



HAL
open science

Trajectoire des socio-écosystèmes et représentation logicielle – Regards croisés sur le socio-hydrosystème de la Ligne Maginot Aquatique

Isabelle Charpentier, Cédric Viviani

► To cite this version:

Isabelle Charpentier, Cédric Viviani. Trajectoire des socio-écosystèmes et représentation logicielle –
Regards croisés sur le socio-hydrosystème de la Ligne Maginot Aquatique. 2023. hal-03983616

HAL Id: hal-03983616

<https://hal.science/hal-03983616>

Preprint submitted on 11 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Trajectoire des socio-écosystèmes et représentation logicielle – Regards croisés sur le socio-hydrosystème de la Ligne Maginot Aquatique

Isabelle Charpentier^{a,b,c}, Cédric Viviani^d

^aICUBE (UMR7357), CNRS&Unistra, 300 bd Sébastien Brant, 67412 Illkirch, France.

^bLTSEER-FR Zone Atelier Environnementale Urbaine, MISHA, 5 allée du Général Rouvillois, 67000 Strasbourg, France

^cLTSEER-FR Zone Atelier du Bassin de la Moselle, OTELO, 15 Avenue du Charmois, BP 40, 54500 Vandœuvre Les Nancy, France

^dCITERES - UMR 7324 CNRS, Maison des Sciences de l'Homme Val de Loire, 33 Allée Ferdinand de Lesseps, 37204 Tours, France

Abstract

Depuis des décennies, l'évolution des rapports humain-nature mobilisent chercheurs et méthodes issus de disciplines variées. Systèmes dynamiques, boucles de rétroaction, schémas conceptuels sont autant d'approches conçues pour modéliser tout ou partie de la trajectoire d'un socio-écosystème. Un focus analytique et logiciel sur ces méthodes permet de contextualiser le logiciel ZATimeline de conception de frises chrono-systémiques. Ces approches sont illustrées en questionnant la résilience et l'adaptation d'un socio-hydrosystème aménagé à des fins militaires.

For decades, the evolution of the Human-nature relationship has mobilized researchers and methods from various disciplines. Dynamic systems, feedback loops, conceptual schemes are approaches designed to model all or part of the trajectory of a socio-ecosystem. An analytical and software focus on these methods allows for the contextualization of the ZATimeline software designed for socio-ecosystemic timelines. These approaches are illustrated by questioning the resilience and the adaptation of a socio-hydrosystem developed for military purposes.

Keywords: Modélisation, frise chrono-systémique, adaptation, résilience, ZATimeline
(Modelling, socio-ecosystem timeline, adaptation, resilience, ZATimeline)

1. Introduction

Dans un contexte de crises climatique, écologique, énergétique et sanitaire, les milieux aquatiques sont des paysages aux enjeux particulièrement importants, susceptibles d'engendrer des conflits. Une compréhension des processus opérant dans ces socio-hydrosystèmes et de leur évolution, de leurs points de rupture et de leur capacité d'adaptation est essentielle pour éclairer leur gestion afin d'apporter des réponses cohérentes et efficaces en cas de perturbation. Plus généralement, les rapports humain – nature oscillent entre sanctuarisation et tentative de domination, destruction et renaturation, admiration et profits, au gré des changements de sociétés et de technologies d'une part, et des espaces occupés et événements naturels d'autre part. Appréhender, représenter, analyser l'évolution de ces rapports mobilisent des chercheurs issus de disciplines variées depuis plusieurs décennies.

A la fin d'une période d'abondance, les années soixante-dix voient naître des prises de conscience au-

tour de problématiques climatiques et environnementales, et des limites à la croissance (Meadows et al., 1972). Ce rapport et le modèle WORLD 3 attendant décrivent les interactions entre ressources naturelles et population par le biais de boucles de rétroaction, illustrant les trajectoires exponentielles de la consommation des ressources et de la population. Holling (Holling, 1978) propose une représentation différente des trajectoires en introduisant le cycle adaptatif. Le modèle de panarchie (Holling, 1978) en est une variante plus complexe car imbriquant trois cycles adaptatifs pour rendre compte d'échelles spatiales et temporelles différentes.

Le vocabulaire et les modèles évoluent avec cette conscientisation. Émergent ainsi les notions d'évaluation des services rendus par la nature (Westman, 1977), de valuation économique et de services écosystémiques dans les domaines de l'économie écologique (Daily, 1997) et de la biologie de la conservation (Costanza et al., 1997). Ces approches sont reprises pour l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (MEA) (World Resources Institute (WRI), 2005), modèle critiqué pour

sa vision anthropocentrée, puis par la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) dans sa notion de « nature's contributions to people » (Díaz et al., 2018).

Collins et al. (2011) proposent un cadre intégré pour la recherche socio-écologique à long terme. Leur schéma conceptuel bipolaire « modèle social – modèle biogéophysique » est muni d'interfaces figurant une boucle de rétroaction locale et des contraintes globales. Les recherches à long terme suppose aussi la collecte de données qui, traduites sous forme de séries temporelles, sont comparables aux trajectoires issues de modélisation par systèmes dynamiques tel WORLD 3, toute proportion gardée.

Les frises chrono-systémiques (Bergeret et al., 2015; Bruley et al., 2021a) offrent un autre point de vue sur la trajectoire des socio-écosystèmes. Ces répertoires temporels permettent d'associer des données hétérogènes tant qualitatives (événements, mode de gestion...) que quantitatives (données d'abondance, évaluations de services rendus). Des approches logicielles (Arnaud et al., 2022) sont aujourd'hui proposées pour visualiser et communiquer sur ces frises à différentes étapes de leur construction. Cet article se concentre sur le logiciel ZATimeline (Charpentier, 2020) qui est opérable en temps réel et mobilisable en ateliers inter- ou transdisciplinaires, en présence ou à distance.

La « Ligne Maginot Aquatique » (LMA, (Marque, 1989), Moselle-Est, France) est une ligne d'inondations défensives construite face à la Sarre (Saarland, Allemagne) dans les années trente pour inonder la vallée de la rivière Sarre et les prairies humides bordant les ruisseaux Albe et Moderbach. De ces aménagements naît un socio-hydrosystème correspondant au bassin versant rural du Moderbach comprenant six étangs-réservoirs disposés en parallèle, et qui ont été successivement gérés par l'armée puis par les communes. Celui-ci est choisi comme illustration pour questionner sa durabilité.

Cet article a un double objectif. La section 2 apporte un regard croisé sur les définitions de trajectoire et de cycle proposés pour modéliser les socio-écosystèmes en revisitant l'état de l'art. La section 3 présente un protocole de reconstruction de trajectoire. Le socio-hydrosystème de la Ligne Maginot Aquatique (Marque, 1989) est utilisé dans la section 4 pour une mise en pratique des différents concepts.

2. Cadres théoriques

La notion d'écosystème est introduite et motivée par Tansley (1935) en 1935 (Lévêque et al., 2000). L'acti-

vité humaine y est décrite comme un facteur biotique exceptionnellement puissant, perturbant l'équilibre des écosystèmes préexistants et/ou les détruisant pour en former d'autres de nature très différentes. Elle occupe ainsi une place à part en écologie, étant par la suite objectivée dans les termes anthroposystème (Lévêque et al., 2000) et socio-écosystème.

Un socio-écosystème est un système complexe dont l'étude nécessite la collecte et l'analyse de données qualitatives et quantitatives aux échelles territoriale (processus, interactions, variables, indicateurs, événements) et supra-territoriale (contraintes réglementaires ou climatiques par exemple).

2.1. Socio-écosystèmes et services

Avec l'écologie pour socle d'étude, la biologie de la conservation (Daily, 1997) pose la protection de la diversité biologique comme postulat en définissant les services rendus par les écosystèmes naturels comme des soutiens à la vie des hommes. Avec l'économie écologique, la valeur économique de ces services est à estimer (Costanza et al., 1997) afin de justifier la protection d'écosystèmes au regard d'intérêts économiques.

Le concept des services écosystémiques est institutionnalisé par l'évaluation des écosystèmes pour le millénaire (World Resources Institute (WRI), 2005) et placée au centre des politiques de conservation de la nature. Outre cette évaluation des bienfaits prodigués par les écosystèmes, il s'agit également de « comprendre comment et pourquoi les acteurs économiques utilisent les écosystèmes comme ils le font et d'évaluer l'impact relatif d'actions alternatives et ainsi guider la prise de décision » (Salles, 2010).

