

CSD INGÉNIEURS SA

Avenue des Sports 14

CH-1400 Yverdon-les-Bains

+41 24 424 95 00

yverdon@csd.ch

www.csd.ch

CSDINGENIEURS 
INGÉNIEUX PAR NATURE



Office Fédéral de l'agriculture - OFAG

Inondations temporaires de champs agricoles pour l'escale des limicoles migrateurs : recherche de nouveaux sites, faisabilité, dédommagement à l'exploitant

Rapport final

Yverdon-les-Bains, le 30.06.2023 / FCH010233

Table des matières

1	Contexte	1
1.1	Sites d'escalas limicoles.....	1
1.1.1	Thématique	2
1.1.2	Contexte scientifique.....	2
1.1.3	L'expérience d'Yverdon-les-Bains.....	2
1.1.4	Nécessité d'un site complémentaire près d'Yverdon-les-Bains.....	3
1.1.5	Buts généraux de la présente recherche	3
1.1.6	Adéquation avec la politique agricole et autres outils de planification supérieurs	3
1.2	Le projet de recherche ELA – Canton (VD-FR-SO) – OFAG.....	4
1.2.1	Bénéfices potentiels	4
1.2.2	Risques	5
1.2.3	Valorisation des résultats du projet de recherche.....	5
2	Résultats du projet - Forschungsfragen und -ziele.....	6
2.1	Conditions spécifiques d'un site d'escale.....	6
2.1.1	Choix du site.....	6
2.1.2	Investigations préalables pour définir la faisabilité du site d'escale :.....	7
2.1.3	Mise en place initiale du site d'escale – premières inondations	8
2.1.4	Inondations à long terme.....	10
2.2	Surface optimale d'un site d'escale.....	11
2.2.1	L'expérience d'Yverdon.....	11
2.2.2	Un abaque pour aider à la délimitation	12
2.3	Sites potentiels VD-FR-SO.....	13
2.3.1	Recherche sur base de données et analyses SIG	13
2.3.2	Résultats de l'analyse SIG	15
2.4	Synergies agricoles	17
2.4.1	Analyse des sites escalas limicoles par le canton de Vaud.....	18
2.4.2	Analyse des sites escalas limicoles par le canton de Fribourg.....	19
2.4.3	Analyse des sites escalas limicoles par le canton de Soleure.....	20
2.5	Pédologie	21
2.5.1	Les sols du site d'Yverdon-les Bains : caractéristiques, formation et avenir	21
2.5.2	Interventions sur le site d'étude : inondations, travaux et suivis pédologiques	24
2.5.3	Suivi pédologique : méthodologie	25
2.5.4	La fertilité du sol : résultats et interprétation	27
2.5.5	Suivi pédologique : effets des inondations sur le sol	30
2.5.6	Bilan du suivi pédologique : limites et perspectives.....	31
2.5.7	Perspectives : un site multifonctionnel : production agricole, escale de limicoles, préservation du climat.....	32
2.6	Dédommagement à l'exploitant.....	33
2.6.1	Estimation des pertes de rendement en fonction des cultures	34

2.6.2	Reconnaissance et valorisation des sites d'escale pour les limicoles en tant que surfaces de promotion de la biodiversité	37
2.6.3	Conclusion sur la compatibilité des escales limicoles avec l'agriculture et pistes de développement.....	39
3	Communication à l'extérieur	40
4	Conclusion.....	42
5	Bibliographie	44
6	Annexes	46

Le présent projet de recherche est soutenu par l'Office fédéral de l'agriculture et les cantons de Vaud, Fribourg et Soleure. Il explore les possibilités d'inonder temporairement des terres agricoles pour accueillir des limicoles migrateurs.

Il a été réalisé par des représentants des administrations cantonales (agriculture, biodiversité, nature, paysage) de Vaud, de Fribourg et de Soleure. Cette vision pluri-cantonale est fructueuse car les contextes et les expériences cantonales varient.

Des spécialistes de la Station ornithologique suisse ou du domaine des sols ont contribué à ce travail dans leur domaine de compétence.

L'association Escales Limicoles et Agriculture a fourni l'expérience technique et biologique collectée à Yverdon-les-Bains.

Le bureau CSD Ingénieurs à Yverdon-les-Bains a fourni son expertise ingénieriale, a coordonné les partenaires et assuré la rédaction du présent rapport.

