	210	210
	7	8	512390	410	410
	8	9	80	126	340
	9	10	266602	128	128
	10	11	997020	411	411
	11	12	202	128	127
	12	13	392	340	127

Figure 6: Extrait de la table attributaire du raster combiné pour la transition 2011-2018 - (Rowid et Value correspondent à l'identifiant de la transition ; la colonne Count correspond au nombre de pixels, ici une surface m², ayant subi une transition ; les colonnes 2011 et 2018 identifient la transition entre deux classes d'occupation et d'usage des sols)

La colonne *Count* correspond au nombre de pixels concernés par chaque transition. Comme la rasterisation s'est fait à 1m, ce nombre correspond aussi à une surface en m². Les colonnes *2012* et *2018* doivent être lues ensemble, elles correspondent aux changements de classes d'occupation et d'usage des sols entre les deux dates. On y distingue des transitions dites "stables", qui correspondent au nombre de pixels n'ayant pas changés d'occupation du sol lors de la transition ; c'est le cas, par exemple, pour la transition 127-127 (Figure 6). Les transitions où un changement d'occupation du sol est observé, comme pour la transition 340-310 (Figure 6), sont dites "instables".

Pour l'ensemble des six tables attributaires issues du traitement précédent, pour chacune d'entre-elles, une colonne nommée *Pourcent* y est ajoutée. Celle-ci permet, pour chaque transition, qu'elle soit stable ou instable, de connaître la surface de transition en %.

Les transitions stables et instables ainsi que leur surface en % sont ensuite reportées sur un diagramme en flux (Figure 7). Pour chaque diagramme de flux, un seuil de prise en compte est choisi afin de limiter le nombre de transitions instables et d'y afficher uniquement les 15 transitions instables dont les surfaces sont les plus grandes. Les représentations graphiques des matrices de transitions ont été créées à l'aide du site de création de diagrammes *draw.io*.

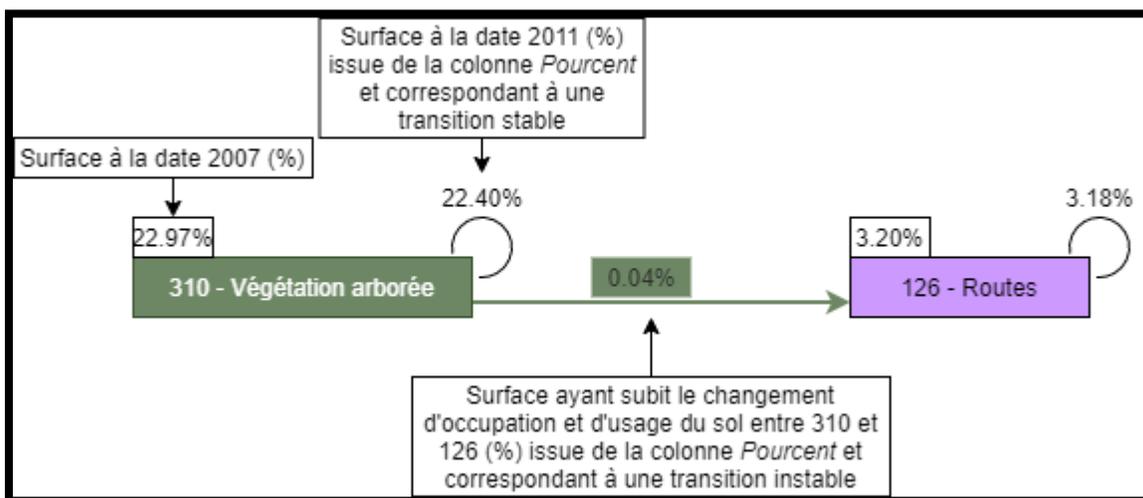


Figure 7: Schéma illustrant la représentation graphique d'une transition entre deux dates (2007-2011)

L'analyse des diagrammes de flux a été couplée à celle de métriques spatiales récemment développées : le pixel change index (PCI) et le zonal change index (ZCI).

Le *Pixel Change Index* (PCI) est un indicateur développé par (Staentzel et al. 2018) se basant sur l'inverse de l'indice de stabilité décrit dans (Gallet et Sawtschuk 2015). Le PCI a été obtenu en sommant les fréquences en pixels (colonne *Pourcent*) ayant subi un changement d'occupation du sol, une transition instable, sur la somme des fréquences en pixels de toutes les transitions (somme de la colonne *Pourcent*) (Equation

1). Il a été calculé pour l'ensemble des 6 matrices de transitions. Le PCI se concentre donc sur les changements locaux, de pixel à pixel et permet d'identifier et de quantifier la stabilité du système lors d'une transition entre deux dates. Il est à noter que le PCI décroît quand le système gagne en stabilité et augmente quand le système perd en stabilité lors d'une transition entre deux dates.

Equation 1 :

$$\text{Pixel Change Index, PCI (\%)} = \frac{\sum_{t=1}^N \text{Pixels des transitions instables de la colonne Pourcent}}{\sum_{t=1}^N \text{Pixels des transitions instables et stables de la colonne Pourcent}}$$

Le *Zonal Change Index* (ZCI) est lui aussi un indicateur développé par (Staentzel et al. 2018). Contrairement au PCI, le ZCI permet de quantifier les changements à une échelle plus large. Le calcul du ZCI peut être traduit par l'équation ci-dessous (Equation 2). Le ZCI a été calculé pour l'ensemble des six matrices de transitions.

Equation 2 :

$$\text{Zonal Change Index, ZCI (\%)} = \frac{\sum_{t=1}^N |(P1-P2)|}{2}$$

P1 : fréquence de pixels par classe pour la date 1

P2 : fréquence de pixels par classe pour la date 2

Il est à noter que le PCI et le ZCI sont deux indicateurs qui doivent être interprétés conjointement. Un PCI et un ZCI élevés, partageant des valeurs semblables, traduisent une instabilité du système à l'échelle locale comme à grande échelle (Staentzel et al. 2018). Lorsque le PCI est supérieur au ZCI, le système est dit stable mais des variations sont observables à l'échelle locale (Staentzel et al. 2018). Lorsque les deux indicateurs sont faibles et partagent des valeurs approximativement égalées, le système est alors stable à l'échelle locale comme globale (Staentzel et al. 2018).

Afin de pouvoir localiser et visualiser géographiquement l'ensemble des changements d'occupation et d'usage des sols s'opérant lors des différentes transitions, des rasters de "changements" ont également été produits. Ils exposent, pour chaque pixel le constituant, le nombre de transitions/changements d'occupation ou d'usage des sols qu'il a subi lors des différentes transitions étudiées.

Le traitement a été réalisé à l'aide d'ArcGis. Afin d'imager cette méthodologie, nous allons prendre comme exemple la création d'un raster de changements sur l'ensemble des dates de notre étude. Dans un premier temps, pour chaque transition, les rasters les plus récents ont été soustraits aux plus anciens grâce à la calculatrice raster.

```
Raster1956 - Raster1951 = Difference1
```

```
Raster1997 - Raster1956 = Difference2
```

```
Raster2007 - Raster1997 = Difference3
```

```
Raster2011 - Raster2007 = Difference4
```

```
Raster2018 - Raster2011 = Difference5
```

Les rasters de différences obtenues présentent pour chaque pixel une valeur de 0 s'il n'y a pas eu de changement entre les deux dates et des valeurs différentes de 0 lorsqu'il y a eu un changement. Ils ont été traités, par la suite, à l'aide de l'outil *Con* d'ArcGis. Ce traitement permet d'assigner à chaque pixel une valeur de 0 lorsqu'il n'y pas de différence et une valeur de 1 lorsqu'une différence est observée.

```
Difference1Con = Con(Difference1, Difference1, 1, "Value = 0")
```

```
Difference2Con = Con(Difference2, Difference2, 1, "Value = 0")
```

```
Difference3Con = Con(Difference3, Difference3, 1, "Value = 0")
```

```
Difference4Con = Con(Difference4, Difference4, 1, "Value = 0")
```

```
Difference5Con = Con(Difference5, Difference5, 1, "Value = 0")
```

Le raster de changement final est alors obtenu par addition de l'ensemble des rasters précédents obtenu à l'aide de la calculatrice raster.

```
Difference1Con + Difference2Con + Difference3Con + Difference4Con +  
Difference5Con
```

Chaque pixel du raster de changement se voit alors attribuer un chiffre entre 0 et 5, correspondant aux nombres de transitions/changements d'état qu'il a subi. Ce traitement a été réalisé pour chacune des transitions et sur l'ensemble de la durée de l'étude afin de mettre en évidence et localiser les changements s'opérant tant à une échelle temporelle courte que longue.

2.1.2. Premiers tests pour le développement d'un outil automatisé visant l'étude des dynamiques et trajectoires évolutives d'un socio-écosystème

Des premiers tests ont été menés pour développer un outil d'automatisation visant l'étude approfondie de socio-écosystèmes sur le long terme, leurs évolutions et les changements s'y opérant. Les traitements et calculs présentés dans la partie 2.1.3. ont été programmés au sein du logiciel R. Un total de trois semaines de travail (phase de réflexion, de recherche d'informations et de développement) ont été nécessaires pour la réalisation du script et du package associé "EcoChange".

Celui-ci permet, après importation de deux rasters partageant des classes de même nomenclature (par exemple : occupation du sol et usage des sols, Corine Land cover CLC, Corine Biotope, habitats d'intérêt communautaire en lien avec Natura 2000) de réaliser de façon automatique les traitements suivants :

- Production d'une matrice numérique de transition
- Calcul du pourcentage de changement par transition
- Calcul du nombre de transitions stables et instables
- Calcul du pourcentage de pixels par classe et par raster
- Calcul du PCI (*Pixels Change Index*, (Staentzel et al. 2018))
- Calcul du ZCI (*Zonal Change Index*, (Staentzel et al. 2018))
- Affichage sur une carte interactive des deux rasters importés
- Affichage sur une carte interactive d'un raster de changement

L'ensemble des fonctions précédemment expliquées a été intégré au sein d'une application R Shiny. R shiny est lui-même un package R développé par R studio. Il permet de créer une application dotée d'une interface dite "graphique" par opposition à une application où l'interaction se fait par lignes de codes. Celle-ci repose sur le moteur de R et peut être facilement intégré à une page web. Ce portage a été motivé par le souhait de généraliser l'utilisation de ce package et ainsi permettre son applicabilité au sein de projets prédictifs envisagés par des gestionnaires d'espaces naturels ou tout autre utilisateur n'étant pas familiarisé avec le logiciel R. Cette production s'est réalisée en co-construction avec Hugo Ehrstein.

Certaines fonctionnalités y ont été ajoutées comme l'importation simplifiée de rasters (Figure 8), l'exportation des résultats sous divers formats (CSV, Excel, pdf, etc)(Figure 9), la création automatique de graphiques récapitulatifs et leurs exportations (Figure 10), une visualisation des rasters d'entrées ainsi qu'un raster exposant les changements d'états (Figure 11).

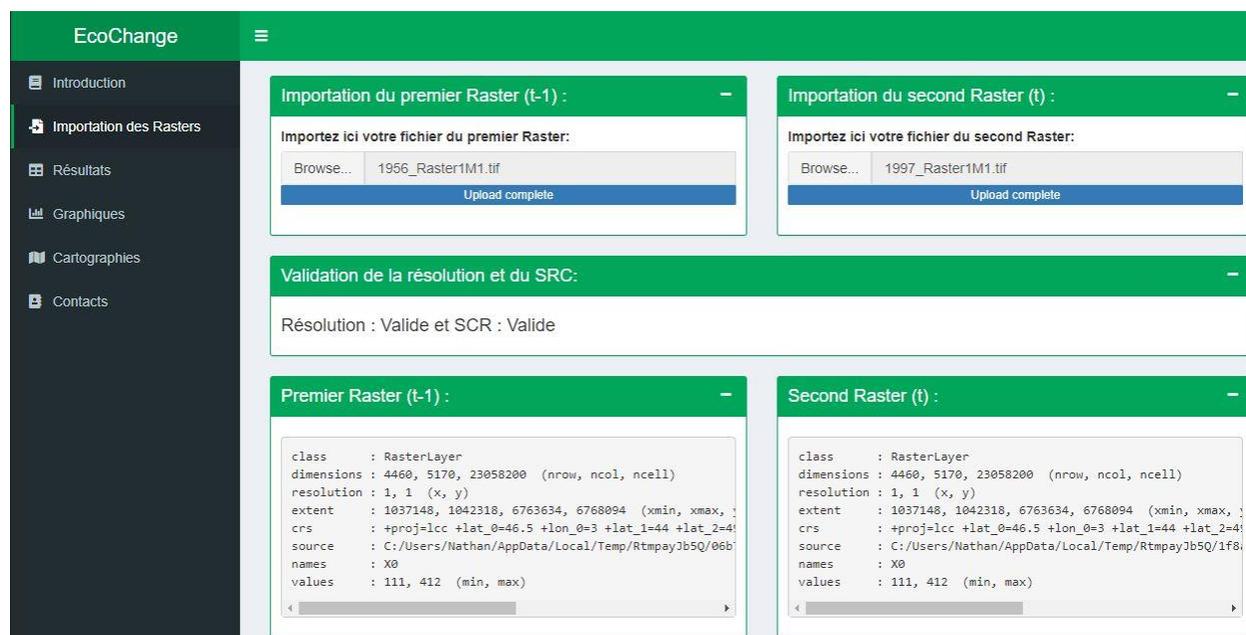


Figure 8: Capture d'écran de l'interface d'importation et de vérification de la résolution et du SRC de l'outil EcoChange

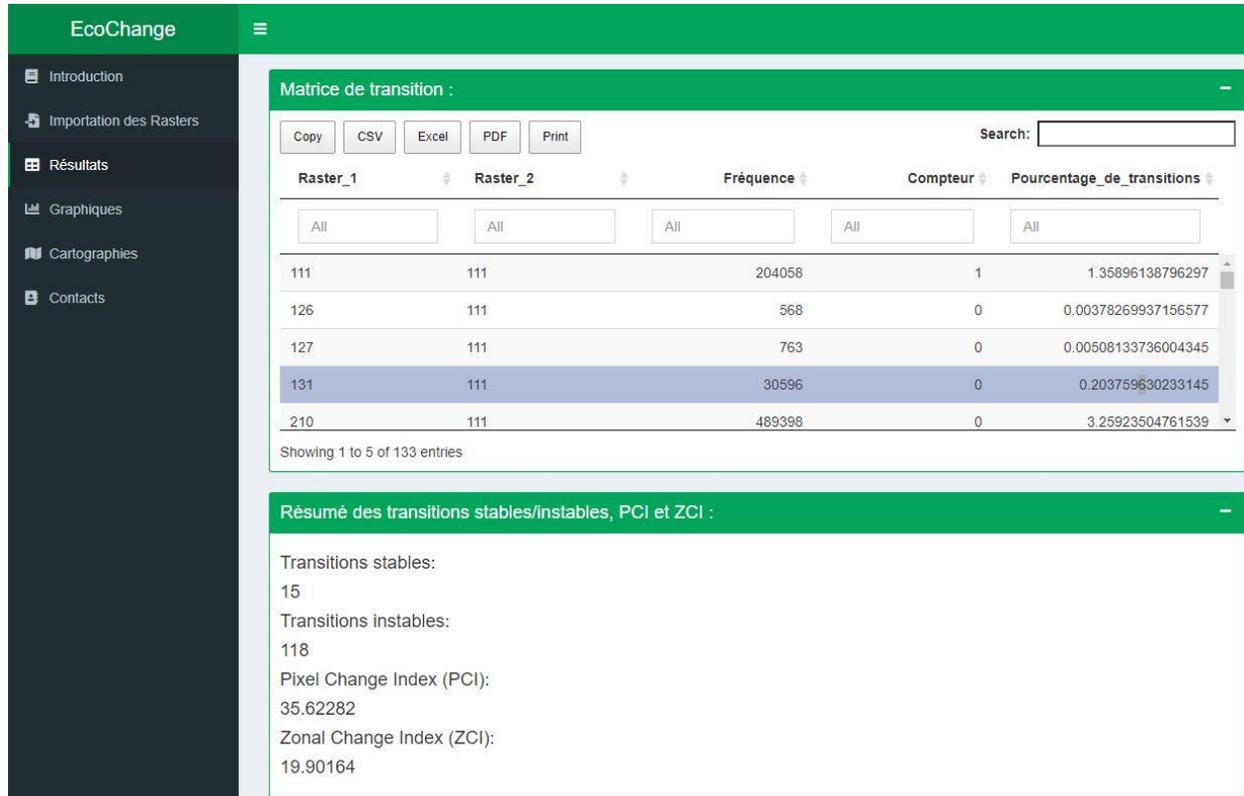


Figure 9: Capture d'écran de l'interface des résultats et de leurs d'exportations

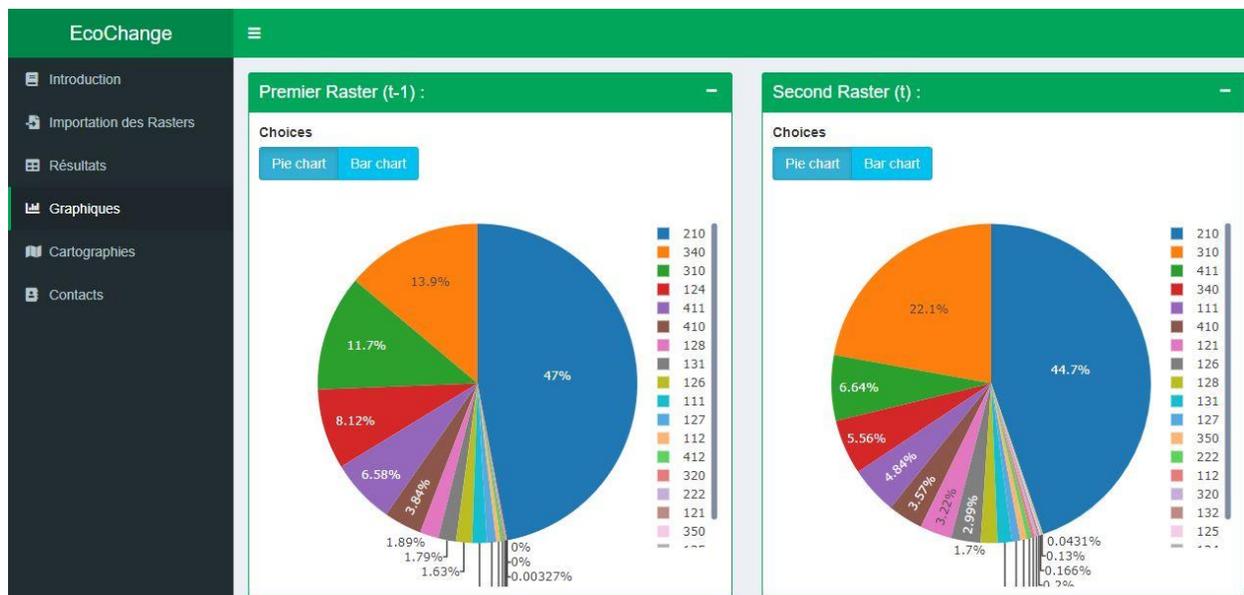


Figure 10: Capture d'écran de l'interface graphique récapitulatifs des résultats pour chacun des deux rasters

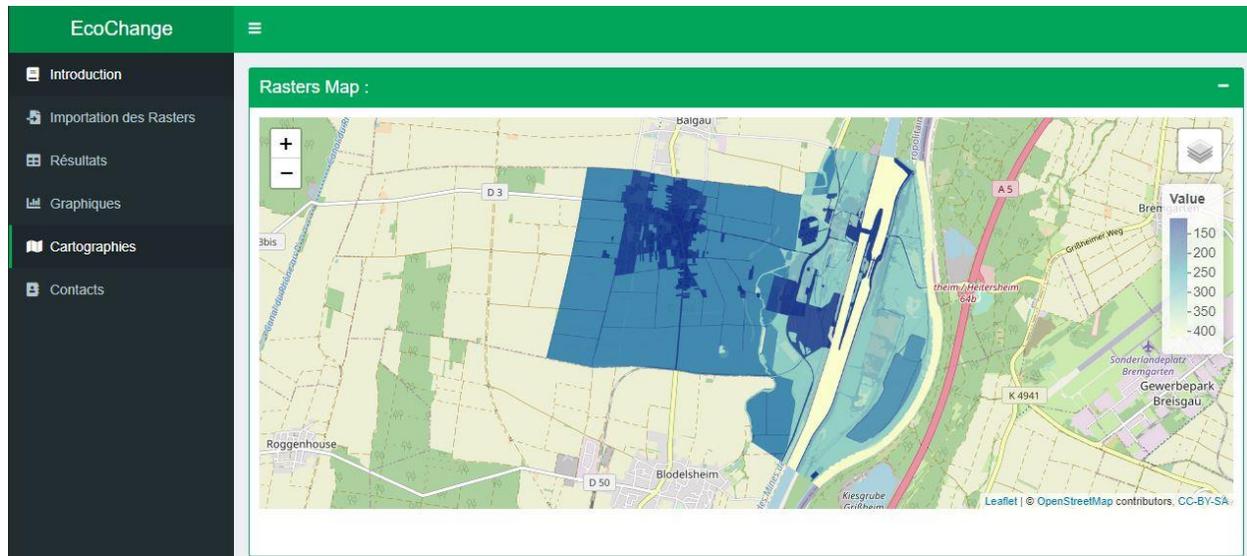


Figure 11: Capture d'écran de l'interface de visualisation des rasters d'entrées et du raster de changements d'états de l'outil EcoChange

2.2 Etude de la part de naturalité du socio-écosystème

2.2.1 Approche générale : le socio-écosystème

2.2.1.1 Analyse de la part de naturalité du SES de Fessenheim

Afin de mesurer la part de naturalité au sein du socio-écosystème de Fessenheim sur l'ensemble des dates étudiées et d'en suivre son évolution, les classes d'occupation du sol d'origine anthropique ont été différenciées des classes dites biogènes, i.e. qui sont nécessaires à l'épanouissement du vivant (végétation arborescente et herbacée, ripisylves, étangs, lacs et cours d'eau principaux) (Tableau 4). Pour chacun des rasters, les surfaces des classes typologiques d'origine anthropique et les classes typologiques biogènes ont ensuite été additionnées, l'objectif étant de mettre en évidence la trajectoire de naturalité au sein du système et les influences potentielles de la construction du CNPE et de tout autres ouvrages et aménagements ayant été construits sur la zone et pendant la période étudiée.