L'un des éléments clés les plus récents du cadre conceptuel de l'IPBES est la notion de contributions de la nature (Díaz et al., 2018), qui s'appuie sur le concept populaire de services écosystémiques (World Resources Institute (WRI), 2005).

2.2. Schémas conceptuels

Collins et al. (2011) proposent un cadre intégré multi-scalaire pour la recherche socio-écologique sur le temps long. Leur schéma conceptuel bipolaire « modèle social – modèle biogéophysique » est muni deux interfaces figurant une boucle de rétroaction comme dans la figure 1. Dans cette boucle, les actions humain-nature sont décrites comme des « pressions (long terme) – impulsions (événementiel) » sur le modèle biophysique plus ou moins directement imputables aux activités humaines. Les services écosystémiques sont décrits en retour.

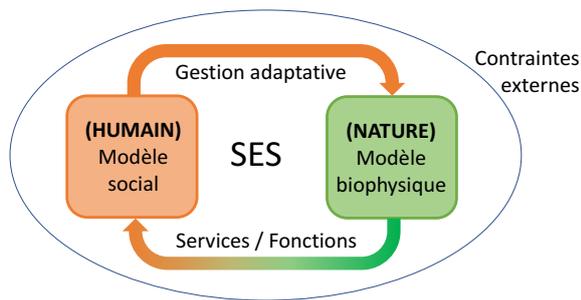


FIGURE 1 – Schéma conceptuel simplifié, combinant des éléments de (Collins et al., 2011; Haines-Young and Potschin-Young, 2010; Bretagnolle et al., 2019)

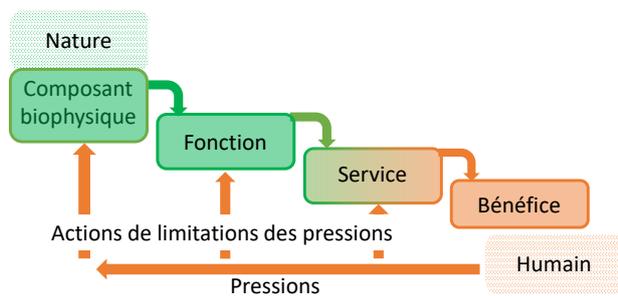


FIGURE 2 – Cascade de services.

La cascade de service (Haines-Young and Potschin-Young, 2010) développe l'interface humain – nature en partant d'une structure ou d'un processus biophysique. Ce modèle décompose le lien entre le composant biophysique et les bénéfices que peuvent en tirer les populations humaines à la manière d'une « chaîne de production ». La cascade présentée dans la figure 2 est une adaptation affichant les modèles humain et nature. Une même palette de couleurs est employée pour souligner les ressemblances entre schéma conceptuel et cascade de service.

Dans (Bretagnolle et al., 2019), le réseau des zones ateliers reprend ces schémas en se positionnant à l'échelle du socio-écosystème (Collins et al., 2011). Ce schéma conceptuel propose une interface de gestion adaptative et formalise les rétroactions du modèle biophysique allant des fonctions de l'écosystème aux services rendus, puis aux bénéfices pour la société (Haines-Young and Potschin-Young, 2010). La dimension temporelle étant implicite, ces différents schémas peuvent être vus comme une pose du socio-écosystème considérée valable sur une période plus ou moins longue.

Le cycle adaptatif de Holling (1978) est de nature différente car il questionne la résilience et la stabilité des systèmes écologiques (Holling, 1973) plutôt que

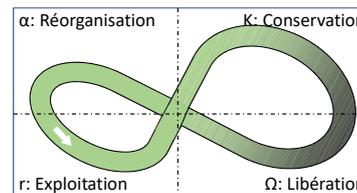


FIGURE 3 – Cycle adaptatif.

la gestion adaptative et la réponse des écosystèmes. Ce cycle comporte quatre phases : « r : Exploitation », « K : Conservation », « Ω : Décharge » et « α : Réorganisation ». Dans les faits, il suppose une crise entre les phases K et Ω conduisant à la libération de ressources permettant au système de se réorganiser. Des exemples illustrant la figure 3 sont proposés dans la littérature ((Robert, 2020), par exemple).

Plus complexe, le modèle de panarchie (Holling, 1978) imbrique trois niveaux de cycles adaptatifs pour capturer l'évolution multi-scalaire du système et de ces composantes au sein d'un environnement global. Au regard du schéma conceptuel de la figure 1, ces cycles concernent des processus « rapides » internes aux modèles social et biogéophysique, le cycle « modéré » du schéma conceptuel, et l'évolution « lente » des contraintes externes.

2.3. Frise chronosystémique

Reconstruire l'activité passée permet d'analyser la gestion courante et d'élaborer des scénarios futurs.

Les données spatio-temporelles sur la biodiversité, sur le climat, sur la population, sur les modes de gestion et de gouvernance du territoire, sur les interactions humain-nature sont nécessaires à la reconstitution de la trajectoire d'un socio-écosystème. Elles demeurent insuffisantes à son analyse tant qu'elles ne sont pas liées.

Une frise chronologique est un diagramme classique, plus ou moins simple, permettant de rapporter de l'information hétérogène (jalons, événements, tendances, contraintes...) sur l'activité d'un projet, d'une société, d'un écosystème ou d'un socio-écosystème. Ses atouts sont nombreux. La frise facilite la représentation et l'analyse d'interrelations complexes. La frise peut être mise en regard de séries temporelles pour soutenir une analyse quantitative et qualitative. Ses « vides » permettent d'identifier les manques de données et invitent les chercheurs à combler ces lacunes.

Des frises chrono-systémiques ont été co-construites en atelier et utilisées comme outil de médiation avec les acteurs du territoire (Bergeret et al., 2015; Bruley

et al., 2021b). D'autres valorisations sont possibles (Arnaud et al., 2022). Par exemple, l'information recueillie peut être structurée sous forme de base de données, puis mise à disposition du public au moyen d'une application spatio-temporelle interactive telle que Chrono-Rhône (Arnaud, 2019).

3. Représentation logicielle

Holling fut parmi les premiers écologues à reconnaître l'importance des systèmes dynamiques non-linéaires pour la modélisation de la trajectoire et des instabilités des écosystèmes. Il introduit alors le cycle adaptatif et le modèle de panarchie.

Cette section est consacrée à des représentations logicielles de trajectoires et de cycles mobilisables dans l'étude des socio-écosystèmes.

3.1. Trajectoire d'un socio-écosystème

En physique, la trajectoire d'un système en mouvement décrit l'ensemble des positions successives de son centre de gravité, ou plus généralement l'ensemble de ses états, au cours du temps et dans un référentiel choisi. En supposant qu'un socio-écosystème ait un centre de gravité, la même définition pourrait s'appliquer.

Les états d'un système peuvent être capturés en observant la trajectoire décrite par ses éléments. Lorsque la complexité augmente (par exemple dans le cas un socio-écosystème), le suivi multi-scalaire de variables spécifiques, d'indicateurs composites, ou de certaines composantes, informe partiellement sur la trajectoire du système étudié. Ainsi, le rapport Meadows et al. (1972) prédit-il l'évolution de la croissance macro-économique, ses conséquences sur les ressources et ses limites, à l'échelle mondiale, en évaluant des variables composites.

3.2. Trajectoires et cycles

Modéliser un système requiert d'identifier les variables d'intérêt, de formuler le système dynamique à l'aide de paramètres et de boucles de rétroaction. Due à la complexité des écosystèmes, seules les interactions de quelques composantes sont étudiées comme par exemple dans les modèles proies-prédateurs. Valeurs initiales et paramètres du modèle sont identifiées à l'aide de jeux de données issus de l'observation directe ou indirecte de la trajectoire des variables.

Deux variables d'un système synthétique sont utilisées pour apporter différents points de vue sur les cycles et les trajectoires évoqués dans la section 2. Dans la

figure 4.a, la trajectoire tridimensionnelle de ce système (courbe magenta) est construite comme la composition de sinusoides présentant des différences de période, de phase et d'amplitude pour mimer une variable dite « lente » (courbe bleue) et une variable deux fois plus « rapide » (courbe rouge). L'évolution de ces deux variables est tracée dans la figure bidimensionnelle 4.b. Chaque courbe est la somme d'une courbe porteuse (grande amplitude, période longue) et de perturbations haute fréquence de faible amplitude. Ces perturbations pourraient représenter un cycle saisonnier par exemple. On remarque que les petites oscillations de la figure 4.b correspondent à de petites boucles dans la figure 4.a.

Le comportement qualitatif d'un tel système est décrit dans (Holling, 1978, p. 26) pour dans l'analyse de la perte de production de coton dans une vallée péruvienne antérieurement consacrée à la production de maïs (Smith and van den Bosch, 1967). La prolifération d'insectes devenus ravageurs, l'utilisation de pesticides non sélectifs, l'apparition de nouveaux ravageurs, l'abandon des pesticides par manque de résultats et par augmentation des coûts, la mise en place de nouvelles pratiques et l'introduction d'insectes bénéfiques sont autant d'éléments marquant l'évolution des variables lente (perte de production) et rapide (population d'insectes) vers un retour à une production souhaitée après réorganisation du système. D'autres exemples figurent dans la littérature.

Un troisième mode de représentation consiste à tracer l'évolution de la variable lente par rapport à la variable rapide dans un diagramme de phase (Fig. 4.c). Dans ce cas, la courbe porteuse de notre exemple synthétique décrit le cycle adaptatif décrit par Holling.

Au-delà des courbes porteuses décrivant des tendances sur le long terme, les petits cycles peuvent quant à eux être identifiés à la boucle décrite par les schémas conceptuels (Collins et al., 2011; Bretagnolle et al., 2019) et/ou à des variations annuelles. La combinaison de ces deux comportements est comparable à une panarchie simplifiée à deux niveaux.

3.3. Données hétérogènes et frises chrono-systémiques

Dans un cycle, la représentation partiellement implicite du temps a tendance à masquer de précieuses informations sur la trajectoire suivie par ce système. Par exemple, l'évolution des modes de gouvernance ou des interactions humain-nature n'est pas explicitement figurée dans les schémas conceptuels.

ZATimeline (Charpentier, 2020) est une contribution méthodologique et logicielle à la représentation et à l'analyse de l'évolution des socio-écosystèmes sur la

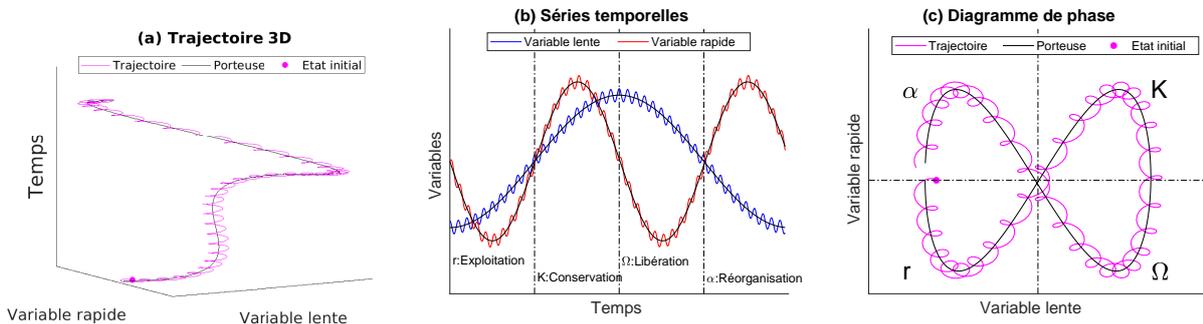


FIGURE 4 – Trois points de vue sur une même trajectoire. (a) Représentation tridimensionnelle, (b) Séries temporelles (projections bidimensionnelles), (c) Diagramme de phase (projection bidimensionnelle éliminant le temps).

base de chronologies et de frises. Ce logiciel a été proposé dans le cadre de l'action transversale Homme-nature du réseau des Zones Ateliers. Le protocole de construction de la frise comprend 5 étapes.

Collecte . Des données quantitatives et qualitatives hétérogènes décrivant le socio-écosystème et notamment l'évolution des interactions humain-nature, sont collectées dans différents médias (littérature grise, littérature scientifique, cartes...) par différentes méthodes (bibliographie, cartographie, entretiens...) auprès de différentes agences et/ou personnes. Les données portant sur des événements, les séries chronologiques, les indicateurs, les tendances sont les bienvenues pour appuyer l'analyse. Une attention particulière peut être portée sur les pratiques, les services écosystémiques, les contribution de la nature (Collins et al., 2011; Bretagnolle et al., 2019; Díaz et al., 2018), par exemple.

Encodage . Des données de nature très différentes peuvent être qualifiées et situées dans le temps. L'encodage minimal proposé repose sur l'usage d'un tableau et d'un tableau comportant quatre entrées : un nom, une date de début, une date de fin, et des éléments de style pour la représentation (figure 5). Ce tableau est une représentation de la trajectoire du socio-écosystème.

Le tableau est l'outil de médiation entre l'utilisateur et ZATimeline. L'utilisateur et ZATimeline bénéficient des capacités de la suite Office pour préparer et retravailler les données. L'utilisateur peut ajouter d'autres colonnes pour indiquer ses sources ou procéder à des tris. Ces colonnes ne sont pas prises en compte dans la visualisation pour l'instant.

Par exemple, les contraintes externes (nationales, européennes et internationales) en matière de climat, de protection et de gestion de l'eau, des oiseaux, des habitats faune et flore sont encodées dans le tableau de la

| NAME | START | END | STYLE |
|---------------------------|----------|----------|-------------------|
| Changement climatique | 19870101 | 20400101 | left red text |
| Tempête | 19991226 | 19991226 | star blue text |
| Directives Oiseaux | 19790402 | 20091130 | square green text |
| Directive Habitats | 19920521 | 19920521 | square green text |
| Directive Cadre sur l'Eau | 20001001 | 20001001 | square blue text |
| Convention de Ramsar | 19710202 | 19710202 | square blue text |
| Sommet de Rio | 19920603 | 19920614 | square green text |
| Millennium Ecosystem | 20010101 | 20050101 | square green text |
| Espaces naturels Sensib | 19761231 | 19761231 | square green text |
| Zones Nat. d'Intérêt Éco | 19820101 | 19820101 | square green text |
| Grenelle (1) | 20101207 | 20101207 | square green text |
| Grenelle (2) | 20090308 | 20101207 | square green text |
| Gemapi | 20140101 | 20140101 | square blue text |

FIGURE 5 – Copie d'écran du tableau avec données décrivant des contraintes externes (climat et conventions nationales, européennes et internationales).

figure 5.

Représentation . La représentation est réalisée au moyen de l'interface du logiciel ZATimeline, voir figure 6. Il s'agit de charger la feuille de calcul (Load), de choisir la période (Tmin,Tmax) et de tracer (Plot). Le tracé demande 2 ou 3 secondes et permet une visualisation en temps réel lors de la co-construction de frises en ateliers, par exemple.

Les représentations proposés sont le diagramme de Gantt ou le diagramme de Gantt trié par date. Les données sont alors interprétées séquentiellement par ZATimeline et sont visualisées (du haut vers le bas) dans une frise chronologique.

La représentation nommée SES utilisée dans la section 4 est plus compacte et permet d'afficher plusieurs données par ligne. Pour en bénéficier, l'utilisateur ajou-

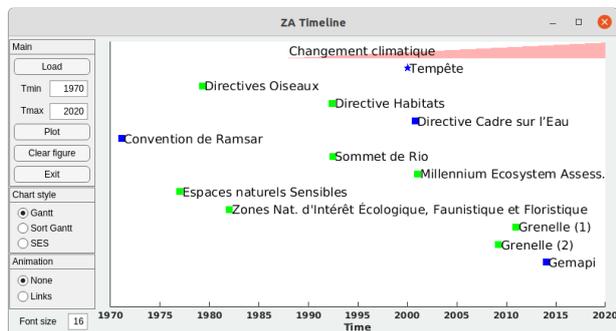


FIGURE 6 – Interface de ZATimeline et frise correspondant aux données de la figure 5. Bleu : Hydrologie, Rouge : Climat, Vert : Écologie.

tera une colonne à son tableau pour préciser les changements de lignes

L'interface graphique de ZATimeline et l'usage du tableur ont facilité l'appropriation de l'outil par les chercheurs en science de l'environnement et en sciences humaines et sociales du réseau des zones ateliers (Alignier et al., 2020; Cognard et al., 2020; Guerbois et al., 2020; Pinault et al., 2020; Viviani, 2020).