Tableau 4: Différenciation des classes d'origines anthropiques et des classes biogènes

Classes typologiques d'origines anthropiques	Classes typologiques biogènes
Habitats continus (centre bourg, centre-ville)	Végétations arborescentes
Habitats discontinus (hors centre bourg, cités ouvrières, fermes isolées)	Ripisylves
Emprises industrielles, Emprises commerciales et artisanales	Végétations herbacées (pelouses, prairies)
Zones de travaux, chantiers et remblais	Cours d'eau principaux
Emprise réseau ferré	Etangs et lacs
Emprise réseau routier	
Chemins (hors routes)	
Emprises hydroélectriques (aménagements hydrauliques, centrales hydroélectriques, berges aménagées)	
Espaces verts urbains (Pelouses et zones arborées, Jardins ouvriers)	

Equipements sportifs et de loisirs	
Emprises agricoles (plein champs)	
Emprises liées à l'agriculture (bosquets et haies)	
Sols nus	
Canaux principaux	

2.2.2 Approche ciblée : l'île du Rhin, au droit de la centrale

2.2.2.1 Intérêt de la zone

Après observation de l'ensemble des orthophotographies disponibles, la zone de l'île du Rhin comprise sur le territoire d'étude (Figure 12) se place comme zone à forte potentialité en termes de naturalité au sein du socio-écosystème. En effet, la zone est recouverte par un grand complexe forêts/prairies en 1951. Ce complexe, bien que changeant depuis cette date, reste visible sur l'ensemble des cinq autres orthophotographies (1956, 1997, 2007, 2012, 2018). De plus, cette zone expose un intérêt particulier puisque dans le cadre des futurs projets de transition écologique prenant place sur le socio-écosystème de Fessenheim, la Communauté de Communes du Pays Rhin Brisach (CCPRB) en partenariat avec le Conservatoire des Sites Alsaciens (CSA) et EDF, ont comme projet la réhabilitation écologique des anciens bassins de stockage des mines domaniales de potasses d'Alsace (Figure 12). Cet ensemble de bassins d'une superficie de 28,2 ha est élaboré en 1960 sur l'île du Rhin afin de régulariser les rejets de saumures provenant des mines du bassin potassique alsacien (CSA, 2018). Bien que leur fonctionnement ait été effectif entre 1960 et 1976 ainsi que sur trois courtes périodes en 1980, 1981 et 1988 (CSA, 2018), ceux-ci sont actuellement à l'abandon. Le projet de réhabilitation des bassins de stockage, dont l'étude de faisabilité a été réalisée de 2007 à 2010, s'inscrit dans un contexte particulier, la fermeture de la centrale nucléaire de Fessenheim. En effet, face à cette fermeture source potentielle de chamboulements en termes d'attractivité territoriale, le projet est ainsi présenté comme vecteur d'attractivité conséquent pour l'île du Rhin, qui bien souvent est perçue comme

déconnectée et difficilement accessible pour la population locale et les touristes (CSA, 2018).

Le projet, dont la phase de travaux était initialement prévue pour l'année 2020, verra ses différents travaux initiés à l'horizon 2021. Le projet s'articule autour de 4 types de travaux et d'aménagements. Les deux premiers concernent : **(1)** la réhabilitation des bassins de stockage de saumure par prélèvement en eau via le GCA dans le but de créer une zone humide de type marais (habitats visés : roselières, zones d'eau libre, vasières exondables, mares phréatiques, fourrés humides), **(2)** la réouverture de 12 ha de pelouses sèches calcicoles afin de permettre la mise en place d'un corridor biologique de pelouses sèches sur l'île du Rhin. Les deux seconds sont liés à l'accueil du public sur le site avec : **(3)** l'aménagement d'une aire d'accueil du public, **(4)** l'aménagement d'un circuit de découverte.

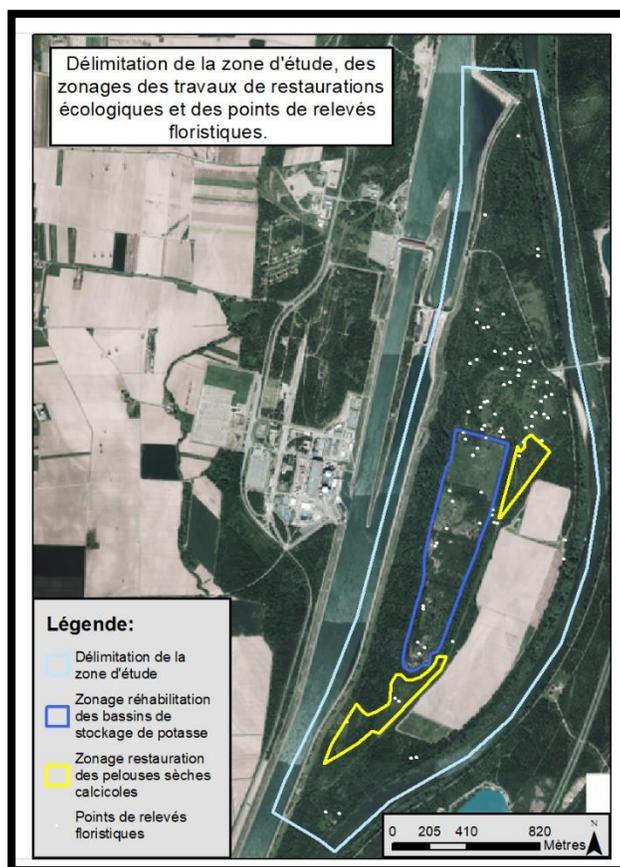


Figure 12: Délimitation de la zone d'étude dans le cadre de l'études des communautés végétales.

La figure suivante présente les limites de la zone d'étude ainsi que le zonage des deux travaux de restaurations écologiques en projet (Figure 12).

2.2.2.2 Analyse structurelle et fonctionnelle des communautés végétales locales

L'épidémie de COVID-19 a rendu impossible l'acquisition, initialement prévue, de données floristiques sur le terrain. Ainsi, les données concernant les communautés végétales en place ont été fournies, après demande, par le Conservatoire des Sites Alsaciens (CSA). Elles proviennent de relevés floristiques réalisés entre 2002 et 2017 par le CSA dans le cadre du projet INTERREG "Redynamisation du Vieux Rhin". Les données sont datées, géolocalisées et contiennent des relevés floristiques. Il ne s'agit pas de relevés phytosociologiques décrivant la surface occupée par chacune des espèces au sein du point de relevé, mais un relevé floristique simple exposant uniquement les espèces présentes. Sur les 133 relevés que compte le fichier, 122 sont situés au sein de l'île du Rhin. Les données ayant été acquises sur une période relativement longue, entre 2002 et 2017, il a été important de cantonner notre future analyse à une date unique. Le choix de la date s'est porté à l'année 2010, relativement proche temporellement et disposant du plus grand nombre de relevés floristiques. Un total de 82 relevés floristiques a donc pu être isolés en prenant comme critères de sélection leur présence au sein de la zone d'étude et leur réalisation pendant l'année 2010. Plusieurs métriques structurelles ont été calculées telles que la richesse, i.e. le nombre d'espèces présentes par relevé.

Une recherche approfondie au sein de la littérature scientifique sur les traits fonctionnels des espèces végétales locales a permis d'identifier huit indicateurs pertinents pour l'étude de la naturalité des milieux. Les six premiers correspondent aux coefficients d'Ellenberg pondérés à la situation française. Ceux-ci ont été obtenus suite à une requête au sein de la base de données baseflor de CATMINAT (Julve, 1998). Ils décrivent, à travers un coefficient propre à chaque espèce, sa tolérance à une contrainte physico-chimique de son environnement. Les 6 coefficients d'Ellenberg ainsi sélectionnés sont les suivants :

- la tolérance d'une espèce à la lumière (entre espèces hypersciaphiles et hyperhéliophiles; tableau 5)
- la tolérance d'une espèce à la température (entre espèces alpines et thermoméditerranéennes ; tableau 5)
- la tolérance d'une espèce à l'humidité édaphique (entre espèces hyperxérophiles et aquatiques profondes ; tableau 5)
- la tolérance d'une espèce à la réaction du sol (pH) (entre espèces hyperacidophiles et hyperbasophiles ; tableau 5)
- la tolérance d'une espèce aux nutriments du sol (entre espèces hyperoligotrophiles et polytrophiles ; tableau 5)
- la tolérance d'une espèce à la texture du sol (entre substrat argileux et dalles ; tableau 5)

Un 7ème indice a été jugé pertinent, celui de l'Hémérobie (Walz et Stein 2014). Cet indice, compris entre 1 et 7, décrit la tolérance d'une espèce végétale à l'influence de l'homme (Tableau 5). Ainsi, les espèces dites ahémérobiques, d'un coefficient associé de 1, sont trouvées principalement dans des milieux exempts de l'influence de l'homme. Au contraire, les espèces dites métahémérobiques, d'un coefficient associé de 7, sont présentes dans des milieux où l'influence de l'homme est extrême (Tableau 5). L'acquisition de l'indice Hémérobie pour chacune des espèces présentes dans les différents relevés de notre étude, a été rendu possible par une requête à la base de données TRY (Kattge et al., 2012).

Tableau 5: Tableau des traits fonctionnels sélectionnés et leurs coefficients associés

INDICE	TX : TEXTURE DU SOL	N : NUTRIMENTS DU SOL	L : LUMIERE	R : REACTION DU SOL (PH)
1	argile	hyperoligotrophiles	hypersciaphiles	hyperacidophiles
2	intermédiaire	oligotrophiles	sciaphiles	acidophiles
3	limon	intermédiaires	intermédiaires	intermédiaires
4	sable fin	mésooligotrophiles	hémisciaphiles	acidoclines (pH<5,5)
5	sable grossier	mésotrophiles	intermédiaires	intermédiaires
6	graviers	mésoeutrophiles	hémihéliophiles	neutroclines (pH>5,5)
7	galets	intermédiaires	intermédiaires	neutrophiles
8	blocs, fentes des parois	eutrophiles	héliophiles	basophiles

9	dalle	polytrophiles	hyperhéliophiles	hyperbasophiles
---	-------	---------------	------------------	-----------------

INDICE

T : TEMPERATURE

HE : HUMIDITE EDAPHIQUE

1	alpines à nivales, altiméditerranéennes	hyperxérophiles (sclérophiles, ligneuses microphylls, réviscentes)
2	subalpines, oroméditerranéennes	perxérophiles (caulocrassulescentes subaphylles, coussinets)
3	montagnardes	xérophiles (velues, aiguillonnées, cuticule épaisse)
4	collinéennes, psychroatlantiques	mésoxérophiles
5	planitiaies à montagnardes	mésohydriques
6	planitiaies thermophiles, thermoatlantiques, thermocontinentales, subméditerranéennes, supraméditerranéennes	mésohygrophiles
7	euryméditerranéennes, méditerranéo-atlantiques	hygrophiles (courtement inondables, en semaines)
8	mésoméditerranéennes	hydrophiles (longuement inondables, en mois)
9	thermoméditerranéennes à subdésertiques	amphibies saisonnières (hélrophytes exondés une partie minoritaire de l'année)
10		amphibies permanentes (hélrophytes semi émergés à base toujours noyée)
11		aquatiques superficielles (0-50cm)
12		aquatiques profondes (1-3m)

INDICE

HEM: HEMEROBIE

1	ahémérobique (sans influence humaine)
2	oligohémérobique (influence humaine faible)
3	mésohémérobique (influence humaine modérée)
4	beta-euhémérobique (influence humaine modérée à forte)
5	alpha-euhémérobique (influence humaine forte)
6	polyhémérobique (influence humaine très forte)
7	metahémérobique (influence humaine très fort à biocénose détruit)

La valeur des coefficients des 7 indicateurs a ensuite été associée à la liste des espèces végétales présentes sur l'ensemble des relevés floristiques de notre étude. Chaque espèce de cette liste se voit donc associer 7 valeurs correspondant aux 7

coefficients préalablement sélectionnés afin de former 7 tableaux d'indicateurs par espèces.

- **Association du tableau d'absence/présence et des tableaux des indicateurs par espèces**

Avec l'aide d'un script R permettant d'associer le tableau d'absence/présence d'espèces végétales par relevé et les tableaux des indicateurs par espèces végétales, sept tableaux ont pu être obtenus. Le script R permet d'assigner à chaque présence d'une espèce végétale au sein d'un relevé (présence = 1), la valeur de l'indicateur qui lui correspond. Dans le cas de l'absence d'une espèce au sein du relevé (absence = 0), la valeur 'na' (non applicable) lui est associée. Les moyennes, pour chaque colonne (relevés de végétation) des huit tableaux, ont ensuite été calculées en excluant les valeurs "na" afin de ne pas fausser les calculs.

2.3. Trajectoires sociologiques et démographiques mises en regard des dynamiques et indices paysagers

Dans l'objectif de définir et quantifier de potentiels impacts ou influences de la construction et l'exploitation du CNPE ainsi que la construction de tout autre ouvrage et aménagement sur la zone et pendant la période étudiée, il est important de s'intéresser à une potentielle interrelation entre les trajectoires et les évolutions de l'occupation du sol du SES de Fessenheim et les trajectoires sociologiques et démographiques de la commune.

2.3.1 Trajectoire démographique

La trajectoire démographique de la commune de Fessenheim peut être traduite par l'analyse de l'évolution quantitative de sa population. Pour ce faire, les données du nombre d'habitants de la commune ont été obtenues suite à une requête au sein de la base de données de l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Études Économiques) pour la période entre 1968 et 2017 (date du dernier recensement) et la

base de données Cassini de l'EHESS (Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales) pour la période entre 1951 et 1968. L'ensemble de ces deux sources de données permettent, à travers onze dates de recensement de couvrir l'ensemble de la période d'étude.

2.3.2 Trajectoire sociologique

La trajectoire sociologique de la commune de Fessenheim permet d'expliquer l'évolution des catégories socio-professionnelles de la population active de la commune (25 à 54 ans). Les données concernant les catégories socio-professionnelles ont été acquises suite à une requête au sein de la base de données historiques des recensements de l'INSEE pour la période 1968 et 2016. Les données suivent une nomenclature propre à l'INSEE et divise la population active entre six catégories : les agriculteurs, les cadres et professions intellectuelles supérieures, les ouvriers, les artisans, les professions intermédiaires et les employés. Le profil et la trajectoire sociologique n'ont été déterminés qu'à partir de 1968, date du premier recensement de l'INSEE.

Chapitre III : *Résultats*

Chapitre III : Résultats

3.1. Dynamique des paysages et des usages sur le territoire de Fessenheim

3.1.1 Analyses paysagères de 1951 à 2018

Afin d'appréhender les modifications spatiales et temporelles ayant contribué à l'évolution du socio-écosystème de Fessenheim tout au long des 67 années de notre étude, une analyse fine des six rasters issus du travail de digitalisation a été réalisée selon deux approches : (i) **descriptive** : changements dans la représentativité des classes typologiques choisies et surfaces, et (ii) **quantitative** : nature, localisation et quantification des transitions.

3.1.1.1 Approche descriptive et variations surfaciques

Dans cette partie, l'ensemble des évolutions surfaciques des différentes classes d'occupation et d'usage du sol se fera par la lecture et l'analyse du tableau ci-dessous (Tableau 6) ainsi que par l'analyse des 6 rasters issus du travail de digitalisation.

Tableau 6: Evolution de 1951 à 2018 des surfaces en ha pour l'ensembles des classes d'occupation et d'usage des sols

	Surface (ha)					
	1951	1956	1997	2007	2011	2018
Classes d'occupation et d'usage du sol :						
Habitats Continus (111)	20,80	22,22	72,68	79,10	79,62	79,81
Habitats Discontinus (112)	0,63	6,57	5,34	6,70	6,70	6,70
Emprises industrielles, commerciales, artisanales (121)	0,51	0,62	48,32	55,32	59,61	63,17
Zones de travaux, chantiers et remblais (124)	0,00	121,92	1,95	0,00	0,00	0,00
Emprises réseau ferré (125)	1,85	0,00	2,50	2,50	2,50	2,45
Emprises réseau routier (126)	15,74	24,50	44,86	48,10	48,94	50,15
Chemins (127)	16,85	14,12	13,01	11,49	11,28	9,54
Emprises hydroélectriques (128)	0,00	28,35	25,50	26,63	26,69	26,80

Espaces verts urbains (131)	3,79	26,89	21,54	30,40	29,28	22,89
Equipements sportifs et de loisirs (132)	0,00	0,00	3,01	2,94	2,94	2,94
Emprises agricoles (210)	730,42	706,24	671,47	647,76	647,75	647,94
Emprises liées à l'agriculture (222)	0,31	1,62	7,17	7,95	7,95	7,95
Végétations arborescentes (310)	324,58	176,28	345,28	360,81	362,21	376,39
Ripisylves (320)	2,23	2,19	4,55	4,37	4,26	4,26
Végétations herbacées (340)	311,57	217,95	88,05	79,16	76,59	65,49
Sols nus (350)	0,00	0,05	11,28	5,19	1,98	0,75
Cours d'eau principaux (410)	88,63	64,28	50,79	49,19	49,27	50,36
Canaux principaux (411)	0,00	98,82	99,70	99,70	99,70	99,70
Etangs et lacs (412)	0,00	5,28	0,90	0,57	0,57	0,57

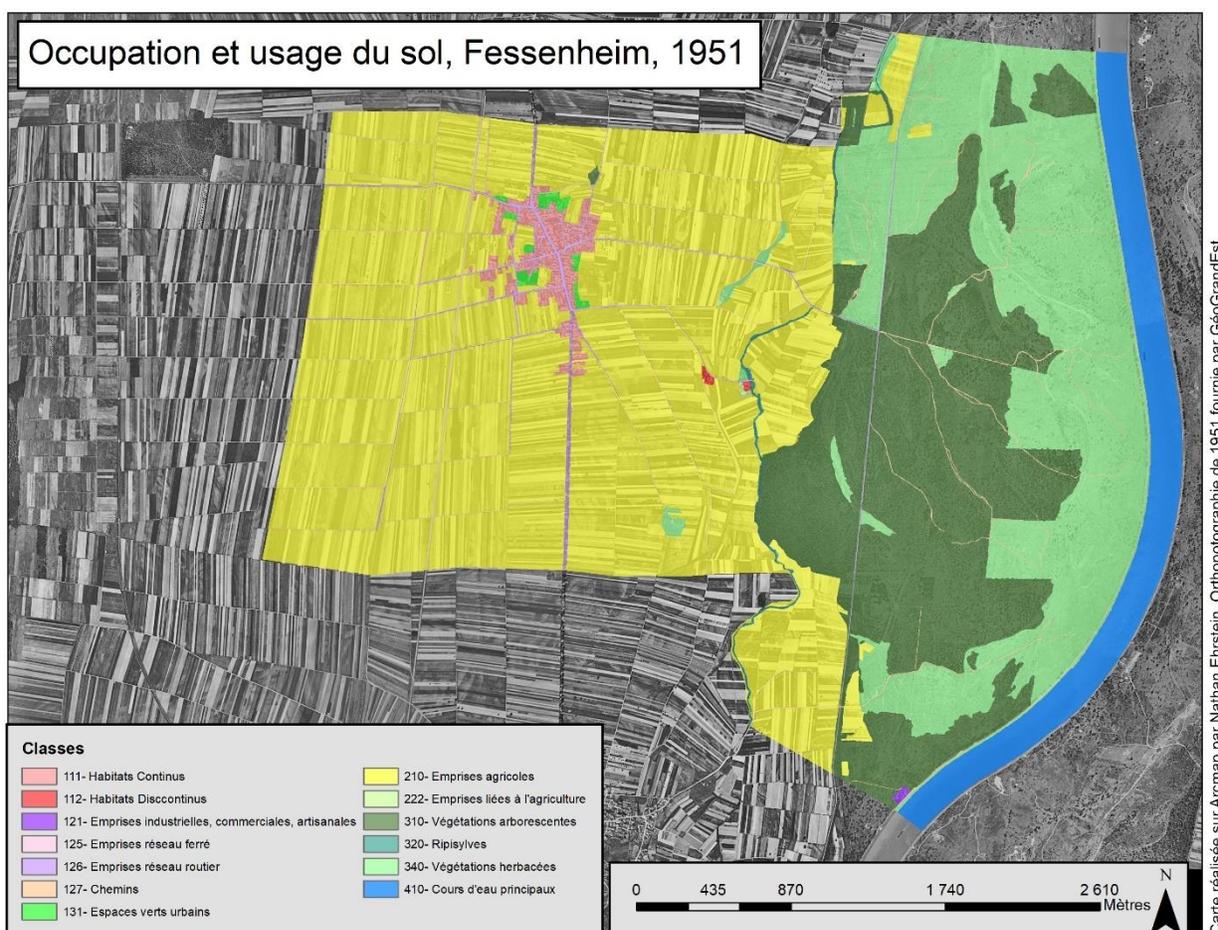


Figure 13: Occupation du sol en 1951

En 1951, le site d'étude est principalement marqué dans sa partie ouest par un complexe de parcelles agricoles (730 ha, Figure 13, Tableau 6) ainsi qu'une zone

urbanisée, le village de Fessenheim (environ 21 ha en comptabilisant les habitats continus et les emprises industrielles, commerciales et artisanales) concentrée autour des grands axes de communications alors présents. Dans sa partie est, le site d'étude est marqué par une forte représentativité de zones forestières (végétations arborescentes, 325 ha, Figure 13, Tableau 6), de zones prairiales (végétations herbacées, 312 ha, Figure 13, Tableau 6) ainsi que le Rhin historique (88,6 ha, Figure 13, Tableau 6). L'analyse de l'occupation du sol en 1951 permet donc de dégager un dimorphisme profond entre une partie ouest, très anthropisée et principalement représentée par des terres agricoles et à moindre mesure de terres urbanisées, et une partie est, faiblement anthropisée, proche du Rhin, où sont principalement présentes des zones forestières et prairiales.