Analyse . La frise tracée est analysée. Son observation peut faire apparaître le besoin de réordonner les données, puis de retracer la frise pour affiner l'analyse. De même, les zones vides invitent à la recherche de données complémentaires.

Publication . La fiche de métadonnées (Charpentier and Viviani, 2023) et les données (tableur et image d'une frise en mode Gantt) sont déposées dans l'entrepôt de données InDoRES en suivant les principes du FAIR (Fouillable, Accessible, Interopérable, Réutilisable) (Wilkinson et al., 2016).

Favoriser la production de jeux de données de trajectoire de socio-écosystèmes vérifiant les principes du FAIR est l'un des principaux objectifs de la démarche ZATimeline. Ultérieurement, une comparaison de frises chrono-systémiques pourra être engagée sur la base des jeux de données produits grâce à ZATimeline.

Note . Bien que le logiciel ZATimeline soit développé dans l'environnement de programmation Matlab, son utilisation ne requiert pas l'achat d'une licence.

4. Résultats

Les modèles présentés dans les précédentes sections sont appliqués à un paysage stagnante façonné au siècle dernier (Marque, 1989; Mathis, 2014) pour comprendre

les dynamiques de son socio-écosystème. En particulier, l'évolution des services écosystémiques est étudié au regard des changements de gouvernance et de gestion.

4.1. Cas d'étude

En 1919, suite à la première guerre, le traité de Versailles porte en lui les germes d'un futur conflit. Il est décidé la construction d'une ligne de défense, dite ligne Maginot, comportant des régions fortifiées et des intervalles.

Au nord-est du Plateau lorrain, la rivière Sarre (Moselle-Est) draine des terrains à marnes irisées (Keuper moyen). Cet hydrosystème et l'argile des sols sont exploités dans les années 1930 pour construire et mettre en œuvre une ligne d'inondations défensives. Nommée « Ligne Maginot Aquatique » (Marque, 1989), cette ligne d'eau implique la rivière Sarre entre Sarralbe (57) et Herbitzheim (67) et les ruisseaux Albe et Moderbach. Les étangs du Stock (57) et de Gondrexange (57) sont utilisés en soutien à la Sarre, et des étangs-réservoirs sont construits sur plusieurs ruisseaux tributaires du Moderbach.

D'une superficie de 89 km², le bassin versant rural du Moderbach (aussi appelé Mutterbach en francique) est profondément modifié par la construction de 11 digues à cœur d'argile d'une longueur moyenne de 238 m délimitant 6 étangs-réservoirs (6,41 millions de m³) sur ses affluents, et 5 barrages à pertuis sur le cours d'eau principal pour créer en 3 jours des retenues d'eau (2,88 millions de m³) par vidange partielle des étangs (Marque, 1989; Chiffre et al., 2017). Des données complémentaires (hauteur d'eau, surface de bassin versant, temps de séjour) figurent dans les « études préalables à l'aménagement du Mutterbach » (ECOLOR, 1998b,a). Dans la figure 7, les éléments remarquables à cette échelle sont les six étangs rétrocédés aux communes par l'armée en 1974, le noeud routier de Puttelange-aux-lacs, un tronçon de l'autoroute A4 construit entre 1975-1976 et le demi-échangeur de Puttelange-aux-lacs (2002), la piste cyclable aménagée en 2014.

Dans ce bassin prend place le socio-écosystème de la Ligne Maginot Aquatique qui tient son originalité de sa genèse, de son artificialité et de ses dimensions touristiques et culturelles. Réservoirs d'eau et de biodiversité dans un contexte de changement climatique, espace touristique dans une Moselle rurale qui attire peu les vacanciers, ce socio-hydrosystème est un paysage à enjeux locaux forts. Aujourd'hui, évènements climatiques contemporains (tempêtes, sécheresses), usure des matériaux sont autant de pressions sur ces digues et ces étangs, fédérant les acteurs du territoire autour d'enjeux tels que l'entretien des ouvrages, la gestion du risque,

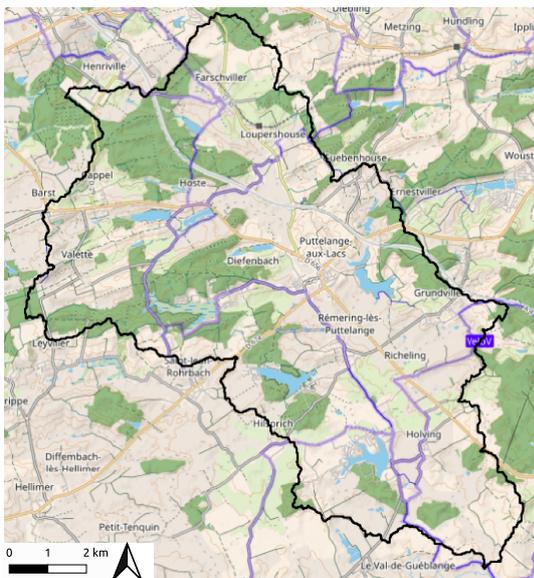


FIGURE 7 – Bassin versant du Moderbach et voies de communication (EPSG :3857). (rajouter les modes de communication. Source : OpenStreetMap, CyclOSM)

l’attractivité du territoire, le maintien de la mémoire, la renaturation...

Les différents cadres théoriques présentés dans la section 2 sont mobilisés successivement pour étudier la question de la durabilité de la Ligne Maginot Aquatique face aux pressions naturelles et anthropiques.

4.2. Schéma conceptuel

En référence à la figure 1, les contraintes externes comprennent les éléments législatifs, institutionnels et réglementaires (principalement environnementaux) aux échelles internationales et nationales (voir figures 5 et 6). A ceux-ci s’ajoutent les changements globaux – climat, cycles biogéochimiques (eau, azote, carbone), érosion de la biodiversité – motivent des mesures réglementaires en cohérence avec les enjeux induits localement.

Comme dans (Bretagnolle et al., 2019), le modèle social est appréhendé selon deux entrées. Les capitaux prennent en compte les connaissances locales du territoire (Ligue de protection des oiseaux et association de la Maison Güth, habitants) qui participent à la valorisation des étangs, on parlera alors de capital humain, intellectuel, culturel et social. Les processus sociaux regroupent les modes de gouvernance (élus locaux, syndicats, services de l’État) et les législations locales (documents d’urbanisme) ainsi que les pressions anthropiques, notamment liées au tourisme.

Le modèle biophysique est composé de ces deux entrées. Le capital comprend l’hydrosystème, les sols, les digues, l’eau stockée dans les étangs et la biodiversité qui y est attachée. Les processus biophysiques à l’œuvre sont le ruissellement, l’eutrophisation, l’usure des matériaux que les aléas climatiques tels que les sécheresses influencent notablement. L’agriculture de ce territoire rural n’est pas traitée dans cet article.

C’est au niveau de l’interface de gestion adaptative que se situent les actions de conservation, de préservation et de mise en valeur. La gestion est faite d’études, de recherche de financements et de mises aux normes réalisées en réponse aux contraintes précédemment citées et à leur évolution, mais aussi à la préservation et l’évolution des services rendus. L’interface des services écosystémiques est décrite par une cascade de services dans le paragraphe 4.4.

Dans le schéma conceptuel 1), le mot adaptatif est présent et l’évolution sur le long terme est implicite. Par contre, l’évolution sur le temps long est absente. Autrement dit, la dimension temporelle est sous-représentée par l’utilisation d’un schéma cyclique unique, masquant certaines dynamiques du socio-écosystème.

4.3. Frise chrono-systémique

Six étangs sont localisés sur les territoires des communes de Hoste (étangs de Hoste-Haut et de Hoste-Bas), de Puttelange-aux-Lacs (étang de Dieffenbach et du Welschhof), de Rémering-lès-Puttelange (étang des Marais) et de Holving (étang de Hirbach). Ils ont été rétrocedés aux communes par l’armée le 30 octobre 1974. Depuis lors, les fonctions des étangs ont évolué ouvertement vers des activités de pêche et de tourisme. Trois d’entre eux sont concernés par des activités de camping et de baignade.

Ce paragraphe spécifie certaines étapes de construction et d’analyse d’une frise chrono-systémique. Se faisant, il prépare également les informations nécessaires à une mise à disposition du jeu de données suivant les principes FAIR.

4.3.1. Construction

La collecte de données a principalement eu lieu au premier semestre de 2020 lors d’un stage de Master 2 (Viviani, 2020) réalisé dans le cadre l’action transversale Homme-nature du réseau des Zones Ateliers. Elle s’est articulée autour d’un travail de bibliographie, de cartographie, d’analyse de séries temporelles, et de quelques entretiens pour recueillir les savoirs locaux. Ces données sont consultables dans (Viviani, 2020).

Une sélection de ces données hétérogènes ((Charpentier and Viviani, 2023)) est encodées dans la fiche de calcul, puis tracées dans la figure 8 en mode SES.

4.3.2. Analyse

Pour étudier l'évolution des interactions humain-nature à l'œuvre dans le socio-écosystème de la LMA, nous avons choisi d'organiser données en les classant verticalement selon les composantes du schéma conceptuel (Bretagnolle et al., 2019). Les données sont tracées dans le mode de représentation SES.

Cette représentation visuelle permet de mettre en exergue les points de rupture correspondant à des changements de mode de gestion et de pratiques. Dans la figure 8, nous identifions trois phases, toutes modélisables avec un schéma conceptuel.

Géranche militaire . Cette phase va des années 1930 aux années 1970. Après la validation des crédits Maginot, la construction des digues commence en 1932 et s'achève en 1935. L'argile est prise sur place. Un cumul de précipitations de 1 an et demi à 3 ans est nécessaire pour remplir ces réservoirs sur-dimensionnés positionnés en tête de bassins. De premières parties de pêche ont lieu.

La population est évacuée le 1er septembre 1939 en même temps qu'un front de 9 km s'installe. La vallée est partiellement inondée à partir d'octobre 1939 et le demeure jusqu'en juin 1940 (figure 9, (Armeekorps Oberkommando 1, 1940)) du fait d'événements climatiques exceptionnels (précipitations intenses d'octobre 1939, suivies d'un hiver 1940 très rigoureux). Des simulations numériques et des cartes anciennes (Hariri, 2021) montrent que ce sont les précipitations associées à la fermeture des pertuis qui ont inondé la vallée du Moderbach en 1940. Pour ce faire, les données météorologiques de Kaiserslautern (à 65 km) ont été mobilisées (Klein Tank et al., 2002).

Une partie de la population fait son retour en août 1940 à la demande des autorités allemandes.

Bien plus tard, au milieu des années 1960, quelques cabanons font leur apparition autour de certains étangs confirmant un usage récréatif plus marqué.

Conquête des étangs . Cette phase s'étend des années 1970 aux années 1990. Puttelange-lès-Farschviller change de nom pour Puttelange-aux-lacs en 1971. Les étangs sont rétrocédés aux communes en 1974 qui créent le syndicat intercommunal pour la mise en valeur des étangs de la région de Puttelange-aux-Lacs (SIM-VER).

L'aménagement du bassin versant se poursuit. Les communes adoptent leur document d'urbanisme et

mettent en place certains aménagements comme des stations d'épuration. L'autoroute A4 se construit dans le bassin à partir de 1975 à 1976. Dès 1972, les élus souhaitent la création d'un échangeur. L'argumentaire est clair. « Depuis 1973, un fait nouveau est intervenu : les lacs de l'ex-ligne Maginot sont devenus la propriété d'un syndicat intercommunal créé précisément en vue de leur exploitation sur le plan touristique » (Fritsch, 1976).

La conquête des étangs par les touristes et les habitants est enclenchée depuis le milieu des années 1960. Progressivement, les habitats autrefois composés de chalets et d'installations provisoires se pérennisent et s'étendent par des constructions en « dur » ce qui n'est pas sans conséquences pour la biodiversité locale. Les activités anthropiques (et les chats) participent au déclin de certaines espèces sur le territoire à l'instar des Rousserolles ou des Grèbes Huppées.

Sur les étangs, les pratiques de la pêche se démocratisent. Ces activités piscicoles et l'alevinage ont par ailleurs un effet positif pour l'avifaune locale qui vient se repaître des poissons rejetés par les pêcheurs. Nous sommes ici à l'interface entre les services écosystémiques offerts par les étangs et des services environnementaux produits par les activités anthropiques.

Renaturation . En cours depuis les années 2000, cette dernière phase s'inscrit dans un contexte de changements climatique et réglementaires que l'on retrouve à l'échelle locale. Par exemple, les zones constructibles sont définies dans l'ensemble du bassin versant marquant la fin de l'urbanisation sauvage.

Un bilan exhaustif « milieu physique, occupation des sols et milieux naturels remarquable, milieu humain » est conduit en 1998 en prélude au réaménagement du bassin du Moderbach.

Côté étangs, des travaux de renaturation (diversification des roselières et création de chenaux, engraissement des berges, plantations, curage et dévasage...) sont réalisés en même temps que les travaux de mise en sécurité des digues. Le suivi écologique mis en place à la suite de ces travaux fait état du retour de certaines espèces disparues (Balbuzard Pêcheur, Blongios Nain) mais également d'une meilleure qualité environnementale avec notamment une réduction de l'eutrophisation.

La renaturation des étangs a augmenté leur valeur attractive. Les zones d'alimentation, de refuge ou de protection pour la faune ont progressé en quantité et en qualité, en particulier pour les insectes. Ils participent à l'expression d'espèces et d'habitats rares en Lorraine.

Côté ruisseaux, en application de la directive cadre sur l'eau, quatorze seuils (Hosterbach et Moderbach)

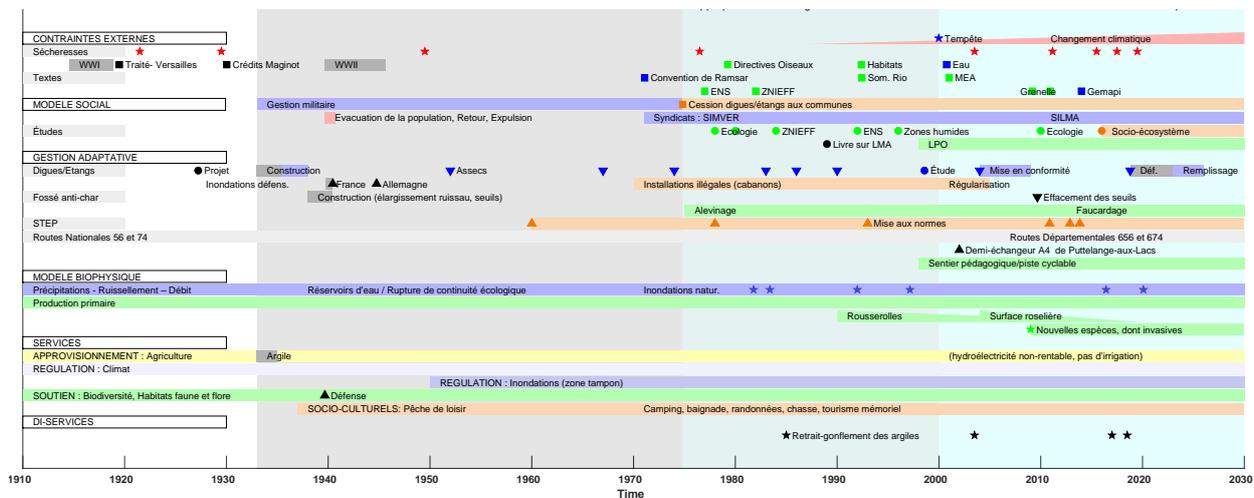


FIGURE 8 – Frise chrono-systémique organisée selon le schéma conceptuel du réseau des zones ateliers.
Légende : □ Cadre réglementaire/conventions, ○ Études, ★ Évènements remarquables, △ Mise en œuvre, ▽ Effacement. Noir : Défense, ouvrages et géologie, Bleu : Hydrologie, Rouge : Climat, Vert : Écologie, Orange : Société.