L'année 1956 est la première date qui témoigne d'un changement profond dans l'occupation du sol de l'emprise d'étude *via* la construction du Grand Canal d'Alsace (GCA) et l'installation de la centrale hydroélectrique de Fessenheim, achevée en 1956 (GCA 98,6 ha et emprises hydroélectriques 28,4 ha, Figure 14, Tableau 6). Il en découle (i) une régression importante des zones forestières (- 149 ha, Figure 14, Tableau 6) et prairiales (-94 ha, Figure 14, Tableau 6), (ii) l'apparition de zones mises à nu par les travaux (122 ha, Figure 14, Tableau 6), ainsi que (iii) l'apparition de deux cités ouvrières ayant pour conséquence l'augmentation de la surface en habitats discontinus (+ 5,94 ha, Figure 14, Tableau 6). L'une d'entre elles, temporaire (2, Figure 14), a servi au logement des ouvriers travaillant à l'aménagement du GCA et à la construction de la centrale hydroélectrique (Meyer 2020) - la seconde, plus connue, est la cité Koechlin (1, Figure 14), ayant pour utilité le logement des ouvriers et techniciens chargés de l'exploitation de la nouvelle centrale hydroélectrique (Meyer 2020). L'Île du Rhin a été créée suite à la construction du GCA et est située entre le GCA et le Rhin historique. Son accessibilité est rendue possible par l'écluse de la centrale hydroélectrique de Fessenheim (3, Figure 14). Sur l'Île du Rhin, une zone de grande taille a été mise à nu par les travaux et constitue l'emplacement du futur complexe de bassins de stockage et de décantation de potasse (4, Figure 14), provenant du bassin potassique alsacien (situé au nord de Mulhouse, sud-

est de Fessenheim), dont l'aménagement a rendu possible son exploitation à partir de 1960 (CSA, 2018).

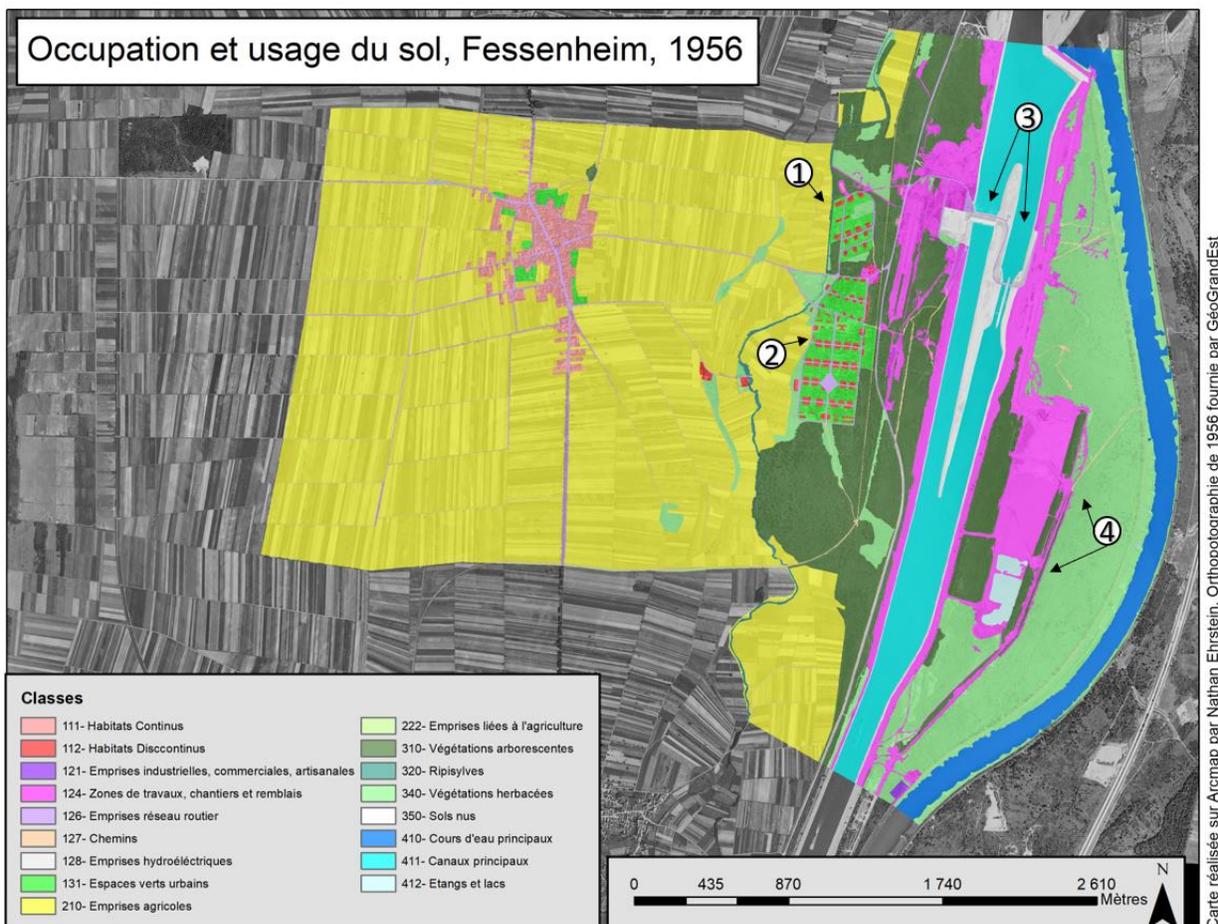


Figure 14: Occupation du sol en 1956, (1) Cité Koechlin (2) Cité temporaire (3) Centrale hydroélectrique de Fessenheim (4) Bassins de décantation de saumure.

Plus de 41 ans séparent les dates de 1956 et 1997. En 1997, trois grandes zones ont subi des changements importants : (i) la partie ouest de la zone d'étude, (ii) la rive ouest du GCA et (iii) l'île du Rhin. Dans la partie ouest de la zone d'étude, on peut observer une augmentation significative de la classe typologique "habitats continus" traduisant l'expansion du village de Fessenheim (+50,5 ha, Figure 15, Tableau 6). Le CNPE de Fessenheim, dont la construction fut achevée en 1977, est apparue en rive

ouest du GCA (1, Figure 15). La construction de la centrale a entraîné une augmentation de la classe “emprises industrielles, commerciales et artisanales” (+47,68ha, Figure 15, Tableau 6). Des changements connexes sont également à mentionner tels que le développement du réseau routier, avec un premier axe nord-sud parallèle au GCA et un second reliant le CNPE au village de Fessenheim (+20,4ha, Figure 15, Tableau 6).

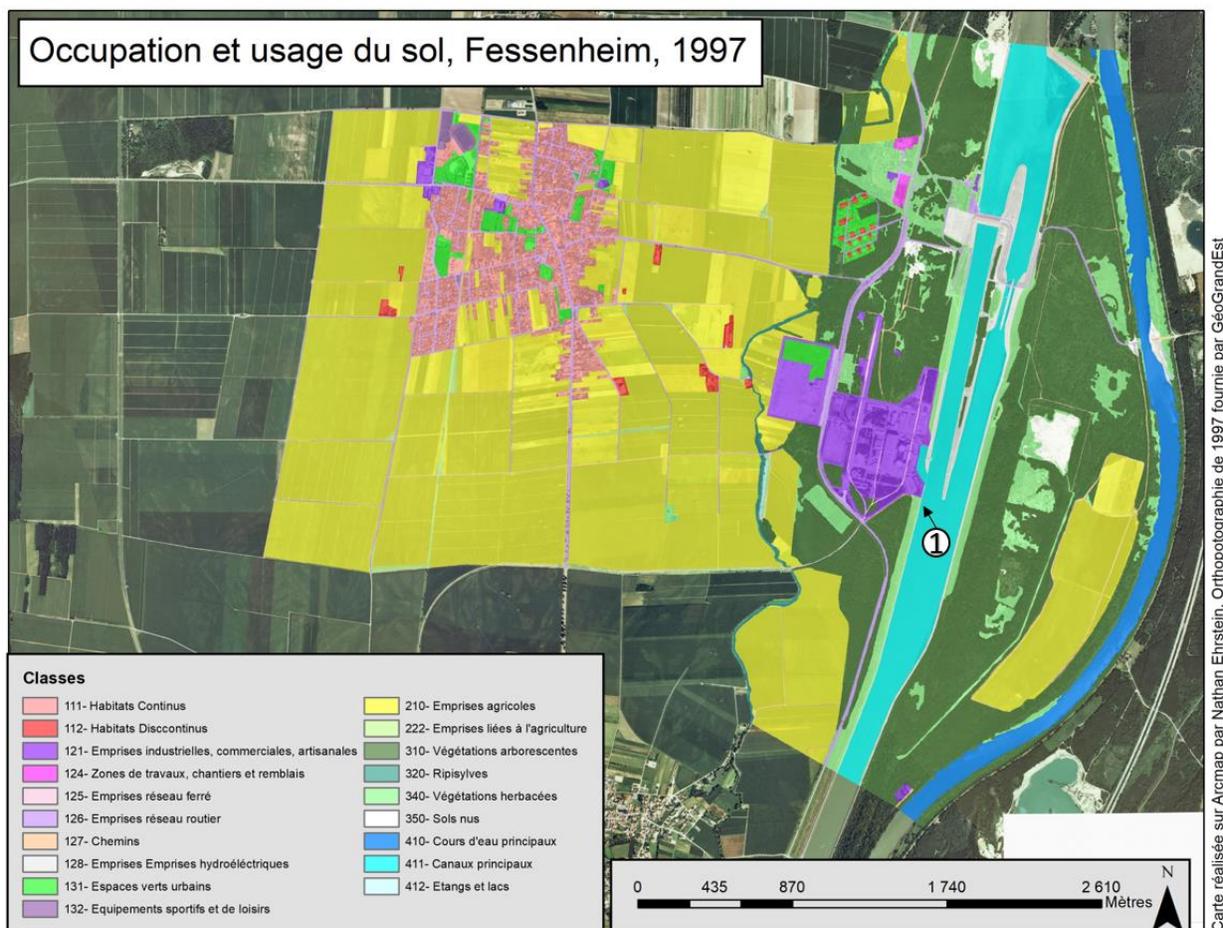


Figure 15: Occupation du sol en 1997 (1) CNPE de Fessenheim.

La cité ouvrière temporaire a disparu à cette date. L'île du Rhin témoigne, quant à elle, d'un reboisement massif (+169 ha, Figure 15, Tableau 6), d'un recul des espaces prairiaux (-129,9 ha, Figure 15, Tableau 6) et de l'apparition d'une parcelle agricole.

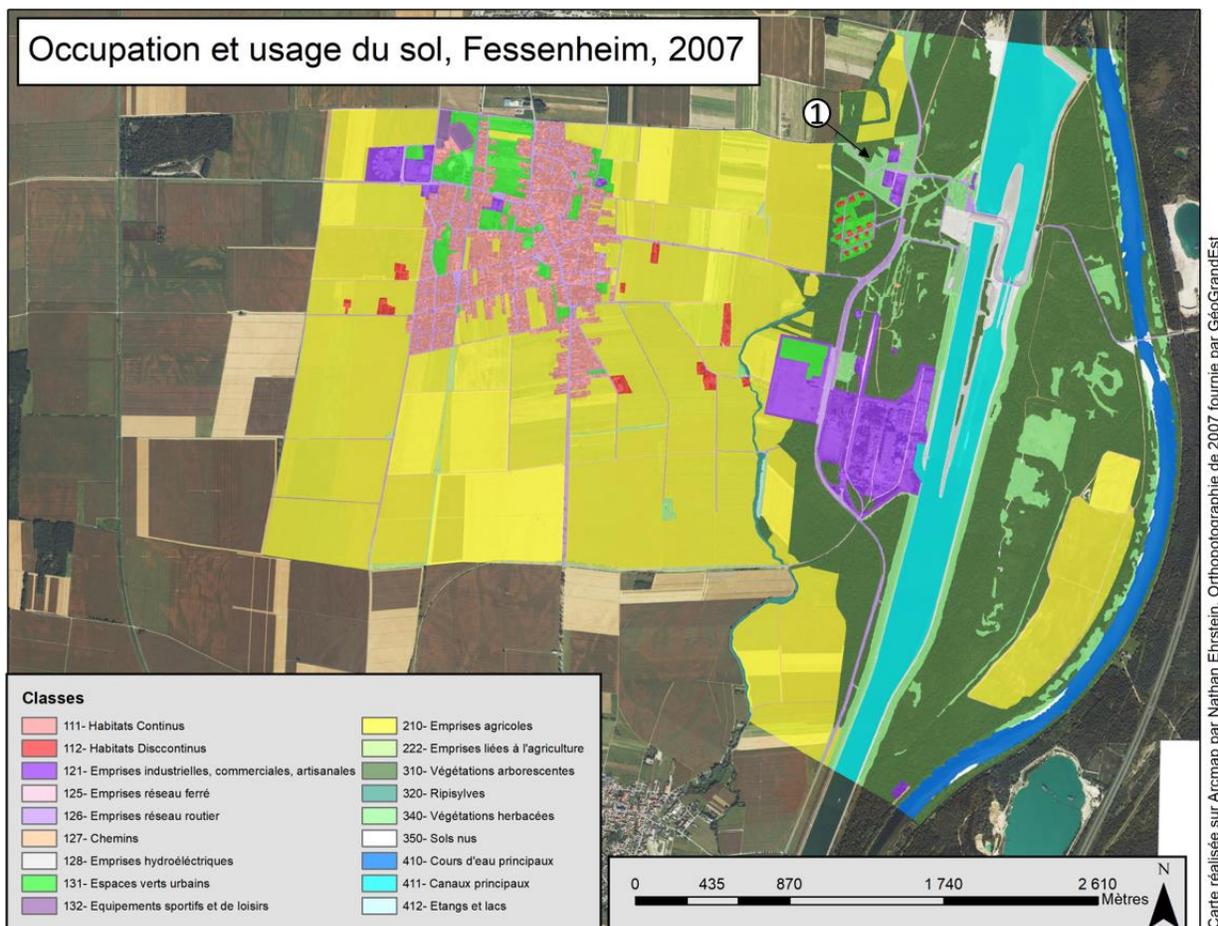


Figure 16: Occupation du sol en 2007, (1) Zone d'Activités Koechlin

Les changements sont moindres en 2007, concernant uniquement des variations surfaciques localisées au niveau du village de Fessenheim, où l'on y observe une expansion du bâti résidentiel (augmentation de 6,4 ha des habitats continus, Figure 16, Tableau 6) et une augmentation des espaces verts urbains (+8,9 ha, Figure 16, Tableau 6). L'augmentation des emprises industrielles, commerciales et artisanales (+7ha, Figure 16, Tableau 6) traduit la création d'une zone industrielle (ZA Koechlin ; (1) Figure 16) au nord de la cité Koechlin mais également celle d'une zone commerciale à l'ouest du village. La faible augmentation en habitats discontinus est expliquée par la construction de plusieurs bâtiments à visée agricole en périphérie du bourg. L'ensemble de ces augmentations surfaciques semblent se faire au détriment des parcelles agricoles qui diminuent de 23 ha (Tableau 6). Les phénomènes de reboisement de l'Île du Rhin, observés en 1997, sont encore ici de plus faible ampleur. En effet, on constate une

augmentation de la végétation arborescente (+16 ha, Figure 16, Tableau 6) et une diminution conjointe de la végétation herbacée (-8,9ha, Figure 16, Tableau 6). En 2007, un élément structurant dans le paysage apparaît, le Pont du Rhin. Il surplombe le Rhin historique et relie l'Île du Rhin avec l'Allemagne, rendant possible les déplacements routiers et piétons entre la commune de Fessenheim et la commune de Hartheim.

En 2011, les changements d'occupation du sol sont plus rares. Au sein du village de Fessenheim, la surface du bâti résidentiel augmente légèrement (0,2 ha, Figure 17 Tableau 6) et la surface des espaces verts urbains diminue (-1,1 ha, Figure 17 Tableau 6).

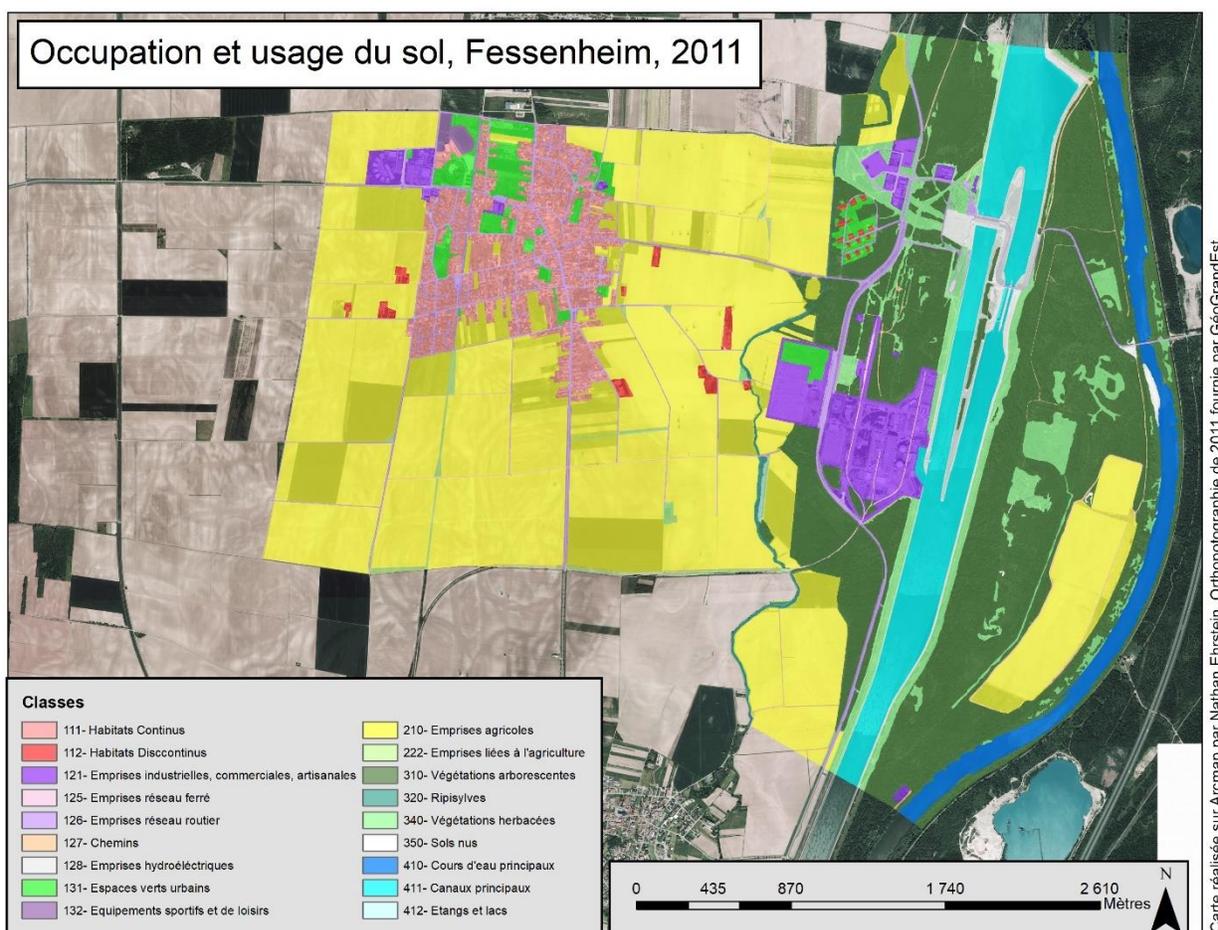


Figure 17: Occupation du sol en 2011

De nouvelles constructions sont observées au sein de la ZA Keochlin et de la zone commerciale située à l'ouest du village, augmentant ainsi la surface des emprises industrielles, commerciales et artisanales (+3,6 ha, Figure 17, Tableau 6). Tout comme en 1997 et en 2007, l'Île du Rhin, est sujette à une expansion des surfaces boisées au détriment des surfaces prairiales. En effet, on constate une augmentation de la végétation arborescente (+14 ha, Figure 17, Tableau 6) et une diminution conjointe de la végétation herbacée (-11,1 ha, Figure 17, Tableau 6).

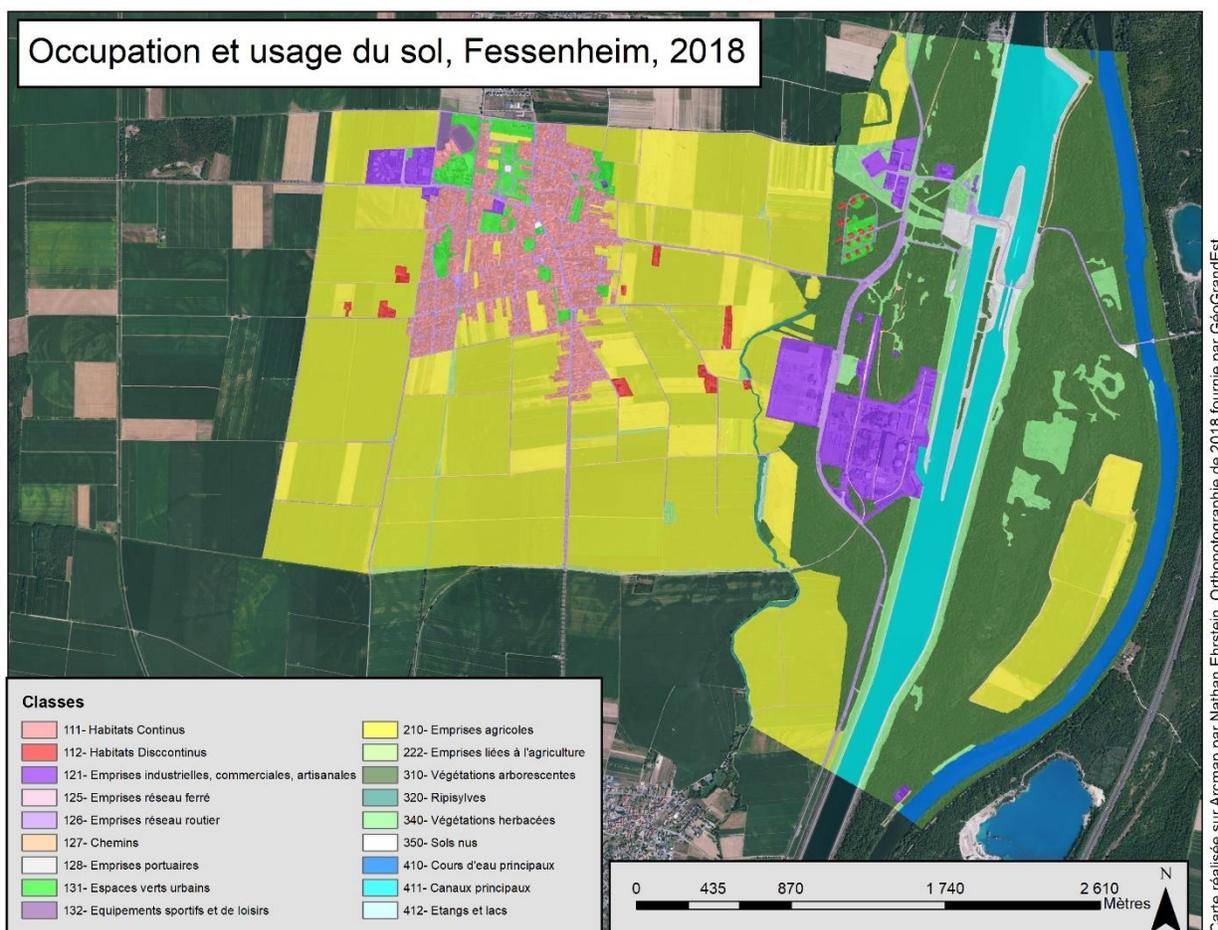


Figure 18: Occupation du sol en 2018

En 2018, les changements d'occupation et d'usage du sol ne concernent plus que de très faibles surfaces. Au niveau de la commune de Fessenheim, une très faible augmentation en habitats continus a été observée (+0,2 ha, Figure 18, Tableau 6) et les espaces verts urbains ont diminué (-6,4 ha, Figure 18, Tableau 6). Au niveau du CNPE, un agrandissement du "parc de transformateurs électriques" a eu pour conséquence

d'augmenter la surface des emprises industrielles, commerciales et artisanales (3,6 ha, Figure 18, Tableau 6). Globalement, la végétation arborescente a nettement augmenté alors que la végétation herbacée a clairement diminué (+14 ha et -11,1 ha, Figure 18, Tableau 6).