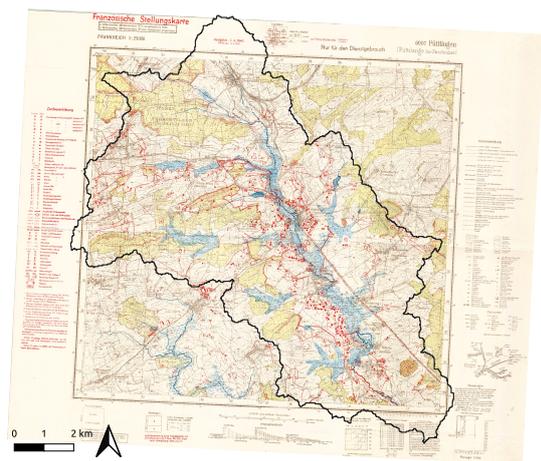


FIGURE 9 – Inondations au 6 juin 1940. Carte géoréférencée (EPSG :3857) du bassin du Moderbach. Bleu : Zones inondées, étangs, Rouge : Ouvrages et aménagements militaires (Source : 1.Armee(Armeekorpskommando 1, 1940)).

sont supprimés le long des cours d'eau avec pour objectifs la gestion des inondations, l'amélioration de la qualité de l'eau et le rétablissement des continuités écologiques (Agence de l'eau Rhin Meuse, 2010). Les résultats attendus ne sont pas au rendez-vous dans cet hydrosystème si particulier.

Entre 1936 et 1939, le ruisseau Hosterbach est élargi en fossé anti-chars. Neuf seuils de 8 m de long et 1.5 m de haut sont disposés pour remplir ce fossé et compléter la ligne d'eau défensive. Avant restauration, ces mares

sont alimentées par un bassin versant dont il faut retirer les sous-bassins relatifs aux étangs de Hoste-Haut et Hoste-Bas. Après restauration, il n'y a plus suffisamment de débit pour soutenir l'Hosterbach, la végétation reprend ses droits. Cette partie de trame bleue artificielle est devenue pour l'essentiel une trame verte que draine un cours d'eau intermittent.

Un demi-échangeur financé à 90% par le Conseil Général de la Moselle est créé au nord de Puttelange-aux-lacs en direction de Metz et Sarrebruck. Des pistes cyclables sont aménagées en 2014 et connectées avec le réseau allemand. Ces deux initiatives permettent de continuer à drainer un tourisme transfrontalier.

En 2010, le SIMVER est renommé syndicat intercommunal de la Ligne Maginot Aquatique (SILMA) pour affirmer les labels Maginot et Aquatique dans sa mission de valorisation mémorielle et touristique du territoire.

4.4. Cascade de services « digue-étang »

Une cascade de service est un outil d'évaluation des écosystèmes et des services possibles et rendus. Elle permet de représenter un cycle s'achevant sur les actions destinées à limiter les pressions subies et restaurer les fonctions écologiques, le choix des actions ou des transformations relevant des gestionnaires.

Le modèle de cascade (Haines-Young and Potschin-Young, 2010) est spécifié dans la figure 10 en choisissant le couple « digue-étang » comme structure biophysique. Celui-ci est alors considéré comme le centre de gravité du système, tel qu'évoqué à la sous-section 3.1.

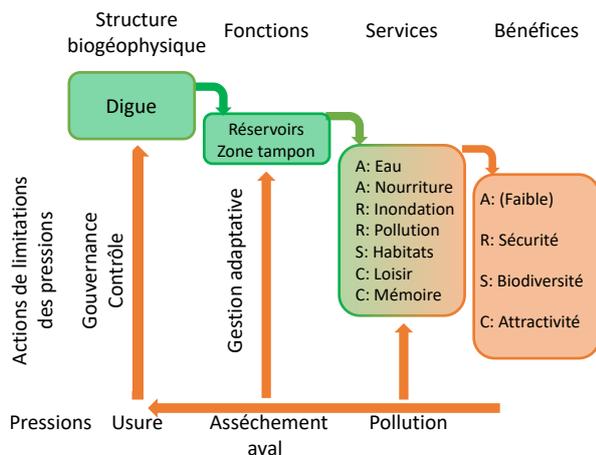


FIGURE 10 – Cascade pour le couple « digue-étang »

Comme indiqué dans la frise, les fonctions anthropiques de ces espaces ont évolué de réservoirs pour la mise en œuvre d'inondations défensives, à zone tampon de protection contre les inondations. Leurs fonctions naturelles sont celles de réservoirs isolés profonds, créant une rupture dans la continuité écologique de plusieurs petits cours d'eau de tête de bassin. En conséquence, les digues sont sous compétence GEMAPI (Gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations), alors que les étangs ne le sont pas.

Les services écosystémiques attendus d'un étang sont présents, mais ne sont pas nécessairement mobilisés. Il s'agit de l'approvisionnement en eau et en nourriture, de la régulation locale du climat, de la pollution et des inondations, du soutien aux habitats (avifaune, entomofaune, ichtyofaune), et de services culturels de loisirs et de tourisme mémoriel.

Les principaux bénéfices sont une contribution très forte à la création d'habitats pour la faune et la flore d'une part, et à l'identité et à l'attractivité de ce territoire frontalier d'autre part. Les autres bénéfices sont moindres. Le stock d'eau n'est pas vu comme tel, car il n'a jamais servi ni à l'approvisionnement en eau des populations, ni à l'irrigation. Comme les cinq plus grands réservoirs sont en tête de bassin, ces étangs ne sont véritablement pêchés qu'au moment des assecs, environ une fois tous les 20 ans, car leur temps de remplissage varie de un an et demi à trois ans. La Ligne Maginot Aquatique ne suit pas le schéma classique des paysages d'étangs disposés en chapelet.

En conséquence, les gestionnaires préservent le capital « eau » en étanchéifiant les vannes des étangs et en satisfaisant les demandes des services de l'état en

matière de contrôle (ouvrages et qualité de l'eau) ou de mise aux normes pour limiter les pressions sur les digues et les étangs, mais aussi pour limiter les assecs.

4.5. Cycle adaptatif

Le socio-hydrosystème de la LMA offre six répliques « digue-étang » différant sur leurs aménagements et leur gestion courante. Certains étangs sont dédiés à la pêche. Ainsi, dix-huit postes de pêche sont aménagés autour de l'étang de Hoste-Haut (le plus naturel), tandis que des dizaines de pontons et de cabanons privés sont installés autour des étangs de Hoste-Bas, du Welschhoff et de Hirbach. Des trois campings municipaux bordant les étangs de Dieffenbach, de Rémering-lès-Puttelange, et de Holving, ne demeure que ce dernier. Le cas de ces campings est révélateur de modes de gestion différents.

En octobre 2018, suite à la pose de piézomètres sur la digue de l'étang de Dieffenbach, une communication entre digue et étang est un signe d'un défaut dans la structure, et donc d'un risque de rupture à plus ou moins long terme. Bombardée pendant la seconde guerre mondiale, réparée rapidement, victime de l'usure des matériaux, la digue subit la tempête de décembre 1999. Les travaux conduits dans les années 2000 (ECOLOR, 1998b,a) se révèlent finalement insuffisants en 2018.

Dans le cas de l'étang de Dieffenbach, on peut mobiliser le cycle adaptatif de Holling car celui-ci suppose une crise entre les phases de conservation et de libération qui peut permettre une réorganisation du socio-écosystème local.

Fin 2018, l'étang est mis en assec en urgence (crise), le camping vétuste est évacué pour faire de la place à un nouveau projet touristique (qui reste à définir). Cette phase Ω du cycle de Holling (figure 3) correspond à la libération. Une grande partie des terres émergées (hors camping) sont mises en cultures fourragères. Quatre années d'études et de recherche de financement conduisent à une rénovation de la digue au titre du développement rural. Fin 2022, commence la réorganisation (phase α). Les vannes sont fermées, l'étang se remplit.

La mise en assec de l'étang a modifié le paysage, la structure biophysique ainsi que les activités anthropiques. En référence à la figure 4, le niveau d'eau dans l'étang peut être pris comme variable lente. La variable rapide correspond à la population logeant autour de l'étang (résident, résidents estivaux, touristes de passage). Elle variait annuellement jusqu'à l'évacuation du camping.

De son côté, Rémering-lès-Puttelange a fermé son camping municipal pour faire place à un camping privé, réservant son étang et ses abords à la pêche et à la pro-

menade. Ce second cas relève d'une gestion adaptative suivant le schéma conceptuel (Bretagnolle et al., 2019).