3.1.2 Analyse quantitative fine des dynamiques et des transitions paysagères

La première approche nous a permis d'appréhender les spécificités du territoire de Fessenheim au cours des 62 dernières années, en termes de surfaces d'occupations et d'usages du sol. Des premières hypothèses ont été formulées quant aux sources de changement. Afin de confirmer ou infirmer ces hypothèses, une analyse quantitative fine a été menée pour identifier les dynamiques et caractériser les transitions paysagères au fil des événements : 1951-1956, 1956-1997, 1997-2007, 2007-2012, 2012-2018. L'analyse globale entre 1951 et 2018 a également été réalisée mais ne sera pas détaillée dans le présent rapport (voir Annexe 1).

Analyse de la transition entre 1951 et 1956

L'aménagement et la construction du GCA et des ouvrages hydroélectriques associés sont les principales causes de changements majeurs au sein de l'emprise d'étude sur la période 1951-1956 (Figure 19).

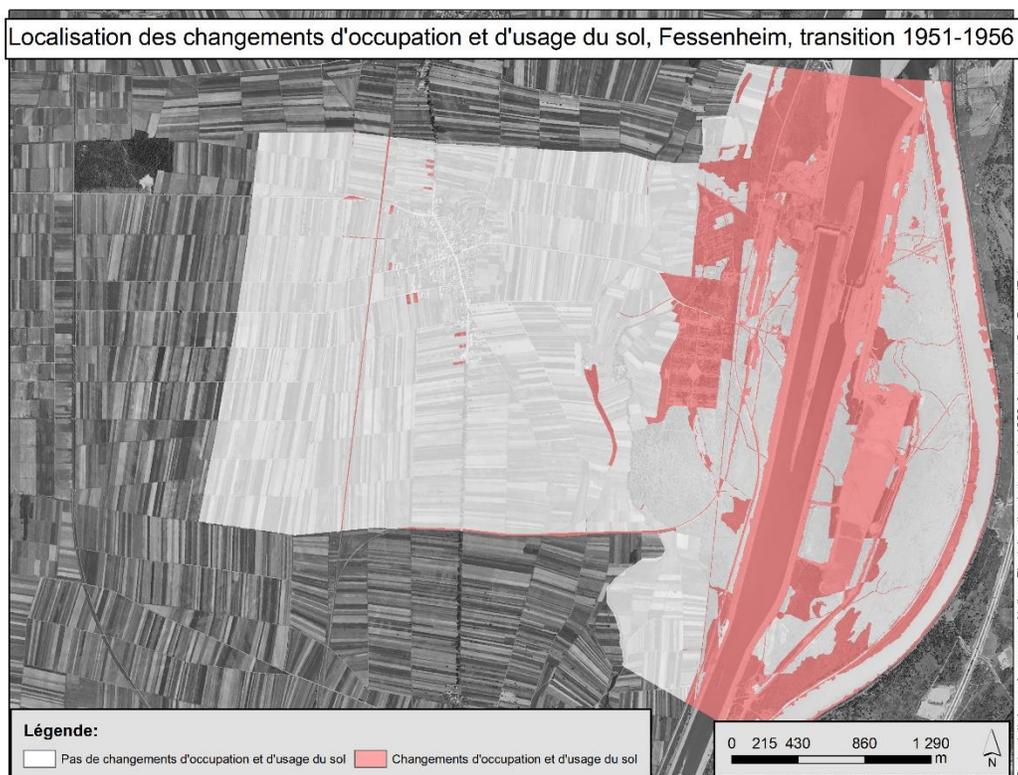


Figure 19: Localisation des changements d'occupation du sol pour la transition 1951 et 1956.

Le diagramme de flux de cette transition nous permet d'identifier que deux classes d'occupation du sol sont nettement modifiées : la végétation arborescente et la végétation herbacée (Figure 20). En effet, respectivement 4,16% et 2,16% des surfaces occupées en 1951 par ces deux classes se retrouvent occupées en 1956 par l'ouvrage lui-même (GCA- classe "canaux principaux"), 1,13% et 0,70% par les "emprises hydroélectriques" (centrale hydroélectrique, berges aménagées, écluses) associées, 4,03% et 3,84% par des zones de travaux (zones mises à nu par les travaux d'aménagements) (Figure 20).

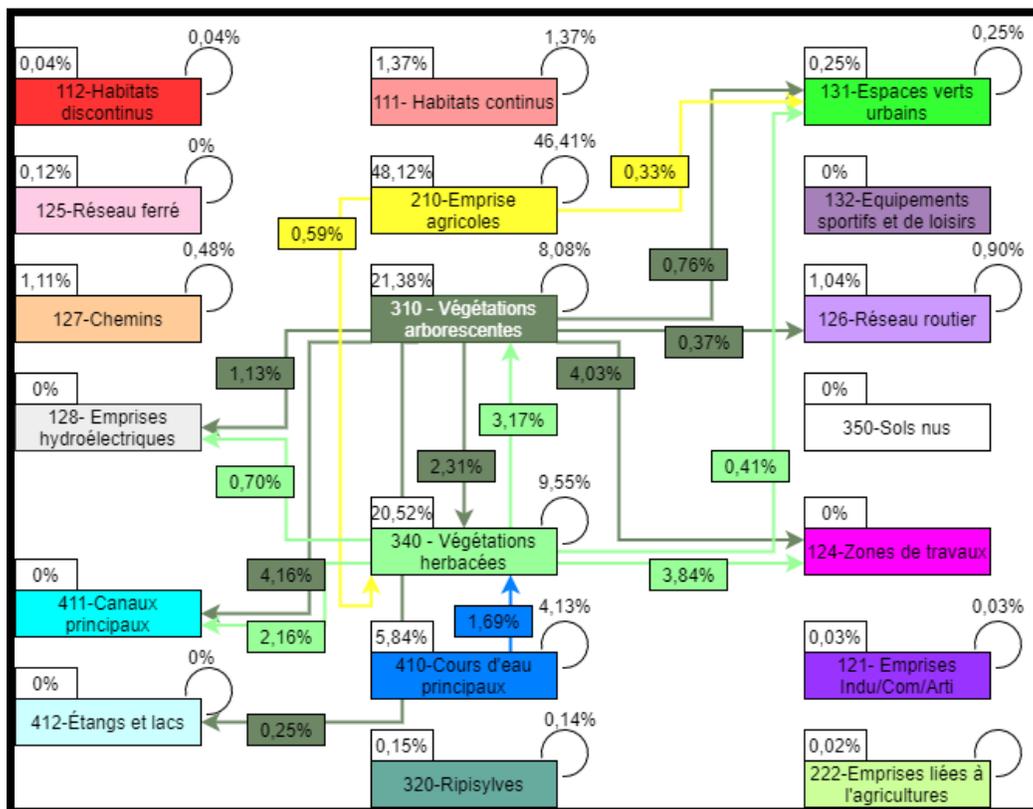


Figure 20: Diagramme de flux pour la transition 1951-1956.

Le développement du réseau routier associé à la construction du GCA prend, lui, pour source principale 0,37% de surfaces en végétation arborescente (Figure 20). Une troisième classe a subi une perte significative bien que relativement moindre en termes de surface, ce sont les emprises agricoles. En effet, 0,59% et 0,33% de surfaces occupées par des emprises agricoles se retrouvent converties en végétation herbacée et en espaces verts urbains (Figure 20). La transformation de 1,69% de surface du Rhin en végétation herbacée peut être expliquée par la réduction du débit du celui-ci lié à la construction du GCA, qui aurait eu pour effet d'élargir ses berges et de permettre l'apparition d'espèces végétales pionnières caractéristiques (Figure 20).

Analyse de la transition entre 1956 et 1997

Cette transition a été marquée par la construction de la centrale nucléaire de Fessenheim, achevée en 1977 sur la rive ouest du GCA, mais également par l'arrêt de l'activité des bassins de stockage de potasse (Figure 21), comme nous avons pu le constater sur l'analyse des rasters (chapitre 3.1.1).

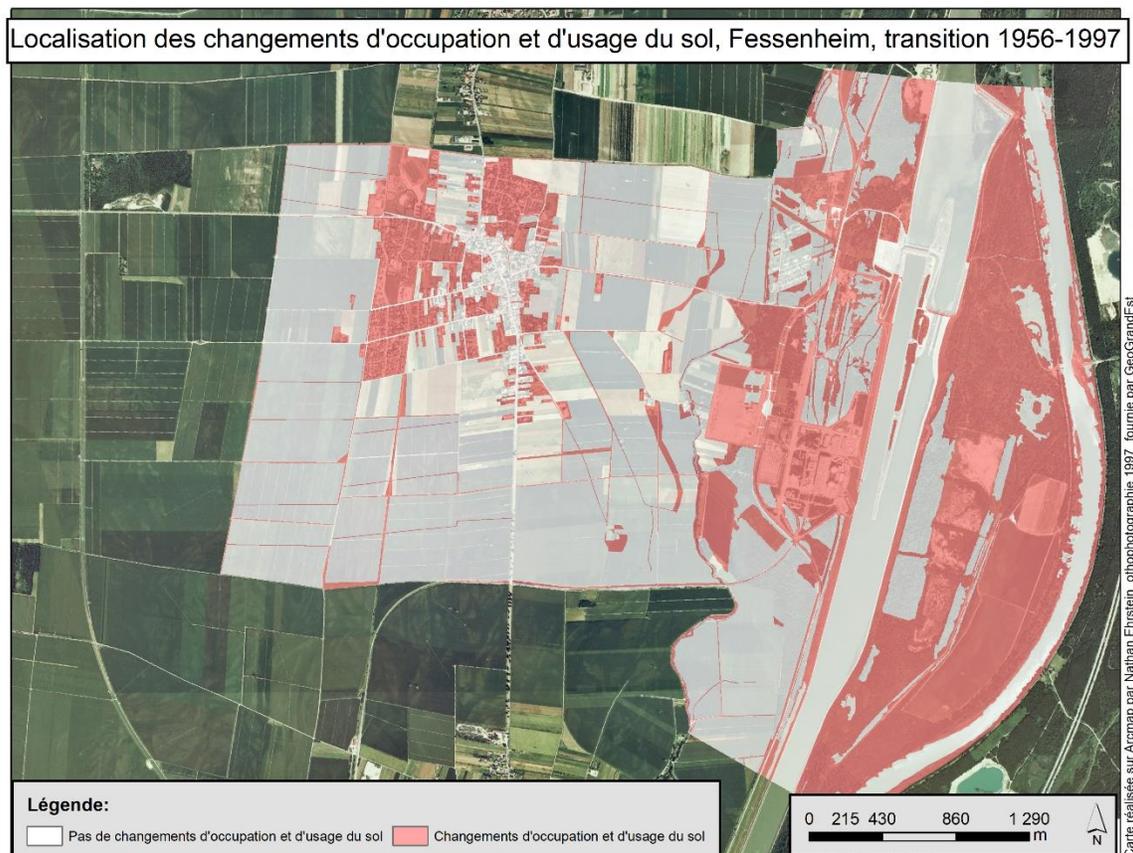


Figure 21: Localisation des changements d'occupation du sol entre la transition 1956-1997.

L'analyse du diagramme de flux de cette transition met en évidence que la construction du CNPE s'est faite, principalement, au détriment de 0,49% de surfaces précédemment occupées par des emprises agricoles et 1,65% par de la végétation arborescente (Figure 22). Les zones de travaux, principalement présentes sur l'île du Rhin et sur la rive ouest du GCA en 1956, sont le témoin d'une renaturation. En effet, respectivement 4,32% et 2,64% des surfaces recouvertes précédemment par ces zones se retrouvent recouvertes par de la végétation arborescente et de la végétation herbacée,

en 1997 (Figure 22). Les phénomènes de reboisement de l'île du Rhin observés en 1997 (chapitre 3.1.1), sont ici confirmés par la transformation de plus de 8,72% de surface en végétation herbacée en végétation arborescente (Figure 22).

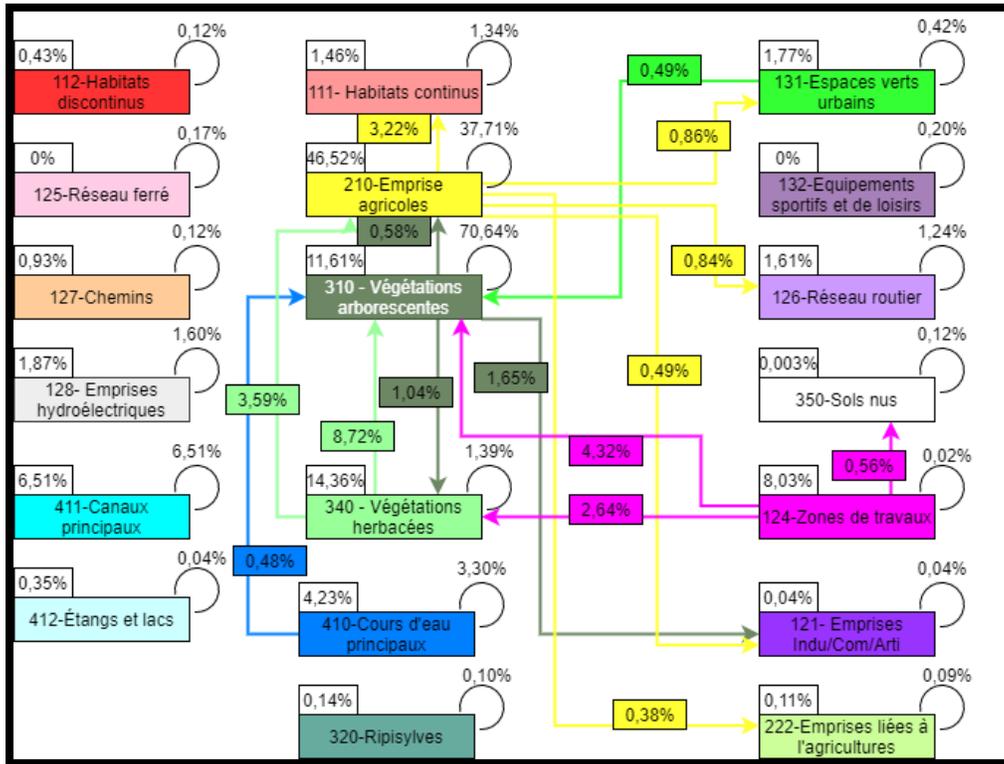


Figure 22: Diagramme de flux pour la transition 1956-1997

Au niveau de la commune de Fessenheim, on remarque une augmentation significative du bâti résidentiel (classe "habitats continus") où l'expansion du village se fait sur les parcelles agricoles limitrophes (3,22% de surface précédemment couvertes par des emprises agricoles sont occupées par des zone d'habitats continus en 1997, Figure 22 et Figure 21). Le développement de la commune de Fessenheim a, de plus, des effets connexes sur le parcellaire agricole puisque 0,86% et 0,84% de ses surfaces deviendront des espaces verts urbains et des routes (Figure 22). L'aménagement de nouvelles parcelles agricoles sur l'île du Rhin, semble contrebalancer partiellement ce phénomène, puisque 3,59% et 0,58 de végétation herbacée et arborescente se voit alors transformées en surface agricoles (Figure 22).

Analyse de la transition entre 1997 et 2007

Les changements surfaciques d'occupation et d'usage du sol sont bien moindres qu'au sein des deux transitions précédentes, ciblant des zones très localisées au niveau de : (i) le bourg de Fessenheim, (ii) l'île du Rhin et les bordures du Rhin, (iii) la ZA Koechlin (Figure 23).

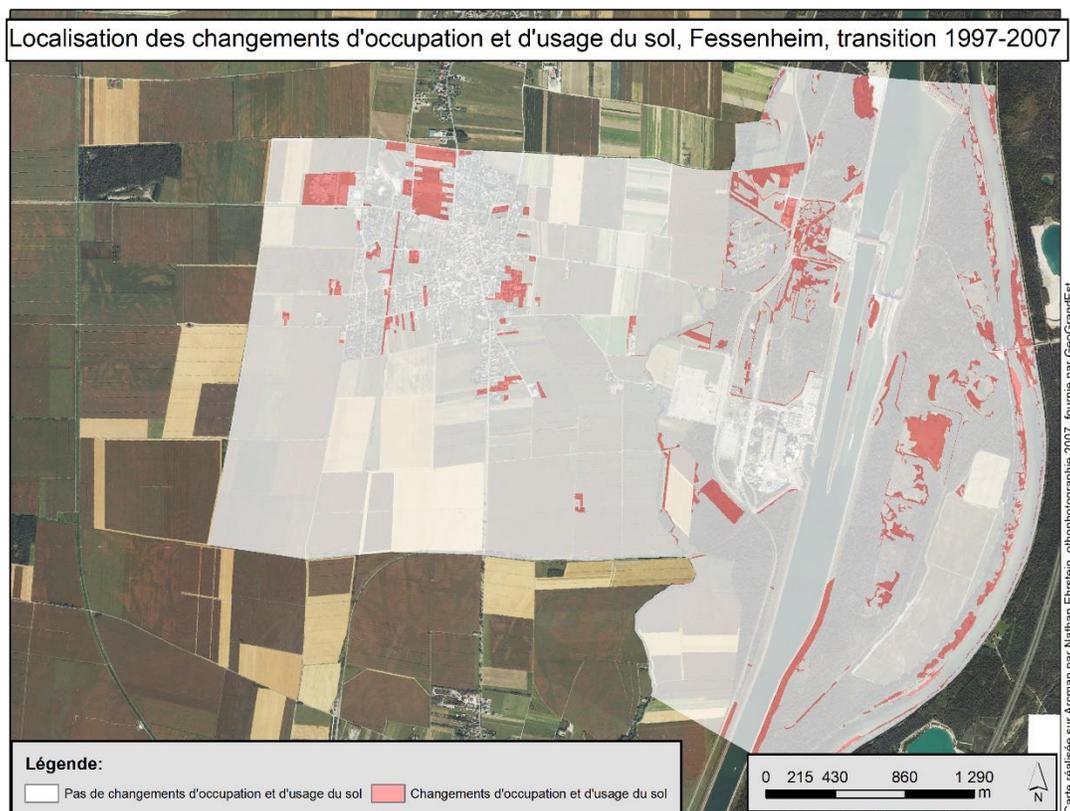


Figure 23: Localisation des changements d'occupation du sol entre la transition 1997-2007.

L'expansion et le développement de la commune de Fessenheim est encore ici visible, au détriment des emprises agricoles limitrophes (Figure 24). En effet, 0,43%, 0,31%, 0,62% et 0,9% des surfaces appartenant précédemment aux surfaces agricoles se retrouvent converties respectivement en habitats continus, en emprises industrielles, commerciales et artisanales, en espaces verts urbains et en routes (Figure 24). Cette période confirme, également, le phénomène de reboisement progressif prenant place sur l'Île du Rhin (chapitre 3.1.1). En effet, la conversion de 1,79% de surface en végétation

herbacée en végétation arborescente, ne contrebalançant pas la conversion de 0,99% de végétation arborescente en végétation herbacée, en témoin (Figure 24).

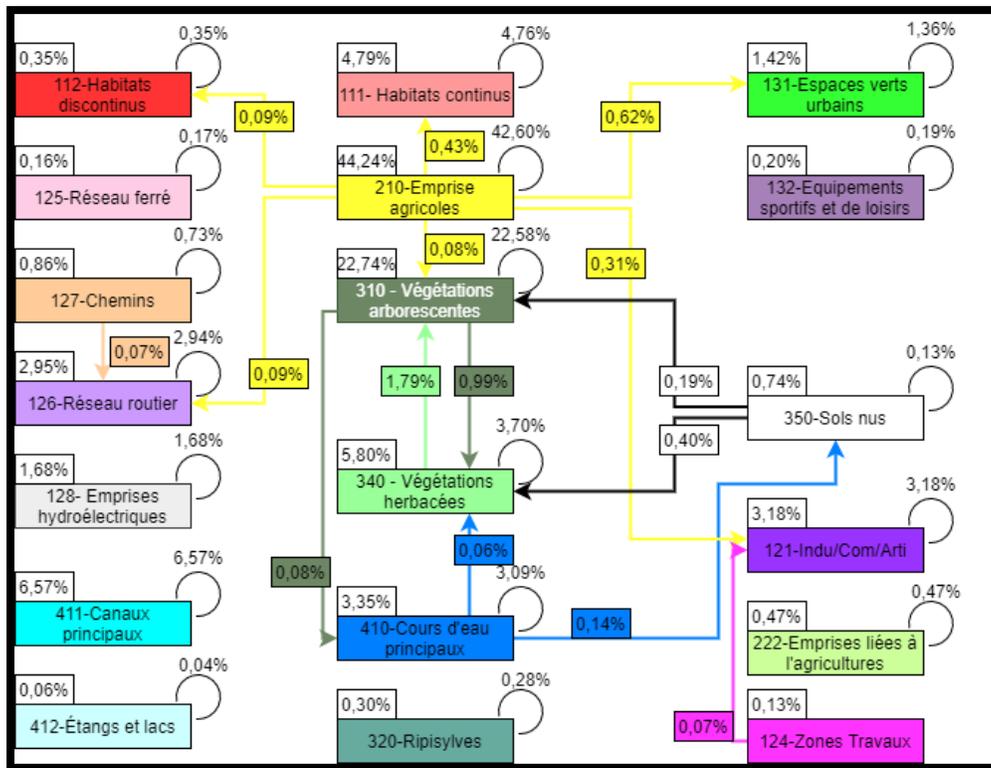


Figure 24: Diagramme de flux pour la transition 1997- 2007

La perte de 0,06% et 0,14% de surfaces occupées en 1997 par le Rhin historique (classe des "cours d'eau principaux"), convertie en végétation herbacée et en sols nus, ainsi qu'une augmentation de 0,08% provenant de végétation arborescente, semble témoigner d'une légère réduction surfacique du cours d'eau, conséquence possible des travaux de construction du pont, à cette période, reliant l'Île du Rhin à la berge Allemande .affectant ainsi la morphologie des berges du Rhin et de la végétation s'y trouvant.

Analyse de la transition entre 2007 et 2011

Cette transition concerne une période courte de quatre ans. Très peu de changements majeurs d'occupation du sol sont visibles (Figure 25). Un très faible développement du bourg de Fessenheim est à noter (Figure 25).

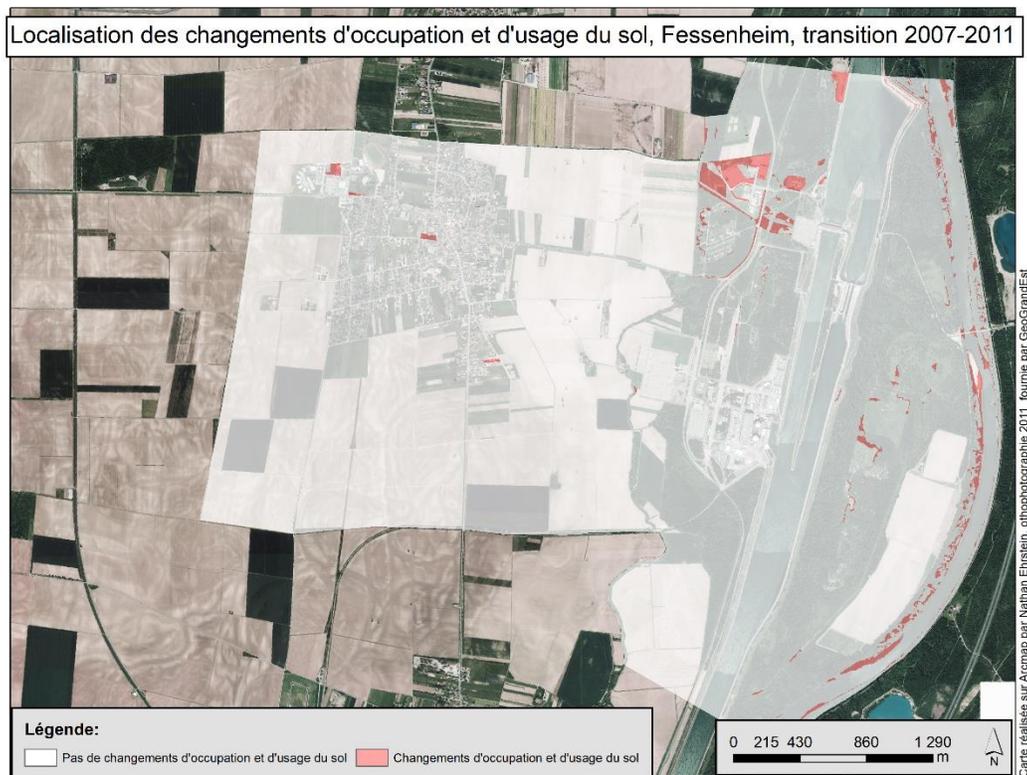


Figure 25: Localisation des changements d'occupation du sol entre la transition 2007-2011.

Contrairement à la transition précédente, l'augmentation du bâti résidentiel (habitats continus) et des emprises industrielles, commerciales et artisanales est observée au détriment de 0,03% et 0,04% de surfaces précédemment occupées par des espaces verts urbains et non plus par des parcelles agricoles (Figure 26). Cette période est aussi le témoin d'un développement conséquent de la ZA Koechlin (Figure 26), qui se fait au détriment de 0,16% de surface prairiale et 0,09% de surface arborée. Le développement de celle-ci expose une conséquence connexe, le défrichement de la zone, visible sur la Figure 25, participant au recul de 0,44% de surfaces recouvertes par de la végétation arborescente

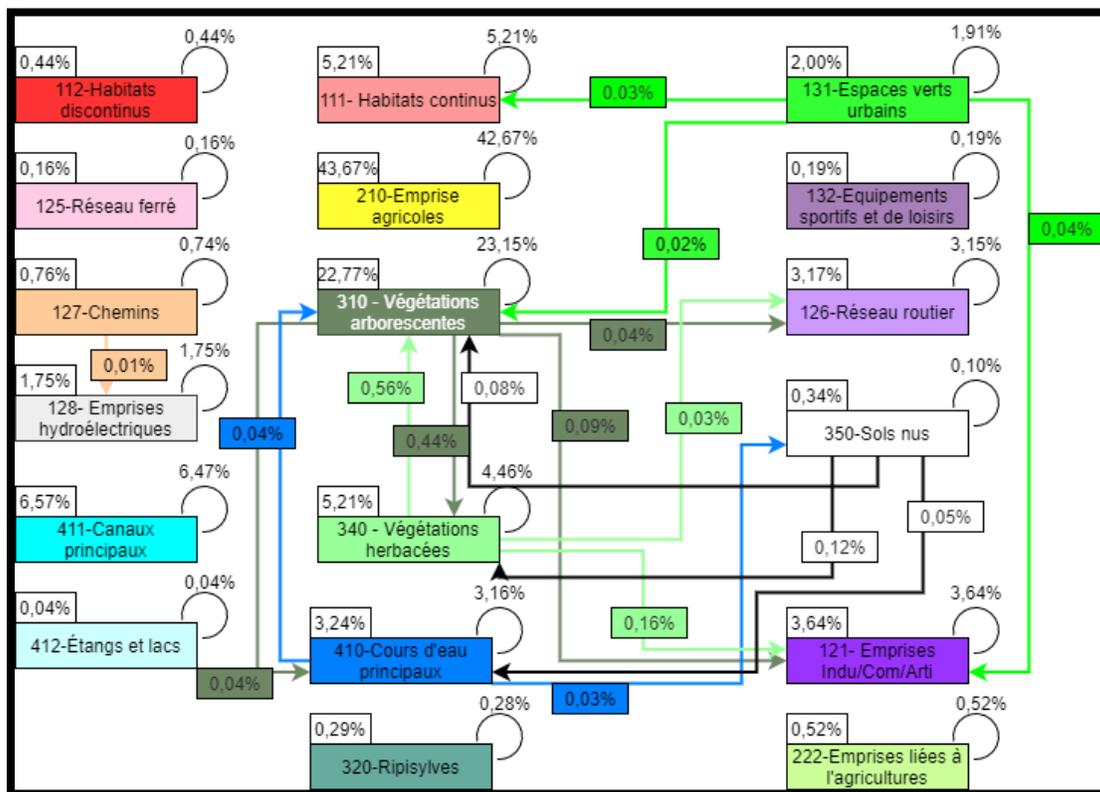


Figure 26: Diagramme de flux entre 2007 et 2011.

Au sein de l'île du Rhin, le reboisement identifié sur les deux précédentes transitions reste observable (Figure 26). En effet, la végétation arborescente gagne 0,56% au détriment de la végétation herbacée, notamment aux abords du Rhin ainsi qu'à l'emplacement des anciens bassins de stockage de potasse (Figure 26 Figure 25). La surface en eau du Rhin est en très légère augmentation (Figure 26), mais ses berges ont été légèrement modifiées, et ce sur quelques zones (Figure 25), ayant pour effet un transfert de 0,03% et 0,04% de surfaces, précédemment recouvertes par le cours d'eau, en sols nus et en végétation arborescente. De plus, le cours d'eau gagne 0,04% et 0,05% sur des surfaces occupées en 1997 par de la végétation arborescente et du sol nu. Ces observations permettent de confirmer, sur cette période, la mobilité latérale du cours d'eau, déjà constatée au sein de la transition précédente.

Analyse de la transition entre 2011 et 2018

La transition 2011-2018, dernière étudiée, n'expose plus que de très faibles changements surfaciques d'occupation et d'usage du sol (Figure 27 et Figure 28).

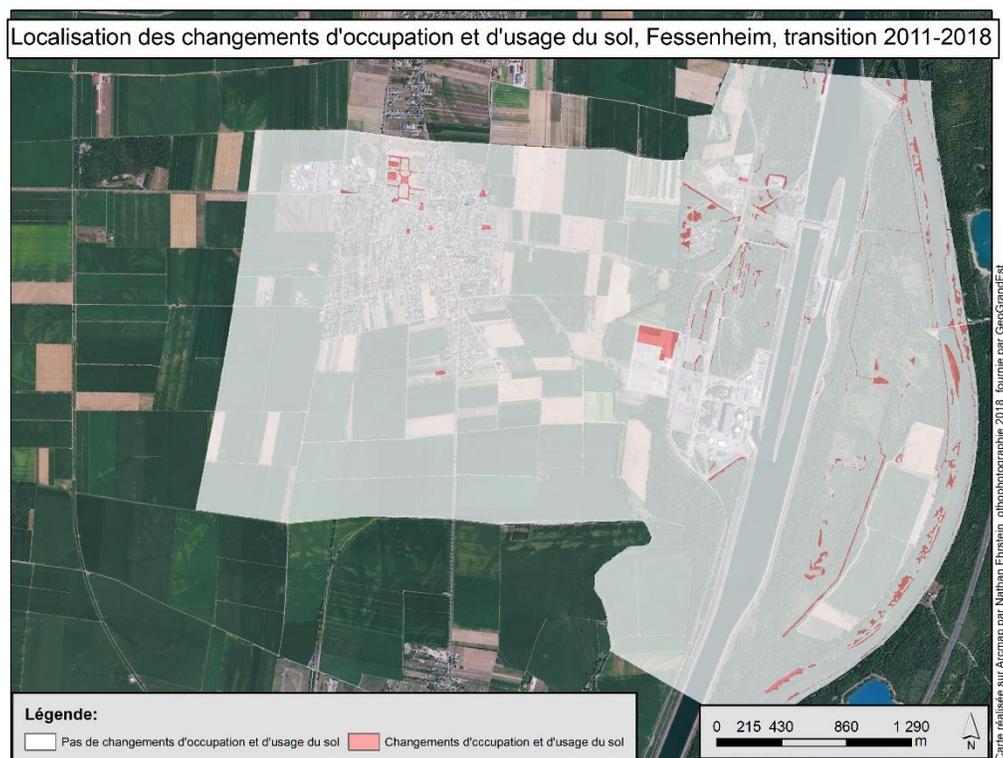


Figure 27: Localisation des changements d'occupation du sol entre la transition 2011-2018.

Le reboisement de l'île du Rhin est encore identifiable au sein de cette transition et est rendu visible par le transfert de 0,83% de surface de végétation herbacée en végétation arborescente (Figure 28). La déprise de la zone et son enrichissement/reboisement progressif est également démontré par la transition de 0,12% de surface occupée par un réseau de chemins sur l'île du Rhin en végétation arborescente (Figure 28).

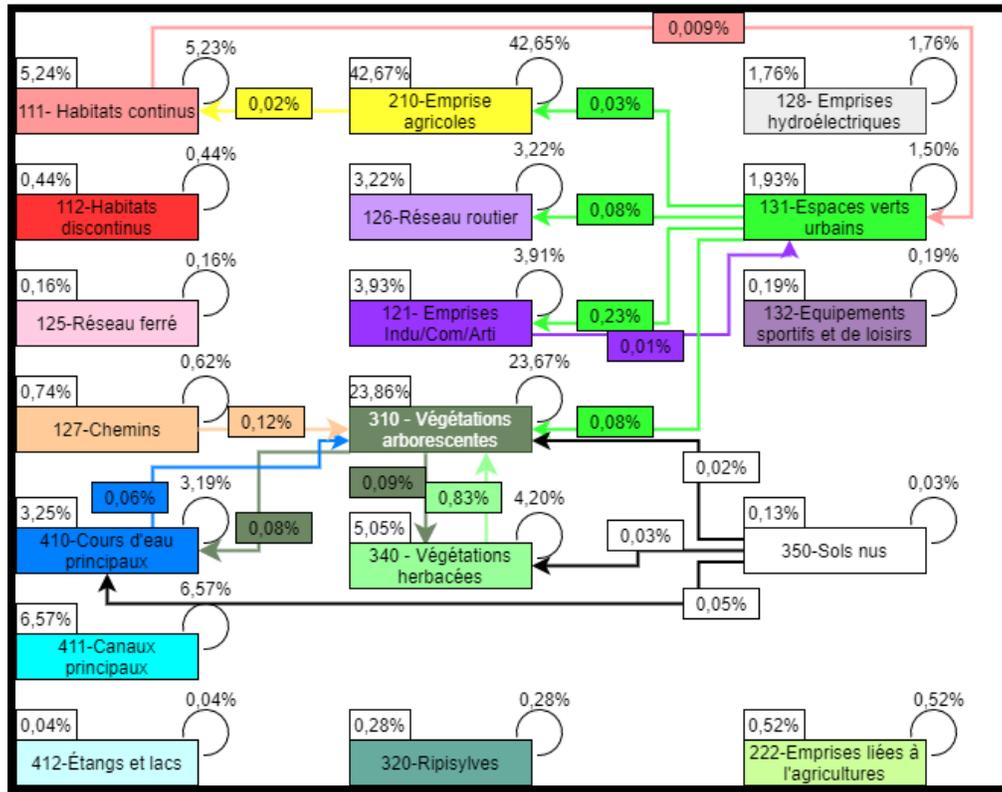


Figure 28: Diagramme de flux entre 2011-2018

Au niveau du Rhin, le phénomène de mobilité latérale, influençant l'occupation du sol de ses berges, semble se poursuivre. En effet, on observe (i) une légère augmentation des surfaces en eau provenant de 0,05% et 0,08% de sols nus et de végétation arborescente et (ii) une diminution par transfert de 0,06% vers de la végétation arborescente. Pour finir, le diagramme de flux montre un transfert de 0,23% de surface précédemment occupée par des espaces verts urbains (ici pelouse artificielle) en emprises industrielles, par l'agrandissement du parc de transformateurs électriques bordant le CNPE (Figure 27).

3.1.3 Evolution des métriques spatiales

L'analyse conjointe de l'évolution (i) des changements pixel par pixel *via* la métrique PCI (Pixel Change Index) et (ii) de changements dans la représentativité des classes *via* la métrique ZCI (Zonal Change Index) nous permet de mettre en évidence et de l'intensité et la fréquence des dynamiques paysagères au cours de la période étudiée. Les valeurs de PCI démontrent des changements profonds à l'échelle du pixel et ce, sur deux périodes 1951-1956 (PCI=28,59%,Figure 29) et 1956-1997 (PCI=36,36%,Figure 29).

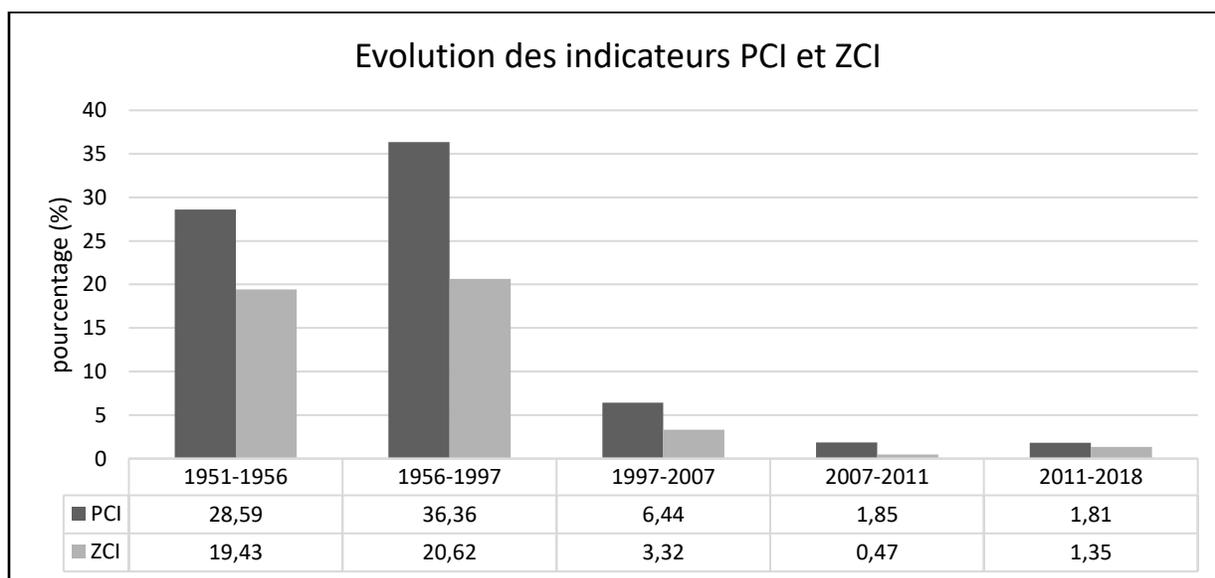


Figure 29: Evolution des métriques spatiales de 1951 à 2018 - PCI : Pixel Change Index, en %; ZCI : Zonal Change Index, en %.

A partir de 1997, le PCI décroît jusqu'à atteindre une valeur de 1,81% mettant ainsi en évidence une forte réduction et stabilisation des dynamiques à l'échelle du pixel. (Figure 29). Les valeurs du ZCI montrent des tendances analogues. En effet, les deux premières périodes exposent des changements forts dans les classes d'occupation et d'usage du sol, avec respectivement un ZCI de 19,43% et un ZCI de 20,62%,(Figure 29). Les valeurs du ZCI diminuent ensuite puis se stabilisent pour la période 2011-2018 à une valeur de 1,35% (Figure 29). L'étude de l'évolution de ces deux indicateurs confirme, ainsi, le caractère très morphogène de la construction du GCA, de l'usine de production

hydroélectrique, et du CNPE de Fessenheim, tous réalisés lors de ces deux premières périodes de notre étude. Il est à noter que les valeurs du PCI sont plus élevées que celles du ZCI lors de deux périodes les plus récentes (Figure 29). Il est ici intéressant de voir que les changements à l'échelle du pixel n'engendrent pas de différences dans la représentativité des classes d'occupation du sol au sein de l'emprise d'étude.

3.2 Part de naturalité du socio-écosystème étudié

3.2.1 Représentation des classes d'occupation biogènes

L'analyse de l'évolution surfacique des classes dites biogènes, *i.e.* qui sont nécessaires à l'épanouissement du vivant (végétation arborescente et herbacée, ripisylves, étangs et lacs et cours d'eau principaux, ici le Rhin et le cours d'eau du Muhlbach) opposées aux classes d'origine anthropique (les classes restantes) a permis d'évaluer la part de naturalité au sein du SES de Fessenheim depuis 1951. Cette analyse nous permet de comprendre les conséquences des deux faits structurants du SES, *i.e.* la construction du GCA et du CNPE, sur les composantes naturelles et semi-naturelles du système socio-écologique étudié. En 1951, l'emprise d'étude est constituée, à quasi égalité, par des classes biogènes (47,89%, Figure 30) et non biogènes (52,10%, Figure 30), rappelant le dimorphisme anthropique/naturel, Ouest-Est, décrit dans l'étude du raster de la même date (partie 3.1.1).

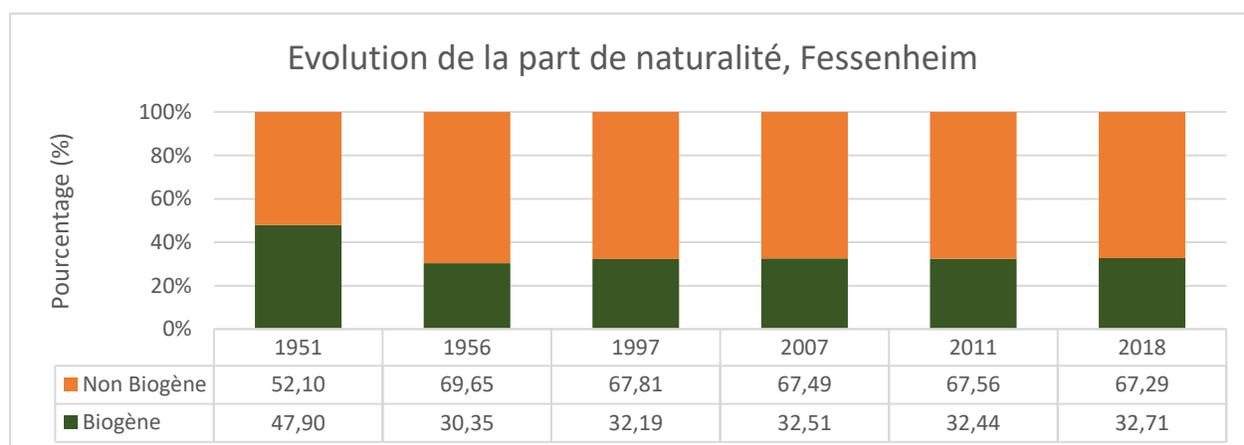


Figure 30: Représentativité des classes biogènes versus non biogènes pour chaque date d'étude, de 1951 à 2018 (Biogène : Végétation arborescente et herbacées, ripisylves, cours d'eau principal, Non biogène : autres classes)

En 1956, on observe une réduction de la représentativité des classes biogènes (30,35%, Figure 30) au profit de celle des classes non biogènes (69,65%, Figure 30). Ceci est expliqué par la construction du GCA, construit sur une zone de végétation arborée et herbacée (chapitre 3.1.1). Pour les dates suivantes (1997, 2007, 2011 et 2018), le ratio entre classes biogènes /non biogènes tend vers une légère augmentation des classes biogènes (Figure 30). Les conséquences de la construction du CNPE dans les années 1970 sur les attributs paysagers biogènes n'est pas relayé ici. Ceci peut être expliqué par le phénomène de renaturation/reboisement naturel opérant de façon constante au cours du temps sur l'île du Rhin contrebalançant la perte en surfaces naturelles ou semi-naturelles, causée par la construction du CNPE.