Ces deux exemples montrent clairement que le cycle et la panarchie de Holling ne correspondent pas à un mode de gestion adaptative classique.

4.6. Discussion

Comprendre les événements du passé, leurs impacts, positifs ou négatifs, est nécessaire pour mettre en place une gestion adaptative et pour contribuer à améliorer ou rétablir les fonctions des écosystèmes.

La notion de « cycle » ou de « cycle adaptatif » est prégnante dans les schémas conceptuels et apparaît comme incontournable pour comprendre un socio-écosystème sur une période donnée. Néanmoins, un cycle propose une représentation partiellement implicite du temps et son usage a tendance à masquer de précieuses informations sur la trajectoire suivie de ce système telle que par exemple l'évolution des modes de gouvernances et des interactions humain-nature.

Les frises chrono-systémiques et leur axe du temps comblent cette lacune. Dans ce contexte, le logiciel ZATimeline et la démarche associée ont été proposés pour pallier à la difficulté de création et de gestion de tels supports en temps réel.

Après avoir rassemblé de premières données, le logiciel ZATimeline s'est montré de prise en main aisé (Alignier et al., 2020; Cognard et al., 2020; Guerbois et al., 2020; Pinault et al., 2020; Viviani, 2020) et efficace pour la production de frises chrono-systémiques. Utilisable en temps réel, ZATimeline permet d'intégrer de nouvelles données en au fil de l'eau.

En couplant et en croisant différents types de données (tant qualitatives que quantitatives), une frise permet d'observer les points de rupture dans le socio-écosystème et les réponses adaptatives afin de comprendre les dynamiques sous-jacentes. Ces données de frises structurées pour ZATimeline sont publiées dans l'entrepôt de données InDoRES (Charpentier and Viviani, 2023).

Au-delà de la recherche, la frise peut devenir un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires en leur apportant une représentation graphique temporelle de la trajectoire de leur territoire, c'est à dire des états qu'a pris celui-ci au regard de contraintes extérieures, d'événements ou de changements de gestion, par exemple. En ce sens, les frises et le logiciel ZATimeline ont leur place dans le panel d'outils d'aide à la décision conçus à destination des gestionnaires.

Après identification des grandes phases de la frise de la LMA, une partie de ces données peut alimenter

un schéma conceptuel par phase ou la cascade de services pour répondre de manière plus précise à un objectif de gestion ou à une question de recherche. Plusieurs exemples sont proposés ci-dessous.

Le paysage que l'on retrouve aujourd'hui sur ce territoire est la résultante des processus naturels, des usages et des représentations sociales dont il a fait l'objet au cours du temps. On peut alors parler de paysage palimpseste, dans lequel se superposent différentes temporalités que l'on retrouve en traçant la trajectoire sous forme de frise.

L'approche chrono-systémique montre également que si les digues venaient à disparaître, le socio-écosystème actuel s'effondrerait, transformant profondément le territoire. Il en résulterait localement une perte des activités de loisir (pêche, tourisme), une réappropriation de certaines surfaces par des prairies humides, et la perte d'habitats pour les oiseaux d'eau.

Face au changement climatique, la question de l'irrigation a été soulevée par certains acteurs départementaux. Compte tenu des temps de séjour de l'eau dans les étangs, la disponibilité d'une réserve en eau pour des terres agricoles situées en amont des étangs est n'est pas compatible avec le maintien des activités de tourisme actuelles.

Mise à l'épreuve lors du défaut de structure observé sur la digue de l'étang de Dieffenbach, la soutenabilité de ce socio-hydrosystème est assurée par la composante sociale qui oeuvre en syndicat à la maintenance des ouvrages et au maintien des fonctions et services procurés par les étangs. Réciproquement, leur durabilité est essentiel à l'identité territoriale de cette partie de la Moselle.

5. Conclusion

Les études sur les socio-écosystèmes sont nombreuses et dépassent aujourd'hui les champs disciplinaires de l'écologie ou de la géographie, comme le montre l'interdisciplinarité développée au sein des Zones Ateliers.

Les schémas et méthodes décrits et revisités dans cet article sont généraux et mobilisables pour d'autres socio-écosystèmes. Comme vu pour la LMA, les différentes modalités de représentation et d'analyse permettent d'illustrer différents points de vue. Ces méthodes se sont révélées complémentaires pour répondre à la question de la durabilité de cet écosystème.

Au-delà des schémas conceptuels universitaires, les frises chrono-systémiques sont des outils transdisciplinaires de représentation de données hétérogènes mobi-

lisables pour la médiation entre acteurs et pour l'aide à la gestion adaptative des territoires.

Cet article est dédié à la mémoire de Paul Marque qui retraça la genèse de ces ouvrages, nomma ce territoire, et dont les écrits sont largement repris par les chercheurs, les bureaux d'études et les gestionnaires.

Remerciements

Les auteurs remercient messieurs Bernard Clavé (maire d'Holving et président du SILMA), Philippe Keuer (historien, ASCOMEMO), et Alain Trinkwell (Ligue de Protection des Oiseaux) pour avoir accepté des entretiens en fin de période de confinement 2020. L'association pour la conservation de la mémoire de la Moselle (ASCOMEMO) est remerciée l'acquisition et le prêt de du livre (Armée-Oberkommando 1, 1940) et la carte de 1940 qu'il contient.

Références

Agence de l'eau Rhin Meuse, 2010. Retour d'expérience, le Mutterbach et l'Hosterbach à puttelage-aux-lacs, aménagement des seuils de la ligne maginot aquatique. https://cdi.eau-rhin-meuse.fr/GEIDFile/Le_Mutterbach_a_Puttelage-aux-lacs.pdf?Archive=215794603397. Accessed : 2023-01-30.

Alignier, A., Bergerot, B., Houet, T., Langlais-Hesse, A., Nabucet, J., Viaud, V., 2020. Trajectoires des systèmes bocagers du nord de la zone atelier armorique : approche chrono-systémique des déterminants de la relation de l'homme à la haie. 5ème colloque des Zones Ateliers, sciencesconf.org/20ans-rza:329872. Accessed : 2022-11-23.

Armée-Oberkommando 1, 1940. Durchbruchsschlacht der 1. Armee (bataille décisive de la 1ère armée). Stabsbildmeldung Nr. 16 vom 1. bis 25.6.1940.

Arnaud, F., 2019. CHRONO-RHÔNE : Elaboration d'une frise chrono-systémique pour l'OHM Vallée du Rhône, in : Séminaire scientifique annuel de l'OHM Vallée du Rhône, GRAIE, Villeurbanne, France. p. 1. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02140681>.

Arnaud, F., Charpentier, I., Chery, J.P., Gradeler, M., Bonnal, V., Dunnesme, S., 2022. Potentialités des frises chrono-systémiques et des cartographies narratives pour communiquer sur les trajectoires des socio-écosystèmes, in : Journées Prospectives INEE, La Rochelle, France. p. 1. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03828948>.

Bergeret, A., George-Marcelpoil, E., Delannoy, J.J., Piazza-Morel, D., 2015. L'outil-frise : une expérimentation interdisciplinaire. les Carnets du Labex ITEM. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01230027>. ont également contribué à cette publication : Denis Laforgue ; Sandrine Tolazzi ; Sophie Madelrieux ; Pénélope Lamarque ; Sabine Girard ; Mélanie Duval ; Suzanne Berthier-Foglar ; Philippe Bourdeau ; Anouk Bonnemains ; Hugues François.

Bretagnolle, V., Benoit, M., Bonnefond, M., Breton, V., Church, J.M., Gaba, S., Gilbert, D., Gillet, F., Glatron, S., Guerbois, C., Lamouroux, N., Lebouvier, M., Mazé, C., Mouchel, J.M., Ouin,

A., Pays, O., Piscart, C., Ragueneau, O., Servain, S., Spiegelberger, T., Fritz, H., 2019. Action-orientated research and framework : insights from the french long-term social-ecological research network. *Ecology and Society* 24, 10. URL : [10.5751/ES-10989-240310](https://doi.org/10.5751/ES-10989-240310).

Bruley, E., Locatelli, B., Vendel, F., Bergeret, A., Elleaume, N., Grosinger, J., Lavorel, S., 2021a. Historical reconfigurations of a social-ecological system adapting to economic, policy and climate changes in the french alps. *Regional Environmental Change* 21. doi : [10.1007/s10113-021-01760-8](https://doi.org/10.1007/s10113-021-01760-8).