3.2.2 Profil des communautés végétales de l'île du Rhin

L'île du Rhin est la principale source de naturalité au sein du socio-écosystème de Fessenheim. L'étude du profil des communautés végétales qui la compose, a permis d'appréhender d'une part les spécificités écologiques de la zone (degré de patrimonialité) et d'autre part d'y réaliser un diagnostic précédant de futurs travaux de restaurations/réhabilitations écologiques (partie 2.2.2). Sur l'ensemble des 83 relevés de végétation étudiés, la richesse floristique (nombre d'espèces végétales) moyenne par relevé est de 10,48 avec comme valeur minimale de 3 et maximale de 21 ainsi qu'une variance de 15,17 (Tableau 7). L'amplitude de la richesse floristique entre les relevés de végétation est élevée mais la composition reste similaire.

Tableau 7: Statistiques descriptives de la richesse floristique par relevé de végétation

Nombre de relevés	Minimum (diversité par relevé)	Maximum (diversité par relevé)	Moyenne (diversité par relevé)	Variance (diversité par relevé)
82	3	21	10,48	15,17

Bien que ces résultats semblent traduire une non homogène et relative faible diversité floristique au sein des relevés de végétation, celle-ci peut être attribuée à la méthode d'inventaire non exhaustive et qui se base sur la détection uniquement d'espèces dites déterminantes.

A la lecture du Tableau 8, représentant les 15 espèces les plus fréquentes au sein des relevés de végétation, on peut remarquer que le corpus d'espèces semble présenter une relative homogénéité quant aux différents indicateurs étudiés. La forte représentativité de *Solidago gigantea* (*Solidage géant*) présente dans 53% des relevés, est ici intéressante. En effet, cette espèce est classée comme invasive sur le territoire alsacien et participe de ce fait à une banalisation de la végétation en place avérée (Audinot, s. d.). Elle se différencie légèrement du corpus fonctionnel commun, au même titre que *Populus nigra* (Peuplier noir) - valeurs légèrement plus élevées pour les indicateurs lumière, température, humidité édaphique et niveau trophique (Tableau 8). De plus, notons ici que sur l'ensemble des relevés de végétations étudiés, aucune espèce végétale ne possède de statut de protection.

Tableau 8: Les quinze espèces végétales les plus fréquentes dans les 82 relevés de végétation réalisés sur l'Île du Rhin, ainsi que leurs indicateurs associés.

	Lumière (1 à 9)	Température (1 à 9)	Humidité_édaphique (1 à 12)	Réaction_du_sol_(pH)(1 à 9)	Niveau_trophique (1 à 9)	Texture (1 à 9)	Hemeroby (1 à 12)	Fréquence par relevés
<i>Solidago gigantea</i> Aiton, 1789	8	6	6	7	7	1	3	53
<i>Crataegus monogyna</i> Jacq., 1775	7	5	5	6	5	3	3	48,2
<i>Ligustrum vulgare</i> L., 1753	7	6	4	8	5	3	3	42,2
<i>Cornus sanguinea</i> L., 1753	6	5	5	7	5	2	2	41
<i>Brachypodium pinnatum</i> (L.) P.Beauv., 1812	5	5	5	7	5	3	2	38,6
<i>Populus nigra</i> L., 1753	8	7	7	7	7	2	2	31,3
<i>Coronilla varia</i> L., 1753	6	6	4	8	3	3		30,1
<i>Helianthemum nummularium</i> (L.) Mill., 1768	7	6	3	7	3	3	2	30,1
<i>Quercus robur</i> L., 1753	7	6	5	5	5	3	2	28,9
<i>Ulmus minor</i> Mill., 1768	7	6	5	7	7	2	3	27,7
<i>Viburnum lantana</i> L., 1753	7	5	4	8	4	3	2	26,5
<i>Poterium sanguisorba</i> L., 1753	7	6	4	8	2	3	2	24,1
<i>Carex alba</i> Scop., 1772	7	5	4	8	3	3	2	22,9
<i>Lonicera xylosteum</i> L., 1753	6	4	5	7	5	2	2	21,7
<i>Populus alba</i> L., 1753	6	7	7	7	7	1	3	21,7
Valeur minimale de l'indicateur	1	1	1	1	1	1	1	
Valeur maximale de l'indicateur	9	9	12	9	9	9	12	
Moyenne pour l'ensemble des 146 espèces étudiées	7	5	5	7	5	3	3	

Pour l'indicateur de lumière, les communautés végétales étudiées se situent toutes proches de la valeur 7 de l'indicateur (Figure 31), elles peuvent donc ici être qualifiées

d'intermédiaires. Les communautés végétales étudiées sont ici moyennement demandeuses en énergie lumineuse. Pour l'indicateur du pH du sol, les communautés végétales se situent toutes proches de la valeur 7 de l'indicateur (Figure 31) et peuvent donc être qualifiées de neutrophiles (affinité à un sol au pH neutre et donc proche de 7). Pour l'indicateur de la texture du sol, les communautés végétales se situent entre la valeur 2 et 3 de l'indicateur qualifiant leur affinité à un sol à la granulométrie argilo-limoneuse (Figure 31).

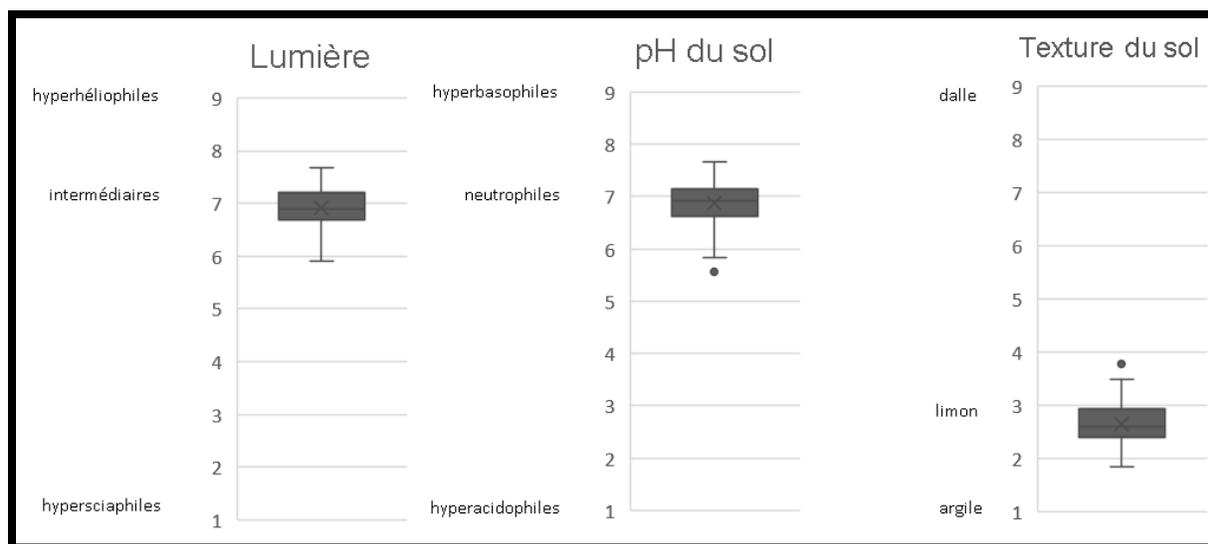


Figure 31: Boîtes à moustaches des moyennes des indicateurs lumière, pH du sol et texture du sol pour les 82 relevés de végétation.

Pour l'indicateur de la température, les communautés végétales sont toutes situées entre la valeur 5 et 6 et peuvent donc être qualifiées de planitiales à montagnardes et planitiales thermophiles, thermoatlantiques et thermocontinentales (Figure 32).

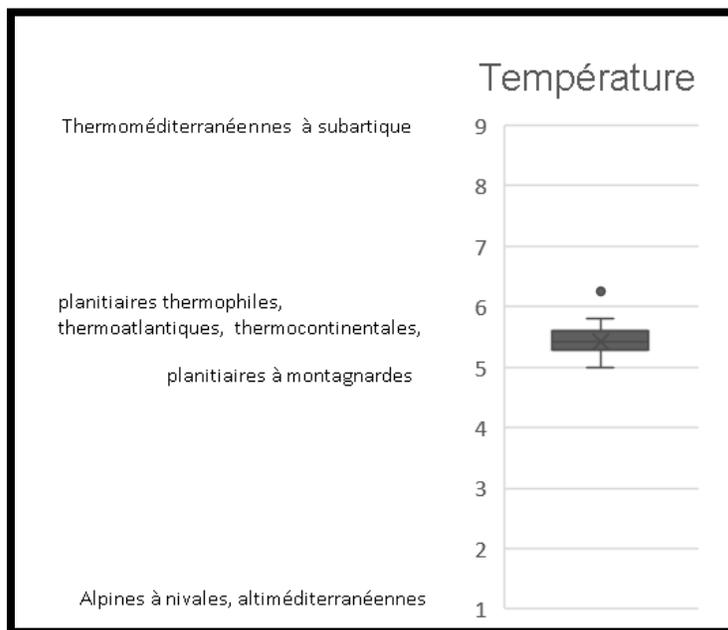


Figure 32: Boîte à moustache de la moyenne de l'indicateur température pour les 82 relevés de végétation.

Pour l'indicateur d'humidité édaphique (humidité du sol), les communautés végétales étudiées sont proches de la valeur de 5 (Figure 33). Elles peuvent être ainsi qualifiées de mésohydriques et possèdent donc une affinité à un sol ni sec ni trop humide. Pour l'indicateur d'hémérobie, les communautés végétales se situent entre les valeurs 2 et 3 (Figure 33). Elles peuvent être qualifiées d'oligo-hémérobique à meso-hémérobique. Elles se développent donc préférentiellement sur des milieux/habitats où l'impact de l'homme y est faible à modéré. Pour l'indicateur de niveau trophique, les communautés végétales se situent entre les valeurs 4 et 5 (Figure 33) et peuvent être qualifiées de mésotrophiles à mésooligotrophiles. Elles présentent une affinité à un sol dans lequel la disponibilité en éléments nutritifs est moyenne.

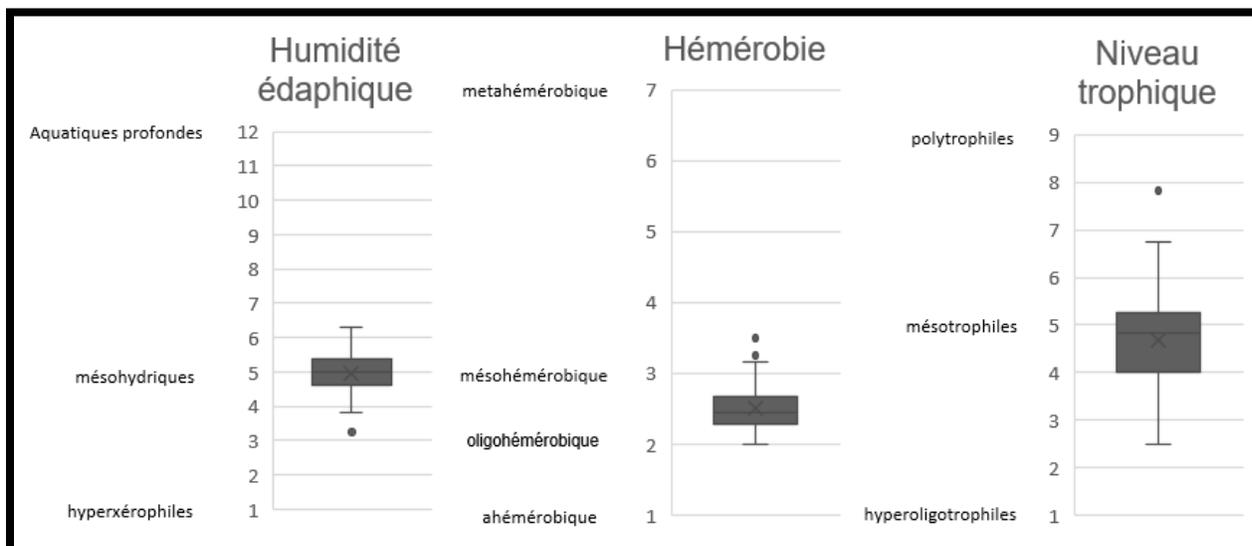


Figure 33: Boîtes à moustaches des moyennes des indicateurs humidité édaphique, hémérobie et niveau trophique pour les 82 relevés de végétation.

L'ensemble des résultats ci-dessus nous ont permis de qualifier les communautés végétales en présence sur l'Île du Rhin en termes d'affinités à certains facteurs physico-chimiques de leur environnement. Ainsi, ces résultats peuvent également nous donner des indications sur les caractéristiques environnementales et le degré de naturalité de la zone étudiée. Celle-ci (Ile du Rhin) est constituée d'un sol à faibles variations hydriques, modérément pauvre à riche en substances nutritives, au pH neutre et à la granulométrie argilo-limoneuse. Les milieux/habitats naturels s'y trouvant sont faiblement à moyennement impactés par les activités humaines.

Une analyse statistique multivariée en ACP (Analyse en Composante Principale) a été réalisée pour mettre en évidence un différentiel de compositions végétales entre les zones visées par les actions de restauration à venir et les autres zones. Les résultats de celle-ci, non présentés ici, n'ont montré aucune tendance dans la distribution des espèces végétales. Ces résultats peuvent, entre autres, être attribués à la non exhaustivité des données mises à notre disposition.

3.3 Trajectoires sociologiques et démographiques mises en regard des dynamiques et métriques spatiales

Il est important, afin de comprendre et confirmer les trajectoires passées du SES de Fessenheim, liées à la construction du GCA et du CNPE, de mettre en exergue les résultats de l'analyse sur l'évolution des surfaces d'occupation du sol, précédemment réalisée avec des données démographiques et sociologiques concernant la commune de Fessenheim.

3.3.1 Trajectoire démographique et surfaces des classes d'habitats continus et discontinus depuis 1951

L'analyse conjointe de l'évolution de la population au sein de la commune de Fessenheim et de l'évolution des surfaces en habitats continus et discontinus entre 1951 et 2018 nous permet de dégager plusieurs phases dans la morphologie et la croissance démographique de la commune (Figure 34). Entre 1951 et 1954, la population de la commune a doublé passant de 639 à 1566 habitants (+ 145% ; Figure 34). Cette forte croissance s'explique en partie, par la phase de construction, à cette période, du GCA. En effet, comme nous l'avons vu dans les chapitres précédemment, la construction du GCA a entraîné l'édification de deux cités, la cité Koechlin servant de logement au personnel de la centrale hydroélectrique EDF et une seconde, plus grande, servant de logement aux ouvriers des chantiers de construction du GCA, toutes deux ayant pour conséquence une augmentation de 5.94 ha des emprises en habitats discontinus (Figure 34).

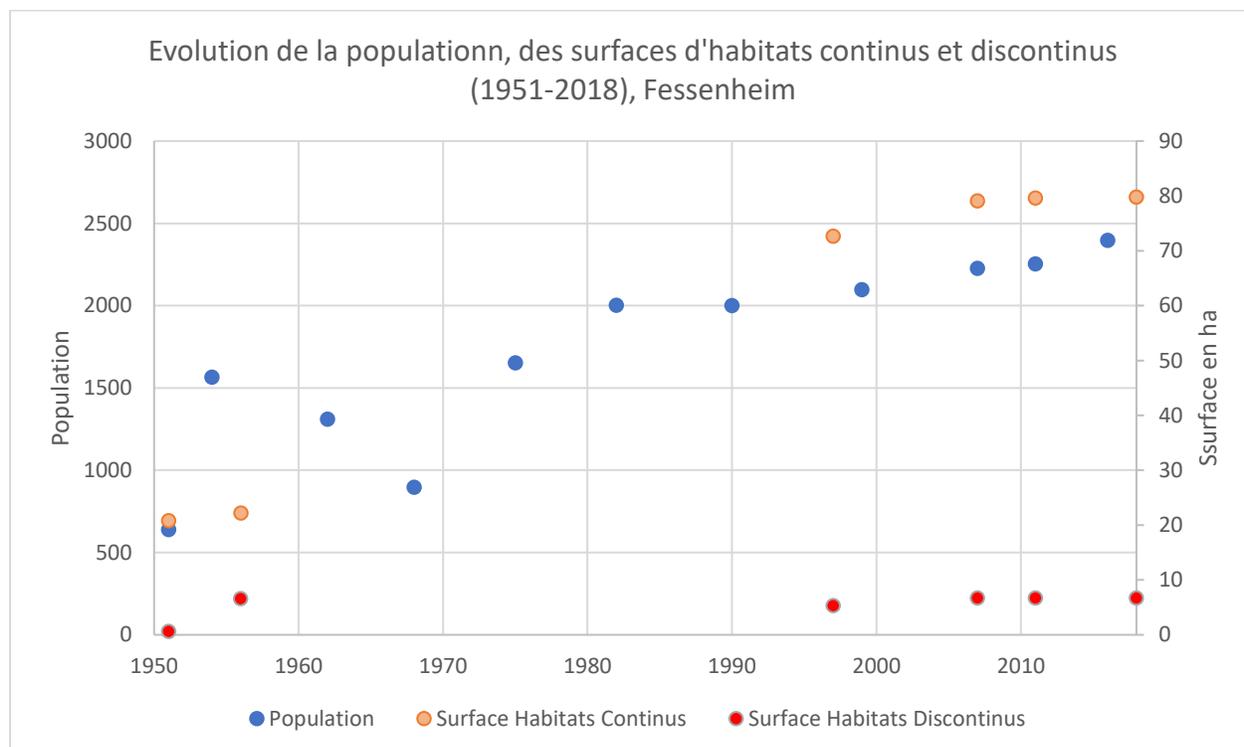


Figure 34: Evolution de la population de la commune de Fessenheim entre 1951 et 2018 (source : base de données Cassini de l'EHESS et INSEE) ainsi que les surfaces en ha des classes habitats continus et discontinus.

La phase suivante est marquée par un taux de croissance démographique négatif. En effet, la population de la commune chute entre 1954 et 1968 passant de 1566 à 896 (-43% ; Figure 34). Cette phase peut être expliquée par (i) la fin des travaux du GCA, (ii) le départ de la commune des ouvriers y travaillant et (iii) le démantèlement de la cité les hébergeant (absente en 1997) et qui participe à la réduction des surfaces d'habitats discontinus (Figure 34).

La phase suivante, que nous appellerons ici, la phase de construction nucléaire, est une phase au taux de croissance fort et continu passant de 896 habitants en 1968 à 2002 en 1982 (+123% ; Figure 34). Ce taux de croissance fort est lié à la construction du CNPE, qui entraîne l'arrivée, au sein de la commune, d'agents qualifiés à la construction de la centrale. La dernière phase est celle de l'exploitation nucléaire, entre 1977 et 2018, qui expose un taux de croissance démographique positif et constant (+19% ; Figure 34) traduit par une augmentation de la population de la commune passant de 2002 en 1982 à 2396 en 2018 (Figure 34). Sachant qu'en 2017, plus de 23% de la population de la commune est représentée par des employés de la centrale et leur famille, logés

principalement au sein de la cité Koechlin et le parc locatif d'EDF situés dans le bourg de Fessenheim ; cette croissance démographique peut être alors, en partie, attribuée à l'exploitation du CNPE (Meyer 2020). L'ensemble de ces résultats permet de rendre compte de l'impact fort de l'implantation de la centrale, aussi bien (i) sur la morphologie de la commune de Fessenheim, par l'accroissement des surfaces en habitats continus et discontinus mais également (ii) sur son évolution démographique.

3.3.2 Trajectoires sociologiques

Bien que les données sociologiques proposées par l'INSEE ne couvrent pas le début de notre étude (période 1951-1968), les conséquences de la construction et l'exploitation du CNPE ont pu être identifiées.

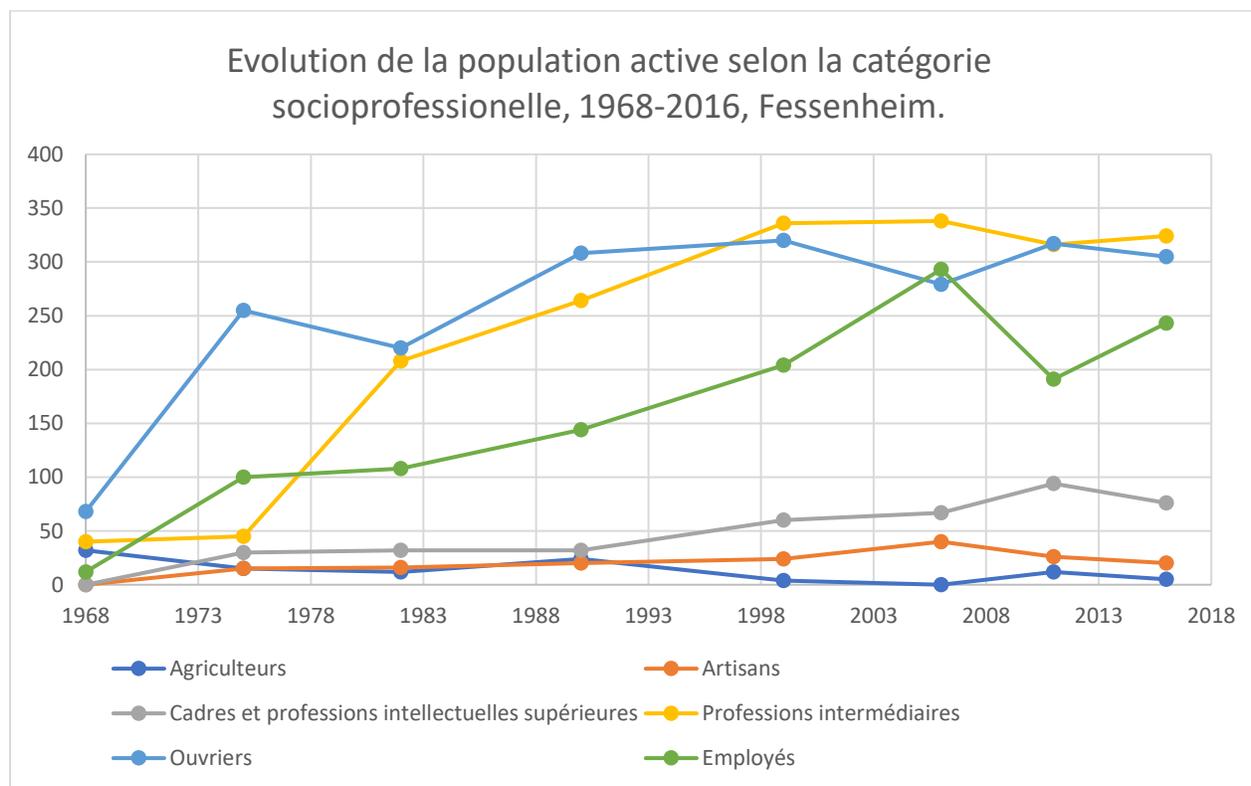


Figure 35: Evolution de la population active (25-54 ans) selon la catégorie socioprofessionnelle, de 1968 à 2016 pour la commune de Fessenheim (source : base de données INSEE)

Une forte augmentation du nombre d'emplois ouvriers dans la population de la commune pendant la période 1968-1975, passant de 68 à 255 (Figure 35). Le même constat peut se faire pour la catégorie employés, qui passe de 12 à 100 (Figure 35). Cette

augmentation, non observée dans les autres communes de la bande Rhénane à cette période (Meyer 2020) est à rattacher, principalement, aux besoins importants en ce type d'emplois durant la phase de construction du CNPE.

En 1982, premier recensement après la mise en fonction du CNPE, le nombre d'ouvriers chute légèrement, passant de 255 en 1975 à 220 en 1982 (Figure 35) et marquant ainsi ici, la fin des travaux de construction. On remarque, de plus, une forte augmentation de la catégorie professions intermédiaires à cette période (45 à 208, Figure 35), qui ne cessera d'augmenter jusqu'en 2006. Le même constat peut être fait pour la catégorie employés et celle des cadres et professions intellectuelles supérieures (jusqu'en 2011, Figure 35). La part importante des cadres et professions intermédiaires au sein de la commune de Fessenheim durant cette période n'est d'ailleurs pas observée dans les commune voisines (Meyer 2020). L'ensemble de ces résultats sont à rattacher d'une part à la forte représentativité des employés EDF au sein de la commune et d'autre part aux spécificités inhérentes à l'exploitation du CNPE à Fessenheim dont le fonctionnement nécessite des emplois à forts niveaux de qualifications (Meyer 2020).

Chapitre IV : *Discussion, limites et* *perspectives*

Chapitre IV : Discussion, limites et perspectives

4.1. Fessenheim : un système socio-écologique en transformation

La transposition de méthodologies existantes et le développement de l'outil d'analyse "Ecochange" se sont avérés pertinents pour l'analyse et la compréhension des trajectoires paysagères et d'occupation et d'usage des sols au sein du socio-écosystème de Fessenheim. Ceux-ci n'ont pas uniquement permis de quantifier les changements depuis 1951, mais de les localiser avec précision afin d'en comprendre, non seulement les causes, mais également d'en définir les dynamiques paysagères et composantes naturelles, spatiales et temporelles opérants sur le territoire d'étude. L'analyse conjointe des métriques spatiales sélectionnées dans le présent rapport (le *Pixel Change Index - PCI* et le *Zonal Change Index - ZCI*), a permis de dissocier deux périodes sur l'ensemble de la chronique qui ont profondément marqué la trajectoire et l'histoire paysagère du socio-écosystème : (i) de 1951 à 1956 et (ii) de 1956 à 1997. Celles-ci correspondent à des aménagements structurants majeurs, **(1)** la construction du Grand Canal d'Alsace (GCA) et de la centrale hydroélectrique associée ainsi que **(2)** la construction du premier Centre Nucléaire de Production d'Électricité (CNPE) français.

La construction du Grand Canal d'Alsace, de la centrale hydroélectrique de Fessenheim et des bassins de stockage de saumures de potasses ont modifié en profondeur la structure paysagère du territoire de la commune sur la période 1951-1956. Leur implantation s'est faite au détriment d'espaces forestiers et prairiaux, très peu assujettis antérieurement à l'anthropisation et réduisant ainsi la part de milieux naturels et semi-naturels. L'Île du Rhin, créée suite aux travaux d'aménagement, ne présente pas d'attributs paysagers fortement biogènes tels que cela était attendu. La déprise de la zone et l'homogénéité des milieux/habitats sont accentués au cours du temps par le reboisement massif au détriment des milieux prairiaux. De plus, la construction du GCA entraîne l'abaissement du niveau du Rhin et modifie de ce fait sa largeur et la morphologie de ses berges. Outre leurs conséquences sur les composantes naturelles et semi-naturelles, la construction du Grand Canal d'Alsace et la mise en œuvre de la centrale

hydroélectrique de Fessenheim ont, à cette période, fortement modifié la morphologie urbaine de la commune et ses trajectoires socio-démographiques par : (i) l'arrivée d'ouvriers attelés aux grands travaux, logés dans une cité temporaire en bordure des ouvrages hydrauliques ainsi que (ii) l'arrivée d'agents EDF logés au sein de la cité Koechlin, toute proche de la centrale hydroélectrique.

A partir de 1970, la construction du CNPE (achevée en 1977) devient l'aménagement structurant dans les dynamiques paysagères du socio-écosystème. Sa construction sur une zone, à proximité immédiate du GCA et principalement boisée a eu également pour conséquence la réduction de milieux naturels et semi-naturels. La proximité du CNPE avec le bourg engendre l'arrivée au sein de la commune de nouvelles qualifications liées à l'exploitation et la production d'électricité nucléaire à Fessenheim (Meyer 2020). L'évolution fortement positive de la trajectoire démographique de la commune a pour conséquence son développement urbain, par l'aménagement d'un parc locatif EDF et le développement de son réseau routier, tous deux se faisant préférentiellement par expansion sur des espaces agricoles.

La date du 29 juin 2020 marque l'arrêt du second et dernier réacteur du CNPE de Fessenheim après 43 ans d'exploitation ; des questions se posent alors, quant au devenir du territoire de Fessenheim et de son socio-écosystème associé. Bien que l'avenir de la zone couverte actuellement par la centrale est encore incertain, EDF semble privilégier une reconversion vers une zone industrielle après un démantèlement complet et une réhabilitation de la zone pendant une durée de 15 ans, excluant ainsi toutes autres utilisations possibles (Plan de démantèlement EDF, 2019). Il est également envisagé l'implantation d'un technocentre de recyclage des matériaux métalliques très faiblement radioactifs pendant la phase de démantèlement et sur l'actuel site de la centrale. Ce projet est porté par EDF et est soutenu par l'Etat français à travers le ministère de la transition écologique (Ministère de la transition écologique, 2020).

Pour revaloriser la zone de l'Île du Rhin et augmenter ainsi l'attrait touristique de la zone ainsi que pour renforcer la part de naturalité du socio-écosystème, un projet notable vise

des actions de restauration écologique sur l'île du Rhin : (i) réouverture de certaines zones boisées en milieux prairiaux ainsi que (ii) la réhabilitation, dès 2021, des bassins de stockage de saumures de potasses, en y créant, en place et lieu, un réseau de mares via une reconnexion au GCA. Ce projet est inscrit dans le volet de la transition écologique du Projet Territoire Fessenheim (Projet de territoire, 2019) et est porté par la Communauté de Communes Rhin-Brisach avec l'appui du CSA et le soutien d'EDF.

4.2 L'après-nucléaire : quelles options pour la transition écologique ?

Une projection a été réalisée pour visualiser et quantifier les conséquences potentielles des différents projets envisagés sur l'occupation des sols et la part de naturalité du socio-écosystème étudié (Figure 36). A l'horizon 2035, année de fin prévue du démantèlement de la centrale, le zonage étudié ne serait que peu impacté, la zone recouverte par la centrale ayant pour vocation à rester industrielle (Figure 36). Toutefois, ce constat n'est pas applicable à l'île du Rhin, qui voit sa structure paysagère et ses classes d'occupation du sol quelque peu modifiées (Figure 36). Le projet de réhabilitation des bassins de saumure aurait pour conséquence de réduire la surface en végétation arborescente (-27 ha par rapport à 2018) au profit de végétation herbacée (+21 ha) et de surfaces en eau (classe "étangs et lacs", + 5,22 ha). Les modifications d'occupation du sol ne concernant uniquement que des classes catégorisées comme naturelles, aucun changement de la part de naturalité entre 2018 et 2035 n'est donc observable. Toutefois, la reconversion des surfaces de végétation arborescente, en végétation herbacée et en eau sur l'île du Rhin a pour effet de modifier et d'augmenter légèrement le PCI (2,11 à la place de 1,81 en 2018) et le ZCI (1,79 à la place de 1,35 en 2018). Cette augmentation conjointe des deux métriques spatiales nous permet de mettre en évidence une augmentation des dynamiques paysagères et environnementales à l'échelle du pixel, entraînant une légère restructuration globale des composantes paysagères de l'île du Rhin. Les travaux de réouverture de milieux boisés et la réhabilitation des bassins de stockage de saumure auraient donc pour effet de réduire les phénomènes de déprise et de reboisement observés depuis 1956 sur l'île du Rhin (paragraphes 3.1.1 et 3.1.2), en offrant un maillage complexe de zones humides, de végétations hygrophiles, de surfaces

en eaux et de pelouses sèches, toutes participant à une augmentation de la biodiversité par diversification des biotopes.

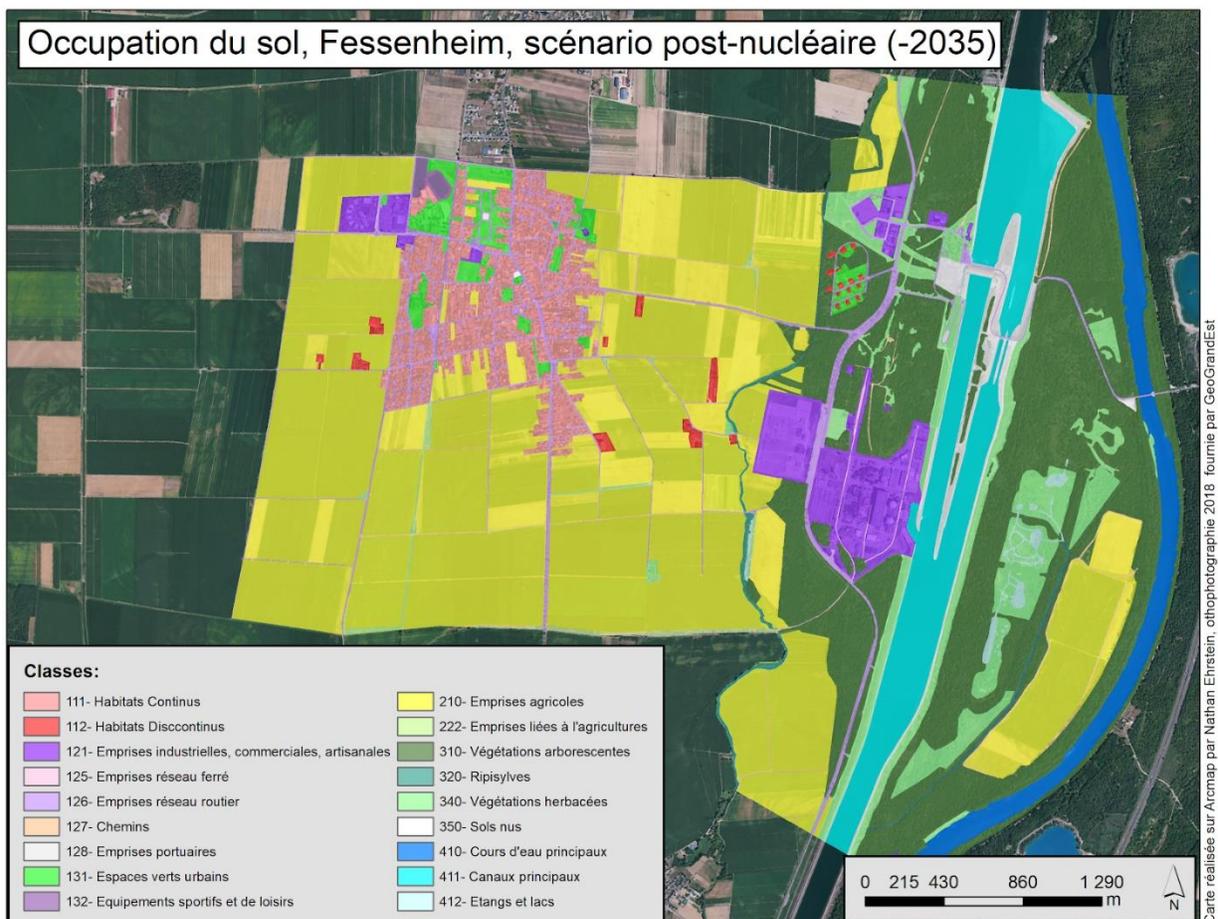


Figure 36: Prévisualisation de l'occupation du sol suite au scénario post-nucléaire (2035).

Les trajectoires démographiques et sociologiques seraient à diviser en deux périodes distinctes, (i) la période correspondante à celle du démantèlement, de 2020 à 2035, et (ii) la période post-démantèlement à partir de 2035. Le tableau ci-dessous (tableau 9) cite l'ensemble des projets de développement ou d'aménagement connus à ce jour (sur le territoire étudié ou dans les communes limitrophes) et leurs influences potentielles sur les trajectoires démographiques et sociologiques du territoire de Fessenheim lors des phases de démantèlement et post-démantèlement. L'incertitude quant aux dimensions et aux modalités de certains de ces projets étant forte, ce tableau et le paragraphe qui en suit présentent donc uniquement des hypothèses ou perspectives.

Tableau 9: Influences potentielles des projets portés à connaissance sur les trajectoires démographique et sociologique pour les phases de démantèlement et post-démantèlement (où, -- signifie une influence potentiellement fortement négative, + signifie une influence potentiellement positive)

	Localisation	Phase du démantèlement		Phase post-démantèlement	
		Trajectoire démographique	Trajectoire sociologique	Trajectoire démographique	Trajectoire sociologique
CNPE (EDF)	Fessenheim	--	--		
Nouveau pôle de traitement des déchets métalliques faiblement radioactifs (EDF)	Site du CNPE de Fessenheim	+	+	+	+
Projet EcoRhéna (CCRB)	Balgau, Nambshheim, Heiteren, Geiswasser	+	+	+	+

La période entre la fermeture du CNPE et son démantèlement complet pourrait entraîner une réduction graduelle du personnel requis sur le site (Projet de territoire, 2019) impactant négativement, de ce fait, la trajectoire démographique de la commune (Tableau 9). Il en est de même pour sa trajectoire sociologique (Tableau 9). En effet, cette phase sera témoin d'une réduction graduelle du nombre d'emplois liés aux spécificités de l'industrie du nucléaire à Fessenheim (Chapitre 3.3.2). Toutefois, le projet de technocentre de recyclage des déchets métalliques très faiblement radioactifs pourrait être source d'emplois. L'impact de ce projet est donc ici jugé comme potentiellement positif sur les trajectoires démographiques et sociologiques (Tableau 9). EDF et l'Etat français ambitionnent de placer ce projet comme site d'excellence dans le recyclage des déchets métalliques très faiblement radioactifs, à l'échelle nationale dans un premier temps puis européenne. Ce projet s'inscrit dans le cadre des stratégies pour la transition énergétique et réduction de la part du nucléaire sur le territoire national de 70% à 50% à l'horizon 2035 (Ministère de la transition écologique, 2020).

Le projet EcoRhéna, porté par la CCRB et inscrit au sein de l'axe 1 du Projet Territoire Fessenheim, consiste en l'aménagement d'une zone d'activité de 90 ha, en bordure du Rhin sur les communes de Balgau, Nambenheim, Heiteren et Geiswasser. Bien que ce projet se situe hors du territoire de la commune de Fessenheim et donc de notre zone d'étude, celui-ci en est limitrophe et porte notre intérêt quant à son influence potentielle sur les trajectoires démographiques et sociologiques de la commune de Fessenheim. L'ambition est ici d'attirer des entreprises dans une démarche d'exemplarité en termes d'écologie industrielle et territoriale (Projet de territoire, 2019). Bien que les effets de l'implantation de cette zone d'activité, située au nord du territoire de Fessenheim, sont à l'heure actuelle peu quantifiables, celle-ci est ici jugée comme potentiellement positive sur les trajectoires démographiques et sociologiques (Tableau 9) de la commune par la création d'un nouveau bassin d'emplois.

Ainsi, les projets d'aménagement et de développement territoriaux envisagés n'insuffleraient que de faibles modifications paysagères. Toutefois, le projet de réhabilitation écologique des bassins de saumures permettrait d'augmenter les attributs paysagers biogènes du site et réduire les phénomènes de reboisement observés depuis 1956 sur l'île du Rhin en y créant une mosaïque complexe d'habitats naturels qui engendrerait ici une augmentation de la biodiversité par diversification des biotopes.

4.3 Limites et perspectives de l'étude

Le contexte sécuritaire et de défense nationale qu'expose le zonage du CNPE de Fessenheim a rendu impossible l'analyse fine de la zone d'étude et plus particulièrement du complexe CNPE/GCA/île du Rhin sur la période 1956-1997 puisque la zone y est alors interdite au survol et qui plus est, à la prise de vue. L'accès à ces données aurait permis d'affiner notre analyse et l'interprétation des trajectoires paysagères, d'occupation du sol et l'évolution du SES de Fessenheim sur cette période. De plus, bien que les orthophotographies actuelles soient d'une résolution inégalée (précision 50 centimètres/pixels), celles des années 1950 possèdent une résolution très inférieure et qui plus est, sont en noir et blanc, rendant parfois difficile l'identification d'objets géographiques et donc le travail de digitalisation. Cette inégalité en termes de résolution

et de colorimétrie a dû être prise en compte dans la construction de la typologie en limitant ainsi le nombre de classes d'occupation du sol. En effet, certains objets géographiques, observables sur les photographies aériennes actuelles, ne le sont pas ou que trop peu souvent sur celles des années 1950. La classe représentant la végétation arbustive n'a donc, par exemple, pas été intégrée au sein de notre étude bien qu'elle aurait permis une meilleure compréhension des processus de successions végétales et donc une meilleure compréhension des dynamiques naturelles opérant sur l'île du Rhin au cours de la période étudiée. Dans ce contexte, il aurait été intéressant de tester, voire d'appliquer la méthodologie de colorisation automatique par deep learning de photographies aériennes en noir et blanc développée au sein du L.I.V.E (Poterek et al. 2020). Cette méthode aurait peut-être permis une facilitation dans l'interprétation et la détection d'objets géographiques sur les anciennes photographies aériennes. La digitalisation manuelle est tributaire de la pression d'observation et de la rigueur de l'observateur. Bien qu'une attention égale ait été portée durant l'ensemble du processus de digitalisation, certaines imprécisions peuvent donc apparaître dans la détection et le découpage géographique de certaines classes typologiques. L'observateur étant ici unique, ledit "effet observateur" en est réduit, et permet une certaine homogénéité dans la création de données géographiques.

Malgré ces éléments, la méthodologie appliquée dans le présent rapport s'est avérée pertinente pour l'étude de l'histoire du socio-écosystème de Fessenheim et de ses trajectoires. Elle pourrait être transposée à l'étude des trajectoires paysagères d'autres SES, comme ceux du réseau des 13 Observatoires Hommes-Milieus. De plus, cet outil pourrait être appliqué à d'autres thématiques de recherches. En effet, il serait par exemple intéressant de ne pas le cantonner à l'étude de l'évolution de l'occupation de sol et de l'appliquer dans l'étude de l'évolution spatiale et temporelle, sur le court, moyen ou long terme, d'habitats naturels codifiés à l'aide du référentiel Corine Biotope, Natura 2000 ou même de référentiels phytosociologiques. L'outil EcoChange, développé dans le cadre de cette étude, offre d'ores et déjà une forme d'automatisation des méthodes. Il est prévu d'améliorer les fonctionnalités de l'outil en incorporant, entre autres, une visualisation graphique automatique analogue à ce qui a été réalisé dans le

présent mémoire de manière manuelle. De plus, il serait judicieux d'y incorporer le calcul facilité de métriques spatiales liées à l'écologie des paysages. Cet outil EcoChange pourrait ainsi être utilisé lors de la rédaction de plans de gestion d'espaces naturels et de documents d'objectifs (DOCOb), pour y étudier les dynamiques paysagères, écologiques et d'habitats naturels ainsi que les effets de certaines actions de restaurations ou d'aménagements. Suite à la période de confinement, les aspects sur la part de naturalité n'ont pas pu être construits sur la base d'inventaires et observations de terrain initialement prévus. Dans ce contexte, l'étude du profil des communautés végétales du CSA *via* différents indicateurs a toutefois permis l'évaluation de la patrimonialité des milieux forestiers alluviaux présents sur la zone d'étude.

Le SES de Fessenheim, profondément marqué par la construction du GCA et du CNPE, se place comme un système socio-écologique privilégié pour l'analyse sur le long terme des dynamiques paysagères et des modifications écologiques et sociologiques qui en découlent. Les travaux de ce stage démontrent ainsi l'importance de l'interdisciplinarité scientifique et de la mise en commun des données au sein des observatoires Homme-Milieux.

Conclusion :

La transposition de méthodologies existantes, telle que la photo interprétation de photographies aériennes, les matrices de transition, l'utilisation de métriques spatiales, l'analyse de données socio-démographiques, ainsi que le développement de l'outil d'analyse "EcoChange" se sont avérés pertinents et adéquats dans la reconstruction rétrospective, l'analyse et la compréhension des trajectoires paysagères, naturelles et socio-démographiques au sein du socio-écosystème de Fessenheim de 1951 à 2018. Cette approche méthodologique nous a permis de déterminer, quantifier et localiser les conséquences de la construction et l'exploitation du centre nucléaire de production d'électricité et de tout autres ouvrages anthropiques sur le socio-écosystème de Fessenheim et sur ses trajectoires paysagères, naturelles et socio-démographiques.