Bruley, E., Locatelli, B., Vendel, F., Bergeret, A., Elleaume, N., Grosinger, J., Lavorel, S., 2021b. Historical reconfigurations of a social-ecological system adapting to economic, policy and climate changes in the french alps. *Regional Environmental Change* 21, 34.

Charpentier, I., 2020. ZATimeline : Visualizing SES trajectory data on a timeline, in : 5ème colloque des Zones Ateliers-CNRS - 2020, Tours, France. pp. 1-12. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02992357>.

Charpentier, I., Viviani, C., 2023. Données chronologiques pour le socio-écosystème de la ligne maginot aquatique (timeline data for the social-ecological system of the maginot aquatic line). data.InDoRES, V1. doi : [10.48579/PRO/PQPVTR](https://doi.org/10.48579/PRO/PQPVTR). accessed : 2023-02/08.

Chiffre, E., Mathis, D., Weimerskich, G., 2017. Les hydrosystèmes défensifs : des paysages militaires atypiques de la ligne maginot. *Géographie historique*.

Cognard, V., Baltzinger, C., Robert, A., Servain, S., 2020. Gouvernance et changements de trajectoire au sein du domaine national de chambord : un territoire emmuré depuis 5 siècles. 5ème colloque des Zones Ateliers, sciencesconf.org/20ans-rza:329805. Accessed : 2022-11-23.

Collins, S.L., Carpenter, S.R., Swinton, S.M., Orenstein, D.E., Childers, D.L., Gragson, T.L., Grimm, N.B., Grove, J.M., Harlan, S.L., Kaye, J.P., Knapp, A.K., Kofinas, G.P., Magnuson, J.J., McDowell, W.H., Melack, J.M., Ogden, L.A., Robertson, G.P., Smith, M.D., Whitmer, A.C., 2011. An integrated conceptual framework for long-term social-ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9, 351-357. doi : [10.1890/100068](https://doi.org/10.1890/100068).

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R.e.a., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 253-260doi : doi.org/10.1038/387253a0.

Daily, G., 1997. Introduction : What are ecosystem services?, in : *Nature's Services : Societal Dependence on Natural Ecosystems*, pp. 1-10.

Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R.T., Molnár, Z., Hill, R., Chan, K.M.A., Baste, I.A., Brauman, K.A., Polasky, S., Church, A., Lonsdale, M., Larigauderie, A., Leadley, P.W., van Oudenhoven, A.P.E., van der Plaats, F., Schröter, M., Lavorel, S., Aumeeruddy-Thomas, Y., Bukvareva, E., Davies, K., Demissew, S., Erpul, G., Failler, P., Guerra, C.A., Hewitt, C.L., Keune, H., Lindley, S., Shirayama, Y., 2018. Assessing nature's contributions to people. *Science* 359, 270-272. doi : [10.1126/science.aap8826](https://doi.org/10.1126/science.aap8826).

ECOLOR, 1998a. Catalogue des ouvrages Maginot sur le bassin versant du Mutterbach. Technical Report 22276-3 RM. AERM.

ECOLOR, 1998b. Etude préalable à l'aménagement du Mutterbach. Collecte et synthèse des données. Technical Report 22276-1 RM. AERM.

Fritsch, A., 1976. Construction d'un échangeur à l'autoroute a 34. *Journal Officiel de la République Française*, 1ère Séance du Vendredi 30 Avril 1976, <https://archives.assemblee-nationale.fr/5/cri/1975-1976-ordinaire2/027.pdf>. Accessed : 2023-01-30.

- Guerbois, C., Bellón, B., Blanco, J., Dervieux, Z., Nxumalo, B., Renaud, P.C., 2020. Evolution des contributions de la nature aux hommes dans le socio-écosystème de hwange : vers une construction transdisciplinaire de sa trajectoire. 5ème colloque des Zones Ateliers, sciencesconf.org/20ans-rza:329813. Accessed : 2022-11-23.
- Haines-Young, R., Potschin-Young, M., 2010. The links between biodiversity, ecosystem service and human well-being, in : *Ecosystem Ecology : A New Synthesis*, pp. 110–139. doi :10.1017/CBO9780511750458.007.
- Hariri, S., 2021. Modélisation des inondations historiques de la Sarre. Ph.D. thesis. Université de Strasbourg. URL : <http://www.theses.fr/2021STRAD028>.
- Holling, C., 1978. *Adaptive Environmental Management and Assessment*. John Wiley&Sons, Chichester.
- Holling, C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4, 1–23. URL : <http://www.jstor.org/stable/2096802>.
- Klein Tank, A.M.G., Wijngaard, J.B., Können, G.P., Böhm, R., Demarée, G., Gocheva, A., Mileta, M., Pashiardis, S., Hejkrlik, L., Kern-Hansen, C., Heino, R., Bessemoulin, P., Müller-Westermeier, G., Tzanakou, M., Szalai, S., Pálsdóttir, T., Fitzgerald, D., Rubin, S., Capaldo, M., Maugeri, M., Leitass, A., Bukantis, A., Aberfeld, R., van Engelen, A.F.V., Forland, E., Mietus, M., Coelho, F., Mares, C., Razuvaev, V., Nieplova, E., Cegnar, T., Antonio López, J., Dahlström, B., Moberg, A., Kirchhofer, W., Ceylan, A., Pachaliuk, O., Alexander, L.V., Petrovic, P., 2002. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the european climate assessment. *International Journal of Climatology* 22, 1441–1453. doi :10.1002/joc.773.
- Lévêque, C., Pavé, A., Abbadie, L., Weill, A., Vivien, F., 2000. Les zones ateliers, des dispositifs pour la recherche sur l'environnement et les anthroposystèmes. *Natures Sciences Sociétés* 8, 44–52. doi :10.1016/S1240-1307(01)80005-4.
- Marque, P., 1989. *La ligne Maginot Aquatique*. Editions Pierron.
- Mathis, D., 2014. Recomposition territoriale d'un espace rural flou l'exemple du « pays des Étangs » en moselle, recomposition territoriale d'un espace rural flou l'exemple du « pays des Étangs » en moselle. *Territoire en Mouvement* , 67–81doi :10.4000/tem.2415.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens III, W.W., 1972. *The Limits to Growth. A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. Universe Books, New York. URL : <http://catalog.hathitrust.org/api/volumes/oclc/2745197.html>.
- Pinault, L., Charpentier, I., Glatron, S., 2020. L'île du rohrschoellen sur le rhin, un socio-éco-techno-système naturel? 5ème colloque des Zones Ateliers, sciencesconf.org/20ans-rza:329628. Accessed : 2022-11-23.
- Robert, S., 2020. Résilience, changement et persistance, in : Sanders, L., Bretagnolle, A., Brun, P., Ozouf-Marignier, M.V., Verdier, N. (Eds.), *Le temps long du peuplement : concepts et mots-clés*, Presses Universitaires François Rabelais, Tours. pp. 207–227.
- Salles, J.M., 2010. Évaluer la biodiversité et les services écosystémiques : pourquoi, comment et avec quels résultats? *Natures Sciences Sociétés* 18, 514–423. doi :10.1051/nss/2011005.
- Smith, R., van den Bosch, R., 1967. Integrated control, in : Kilgore, W., Doult, R. (Eds.), *Pest Control*, Academic Press, New York. pp. 295–340.
- Tansley, A.G., 1935. The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology* 16, 284–307. URL : <http://www.jstor.org/stable/1930070>.
- Viviani, C., 2020. Les étangs-réservoirs de la Ligne Maginot Aquatique : un socio-écosystème durable? Master's thesis. Université de Lorraine. URL : <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02966139>.
- Westman, W., 1977. How much are nature's services worth? *Science* (New York, N.Y.) 197, 960–964. URL : 10.1126/science.197.4307.960, doi :10.1126/science.197.4307.960.
- Wilkinson, M., Dumontier, M., Aalbersberg, I., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.W., da Silva Santos, L., Bourne, P., et al., 2016. The fair guiding principles for scientific data management and stewardship. *Scientific data* 3.
- World Resources Institute (WRI), 2005. Ecosystem and human well-being - synthesis. 5ème colloque des Zones Ateliers, <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8701>. Accessed : 2022-11-14.