L'étude réalisée a permis d'exposer, dans un premier temps, que la construction dans les années 1970 du CNPE sur une zone à proximité immédiate du Grand Canal d'Alsace et principalement boisée, a eu pour conséquence de réduire les surfaces des milieux naturels et semi-naturels du socio-écosystème. Dans un second temps, sa proximité avec le bourg de Fessenheim a engendré l'arrivée au sein de la commune de nouvelles qualifications liées à l'exploitation et la production d'électricité nucléaire à Fessenheim. L'évolution fortement positive de la trajectoire démographique de la commune a pour conséquence son développement urbain et le développement de son réseau routier, tous deux se faisant préférentiellement par expansion sur des espaces agricoles.

La présente étude a également permis de mettre en évidence que la construction et l'exploitation du CNPE ne peuvent être considérées comme l'unique fait structurant du socio-écosystème sur la période étudiée. En effet, la construction du Grand Canal d'Alsace, de la centrale hydroélectrique de Fessenheim et des bassins de stockage de saumures de potasses ont, eux aussi, modifié en profondeur la structure paysagère du territoire de la commune et ce, sur une période antérieure, de 1951 à 1956. Les conséquences de leurs implantations sont multiples : (i) abaissement du Rhin par la construction du GCA (ii) perte d'espaces forestiers et prairiaux, antérieurement très peu assujettis à l'anthropisation, (iii) déprise et insularisation de la zone de l'île du Rhin qui

ont engendré une homogénéisation des milieux/habitats par un reboisement massif au détriment des milieux prairiaux, (iv) banalisation de la végétation en présence. La portion de l'Île du Rhin située sur notre site d'étude n'est donc pas l'espace naturel vecteur de biodiversité que nous pensions. L'ensemble de ces résultats conforte l'ambition du CSA et de la CCRB dans la réalisation du futur projet de réhabilitation écologique prenant place sur les anciens bassins de saumure sur l'Île du Rhin.

L'importance de l'étude de l'évolution des trajectoires paysagères, naturelles et socio-démographiques au sein du socio-écosystème de Fessenheim est ici indéniable. Celle-ci a permis une meilleure compréhension et connaissance du socio-écosystème par l'analyse de ses dynamiques passées, connaissances indispensables pour envisager l'après nucléaire à Fessenheim dans un contexte de transition énergétique et écologique nationale, régionale et locale. La fermeture du CPNE ainsi que son démantèlement seront sources de transitions pouvant mener à une modification des interactions hommes-milieux par une réorganisation progressive du territoire de Fessenheim et de son socio-écosystème. La multiplicité des enjeux et l'unicité du cas de Fessenheim à l'échelle nationale en ont fait un objet d'étude dont l'accompagnement et le suivi scientifique interdisciplinaire déjà entrepris devra se prolonger. Le cas de Fessenheim pourrait, en effet, servir comme modèle ou exemple pour de futurs projets de fermetures et de démantèlements dans le parc de production d'électricité nucléaire français.

Bibliographie :

Audinot, Samuel. s. d. « Fiches de reconnaissance, espèces exotiques envahissantes présentes et potentielles dans le Haut-Rhin », Conseil Général du Haut-Rhin, Direction de l'Environnement et du Cadre de Vie / Service Environnement et Agriculture / Unité Nature et Patrimoine Arboré

Ayena, Abraham A, Henri S V Totin, et Ernest Amoussou. 2017. « IMPACT DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LES BERGES DANS LA VALLÉE DU FLEUVE NIGER AU BÉNIN », 17.

Bertrand, Georges. 1978. « Le paysage entre la Nature et la Société ». *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen* 49 (2): 239-58.
<https://doi.org/10.3406/rgpso.1978.3552>.

Bousquet, Aurélie, Laurent Couderchet, Anne Gassiat, et Baptiste Hautdidier. 2013. « Les résolutions des bases de données « occupation du sol » et la mesure du changement : Articuler l'espace, le temps et le thème ». *Espace géographique* 42 (1): 61.
<https://doi.org/10.3917/eg.421.0061>.

Brundtland, G. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. United Nations General Assembly document A/42/427.

Comber, A. J., A. N. R. Law, et J. R. Lishman. 2004. « Application of knowledge for automated land cover change monitoring ». *International Journal of Remote Sensing* 25 (16): 3177-92.
<https://doi.org/10.1080/01431160310001657795>.

Coppin, P., I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys, et E. Lambin. 2004. « Review Article Digital Change Detection Methods in Ecosystem Monitoring: A Review ». *International Journal of Remote Sensing* 25 (9): 1565-96. <https://doi.org/10.1080/0143116031000101675>.

Cousins, Sara A. O., Alistair G. Auffret, Jessica Lindgren, et Louise Tränk. 2015. « Regional-Scale Land-Cover Change during the 20th Century and Its Consequences for Biodiversity ». *AMBIO* 44 (S1): 17-27. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0585-9>.

Delbosc, Pauline, Marion Tanné, Frédéric Bioret, Christophe Panaiotis, et Jérôme Sawtschuk. 2018. « Analyse spatio-temporelle du paysage végétal du massif du Haut-Vénacais (Corse) ». *Cybergeo : European Journal of Geography*, février. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.28937>.

European Union, et Eurostat. 2000. *Manuel des concepts relatifs aux systèmes d'information sur l'occupation et l'utilisation des sols*. Luxembourg: EUR-OP.

Franklin, S. E., et M. A. Wulder. 2002. « Remote Sensing Methods in Medium Spatial Resolution Satellite Data Land Cover Classification of Large Areas ». *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 26 (2): 173-205. <https://doi.org/10.1191/0309133302pp332ra>.

Gallet, Sébastien, et Jérôme Sawtschuk. 2015. « Évaluation de la dynamique des sites naturels par l'analyse des cartes de végétation », 5.

Harden, Carol P., Anne Chin, Mary R. English, Rong Fu, Kathleen A. Galvin, Andrea K. Gerlak, Patricia F. McDowell, et al. 2014. « Understanding Human–Landscape Interactions in the “Anthropocene” ». *Environmental Management* 53 (1): 4-13. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0082-0>.

Hooftman, D.A.P., et J.M. Bullock. 2012. « Mapping to Inform Conservation: A Case Study of Changes in Semi-Natural Habitats and Their Connectivity over 70years ». *Biological Conservation* 145 (1): 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.09.015>.

Julve, Ph., 1998 ff. - Baseflor. Index botanique, écologique et chorologique de la flore de France. Version: "2012".

Kattge, J., Bönsch, G., Günther, A., Wright, I., Zanne, A., Wirth, C., Reich, P.B. and the TRY Consortium (2012) TRY - Categorical Traits Dataset. Data from: TRY - a global database of plant traits. TRY File Archive <https://www.try-db.org/TryWeb/Data.php#3>

Kpedenou, Koffi Djagnikpo, Tcha Boukpassi, et Thiou Tanzidani K Tchamie. 2013. « QUANTIFICATION DES CHANGEMENTS DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LA PREFECTURE DE YOTO (SUD-EST TOGO) A L'AIDE DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE LANDSAT », 30.

Lagadeuc, Yvan, et Robert Chenorkian. 2009. « Les systèmes socio-écologiques : vers une approche spatiale et temporelle ». *Natures Sciences Societes* Vol. 17 (2): 194-96.

Lambin, Eric F., B.L. Turner, Helmut J. Geist, Samuel B. Agbola, Arild Angelsen, John W. Bruce, Oliver T. Coomes, et al. 2001. « The Causes of Land-Use and Land-Cover Change: Moving beyond the Myths ». *Global Environmental Change* 11 (4): 261-69. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3).

Liu, Dan, Elizabeth Toman, Zane Fuller, Gang Chen, Alexis Londo, Xuesong Zhang, et Kaiguang Zhao. 2018. « Integration of Historical Map and Aerial Imagery to Characterize Long-Term Land-Use Change and Landscape Dynamics: An Object-Based Analysis via Random Forests ». *Ecological Indicators* 95 (décembre): 595-605. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.004>.

Liu, Jianguo, Thomas Dietz, Stephen R. Carpenter, Marina Alberti, Carl Folke, Emilio Moran, Alice N. Pell, et al. 2007. « Complexity of Coupled Human and Natural Systems ». *Science* 317 (5844): 1513-16. <https://doi.org/10.1126/science.1144004>.

Lu, D., P. Mausel, E. Brondízio, et E. Moran. 2004. « Change Detection Techniques ». *International Journal of Remote Sensing* 25 (12): 2365-2401. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>.

Meyer, Teva. 2020. « Les dynamiques territoriales de la centrale de Fessenheim (1) : Analyses démographiques ». Billet. *L'atome de discorde* (blog). 7 août 2020. <https://geoposvea.hypotheses.org/567>.

Millennium Ecosystem Assessment (Program). (2005). *Ecosystems and human well-being*. Washington, D.C: Island Press.

Mobaied, Samira, Nathalie Machon, Arnault Lalanne, et Bernard Riera. 2015. « The Spatiotemporal Dynamics of Forest–Heathland Communities over 60 Years in Fontainebleau, France ». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4 (2): 957-73. <https://doi.org/10.3390/ijgi4020957>.

Munsi, Madhushree, Sumedha Malaviya, Gracy Oinam, et P. K. Joshi. 2010. « A Landscape Approach for Quantifying Land-Use and Land-Cover Change (1976–2006) in Middle Himalaya ». *Regional Environmental Change* 10 (2): 145-55. <https://doi.org/10.1007/s10113-009-0101-0>.

Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge [England] ; New York: Cambridge University Press.

Pelletier, Charlotte. 2017. « Cartographie de l'occupation des sols », 289.

Plieninger, Tobias, Hélène Draux, Nora Fagerholm, Claudia Bieling, Matthias Bürgi, Thanasis Kizos, Tobias Kuemmerle, Jørgen Primdahl, et Peter H. Verburg. 2016. « The Driving Forces of Landscape Change in Europe: A Systematic Review of the Evidence ». *Land Use Policy* 57 (novembre): 204-14. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.04.040>.

Poterek, Quentin, Pierre-Alexis Herrault, Grzegorz Skupinski, et David Sheeren. 2020. « Deep Learning for Automatic Colorization of Legacy Grayscale Aerial Photographs ». *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 13: 2899-2915. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2992082>.

Reis, Selçuk. 2008. « Analyzing Land Use/Land Cover Changes Using Remote Sensing and GIS in Rize, North-East Turkey ». *Sensors* 8 (10): 6188-6202. <https://doi.org/10.3390/s8106188>.

Ridding, Lucy E., Adrian C. Newton, John W. Redhead, Stephen C. L. Watson, Clare S. Rowland, et James M. Bullock. 2020. « Modelling Historical Landscape Changes ». *Landscape Ecology*, juin. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01059-9>.

Rindfuss, Ronald R., Stephen J. Walsh, B. L. Turner, Jefferson Fox, Vinod Mishra, et Susan Hanson Reviewed work(s): 2004. « Developing a Science of Land Change: Challenges and Methodological Issues ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101 (39): 13976-81.

Robert, Samuel, et Jacques Autran. 2012. « Décrire à grande échelle l'occupation des sols urbains par photo-interprétation. Réflexion méthodologique et expérimentation en Provence ».

Sud-Ouest européen. Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest, n° 33 (juin): 25-40.
<https://doi.org/10.4000/soe.193>.

Sahraoui, Yohan. 2016. « Le paysage, entre esthétique & écologie : modélisation rétrospective à partir de changements d'occupation du sol ». Thèse de doctorat, Besançon.
<http://www.theses.fr/2016BESA1022>.

Sheeren, D, S Ladet, O Ribière, B Raynaud, M Paegelow, et T Houet. 2012. « Assessing Land Cover Changes in the French Pyrenees since the 1940s: A Semi-Automatic GEOBIA Approach Using Aerial Photographs », 4.

Staentzel, Cybill, Jean-Nicolas Beisel, Sébastien Gallet, Laurent Hardion, Agnès Barillier, et Isabelle Combroux. 2018. « A Multiscale Assessment Protocol to Quantify Effects of Restoration Works on Alluvial Vegetation Communities ». *Ecological Indicators* 90 (juillet): 643-52.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.050>.

Turner, B. L., E. F. Lambin, et A. Reenberg. 2007. « The Emergence of Land Change Science for Global Environmental Change and Sustainability ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104 (52): 20666-71. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104>.

Turner, B. L., et W.B. Meyer. 1994. *Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective*. Cambridge University Press.

Usher, M.B. (1992). Statistical models of succession. In D. C. Glenn- Lewin, R. K. Peet, T. T. Veblen (Eds.) *Plant succession: theory and prediction* (pp. 215–248) Chapman & Hall, London, UK.

Van der Sluis, Theo, Bas Pedroli, Pia Frederiksen, Søren B. P. Kristensen, Anne Gravsholt Busck, Vangelis Pavlis, et Georgia Lavinia Cosor. 2019. « The Impact of European Landscape Transitions on the Provision of Landscape Services: An Explorative Study Using Six Cases of Rural Land Change ». *Landscape Ecology* 34 (2): 307-23. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0765-2>.

Vitousek, Peter M, Harold A Mooney, Jane Lubchenco, et Jerry M Melillo. 1997. « Human Domination of Earth's Ecosystems » 277: 6.

Walz, Ulrich, et Christian Stein. 2014. « Indicators of Hemeroby for the Monitoring of Landscapes in Germany ». *Journal for Nature Conservation* 22 (3): 279-89.
<https://doi.org/10.1016/j.jnc.2014.01.007>.

Zhao, Jun, Yanzheng Yang, Qingxia Zhao, et Zhong Zhao. 2017. « Effects of Ecological Restoration Projects on Changes in Land Cover: A Case Study on the Loess Plateau in China ». *Scientific Reports* 7 (1): 44496. <https://doi.org/10.1038/srep44496>.

Autres supports :

CSA, Conservatoire des Sites Alsaciens, 2018. Rencontre ambition « Rhin grandeur nature » : Réhabilitation écologique des bassins de stockage des saumures de l'île du Rhin, accueil du public et mise en valeur de la biodiversité Fessenheim et Blodelsheim, Haut-Rhin. Présentation power-point du 6 décembre 2018.

Ministère de la transition écologique. (2020, 21 février). « Mise à l'arrêt du premier réacteur de la centrale nucléaire de Fessenheim : Elisabeth Borne et Emmanuelle Wargon rencontrent les élus, acteurs locaux et habitants sur place ». <https://www.ecologie.gouv.fr/mise-larret-du-premier-reacteur-centrale-nucleaire-fessenheim-elisabeth-borne-et-emmanuelle-wargon>

Projet de territoire. (2019). « Projet de territoire, notre ambition commune pour le territoire de Fessenheim ». <https://www.haut-rhin.gouv.fr/Politiques-publiques/Avenir-du-territoire-de-Fessenheim/Projet-de-territoire>

EDF (2019, aout). « Dossier de démantèlement ; INB n75 Fessenheim ».

Sites internet consultés :

INEE, 2020 « Observatoires hommes-milieux (OHM) | INEE ». s. d. Consulté le 10 juin 2020. <https://inee.cnrs.fr/fr/ohm>.

Stockholm Resilience Centre, 2020. « Resilience dictionary » Consulté le 12 juin 2020. <https://www.stockholmresilience.org/research/resilience-dictionary.html>

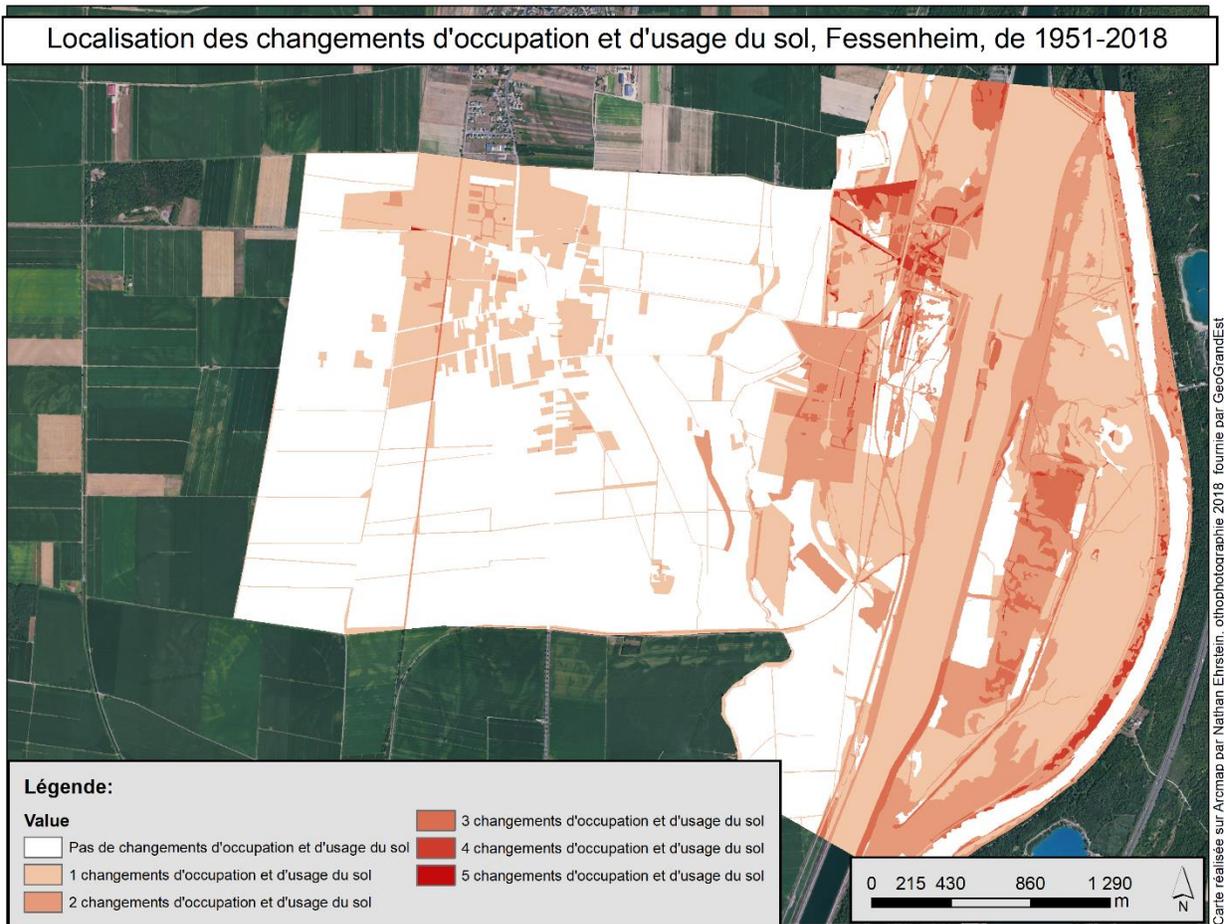
Communication personnelle :

IGN-Communication personnelle - Échange d'emails avec Stéphanie HENIN (Assistante territoriale à l'institut national de l'information géographique et forestière (IGN) – Direction territoriale nord-est) *via* Grzegorz Skupinski.

Annexes

Annexe 1 :

A. Raster de changements de 1951 à 2018



Résumé :

Trajectoires et histoire paysagère sur 67 ans de Fessenheim, un socio-écosystème en transformation : stratégies pour optimiser les transitions d'après-nucléaire

Le 20 juin 2020 marque l'arrêt définitif de la première centrale nucléaire de production d'électricité française (CNPE) à Fessenheim (Haut-Rhin, France). La compréhension d'un socio-écosystème en transformation tel que celui de Fessenheim est majeure pour développer des stratégies et optimiser la transition écologique et énergétique de nos territoires. L'utilisation de la photo interprétation, des matrices de transition, de métriques spatiales, de données socio-démographiques, ainsi que le développement d'un outil d'analyse nous ont permis la reconstruction rétrospective, l'analyse et la compréhension des trajectoires paysagères, de naturalité et socio-démographiques du socio-écosystème de Fessenheim de 1951 à 2018. Cette approche nous a permis de mettre en évidence que la construction dans les années 1970 du CNPE a pour conséquence de (i) réduire les surfaces des milieux naturels et semi-naturels du socio-écosystème (ii) induire une forte augmentation démographique de la commune qui a pour conséquence son développement urbain et celui de son réseau routier, ce faisant par expansion sur des espaces agricoles. La construction du Grand Canal d'Alsace et des ouvrages associés a, elle aussi, modifié en profondeur la structure paysagère du territoire et ce sur une période antérieure, de 1951 à 1956. Les conséquences de leur implantation sont multiples : (i) abaissement du Rhin (ii) perte d'espaces forestiers et prairiaux (iii) déprise et insularisation de la zone de l'Île du Rhin qui ont engendré une homogénéisation des milieux/habitats par un reboisement massif au détriment des milieux prairiaux (iv) banalisation de la végétation en présence. Ces derniers résultats confirment d'ailleurs l'utilité de la réalisation d'un projet de réhabilitation écologique sur l'Île du Rhin à Fessenheim.

Mots-clefs :

Socio-écosystème, Fessenheim, trajectoires, paysage, naturalité, centrale nucléaire.

Abstract:

Trajectories and landscape history over 67 years of Fessenheim, a socio-ecosystem in transformation: strategies for optimising post-nuclear transitions

June 20, 2020 marks the final shutdown of France's first nuclear power plant (CNPE) in Fessenheim (Haut-Rhin, France). The understanding of a changing socio-ecosystem such as the Fessenheim one is critical to develop strategies and optimize both ecological and energy transition of our territories. The use of photo interpretation, transition matrices, spatial metrics, socio-demographic data, as well as the development of an analysis tool have enabled us to retrospectively reconstruct, analyse and understand the landscape, naturalness and socio-demographic trajectories of the Fessenheim socio-ecosystem from 1951 to 2018. This approach enabled us to show that the construction of the CNPE in the 1970s resulted in (i) a reduction in the surface area of the natural and semi-natural environments in the socio-ecosystem and (ii) a strong demographic increase in the town, which led to its urban and road network development by expanding into agricultural areas. The construction of the Grand Canal d'Alsace and the associated anthropic structures have also profoundly modified the landscape structure of the area over an earlier period, from 1951 to 1956. The consequences of their implantation are multiple: (i) lowering of the Rhine water level (ii) loss of forest and grassland areas (iii) abandonment and insularization of the Rhine Island area, which led to a homogenization of environments and habitats through massive reforestation in opposition to grassland areas and (iv) vegetation simplification. These last results also confirm the usefulness of carrying out an ecological rehabilitation project on the Rhine Island in Fessenheim.

Keywords:

Socio-ecosystem, Fessenheim, trajectories, landscape, naturalness, nuclear power plant.