1 Contexte

Les changements climatiques et la dégradation accélérée de la biodiversité mis en évidence par le monde scientifique depuis de nombreuses années ne sont plus contestés par nos autorités politiques et sont devenus un enjeu majeur pour la vie telle qu'on la connaît sur la terre.

Le réchauffement climatique est au cœur des discussions, mais la diversité des milieux naturels et leur répartition sur notre continent notamment est une thématique tout aussi importante.

D'un autre côté, l'explosion démographique au niveau mondial, loin d'être maîtrisée même sous nos latitudes, nous a contraint à une extension des terres agricoles et une intensification des pratiques agricoles. La nécessité d'une certaine autonomie alimentaire par région s'est faite ressentir et a encore été confirmée par la pandémie de la Covid 19.

Nos agriculteurs, pour survivre face à la concurrence au niveau mondial, sont obligés de calculer leurs marges au plus serré et ne peuvent que difficilement soustraire des surfaces à la production, même de manière temporaire.

1.1 Sites d'escales limicoles

Les espèces liées aux milieux humides, en particulier les limicoles migrateurs, sont parmi les plus touchées par la régression de leur habitat, notamment en Suisse. Un potentiel de créer des mesures de remplacement existe dans la mise à disposition de sites inondés temporairement dans les surfaces agricoles. Les sites envisageables se trouvent dans les zones d'agriculture intensive des grandes plaines du Plateau suisse.

Si le flux migratoire principal des limicoles passe certes par les côtes atlantiques du nord et de l'ouest de l'Europe, 10-15 % du flux, à ne pas négliger pour la dynamique des populations, passe par le centre du continent et se concentre sur le Plateau Suisse dans un axe NE-SW pour éviter la barrière formée par les Alpes. On ignore, en l'état actuel des recherches, si ce flux, pourtant direct et plus favorable, n'est pas minoritaire à cause de la raréfaction des sites de nourrissage et de repos.

L'aménagement des surfaces cultivées pour optimiser la production agricole, grâce à des machines de plus en plus volumineuses et lourdes, a progressivement supprimé au centre de l'Europe et dans notre pays les surfaces de marais de faible profondeur, dont les limicoles ont besoin pour se nourrir durant leurs migrations.

Avec toutes les mesures de régulation des niveaux d'eau (corrections des eaux du Jura), les bords de lacs et de rivières, non soumis par ailleurs au régime des marées, ainsi que les marais plus profonds et végétalisés ne sont pas adaptés.

Des cultures alternées avec des inondations saisonnières de zones adéquates permettent de recréer les surfaces dont les limicoles migrateurs ont besoin, tout en préservant la fertilité des sols et les techniques rentables des cultures agricoles actuelles au niveau des machines utilisées.

1.1.1 Thématique

Les limicoles ou petits échassiers (bécasseaux, bécassines, chevaliers, gravelots, etc.) traversent par milliers notre pays pour se rendre au printemps dans leurs sites de nidification (Nord de l'Europe) et en automne dans leurs territoires d'hivernage (Méditerranée, Afrique équatoriale). La majorité des espèces sont des migrateurs ne se reproduisant pas en Suisse. Ils ont besoin, pour leurs escales (repos, nutrition), de surfaces inondées de quelques centimètres d'eau, vastes et dégagées. En temps normal, ces milieux sont peu disponibles en Suisse en raison de la régulation du niveau des lacs. Ils apparaissent parfois en zone agricole lors d'inondations exceptionnelles et, selon la période de l'année, sont immédiatement utilisés par les limicoles. Les marais comme la Grande Cariçaie au bord du Lac de Neuchâtel sont moins adéquats en raison de la luxuriance de leur végétation.

1.1.2 Contexte scientifique

La base scientifique du présent projet repose sur une publication de 1992 de la Station ornithologique suisse de Sempach : « Stationnement des limicoles faisant escale en Suisse. Inventaire des sites. Conservation et aménagement : des exemples. Les limicoles et leurs migrations »

La Station ornithologique suisse est un partenaire scientifique et financier du projet d'Yverdon-les-Bains (voir § 1.1.3 ci-dessous). Les données du suivi ornithologique réalisé depuis 2017 sont recueillies dans la plateforme « ornitho.ch » et publiées chaque semestre dans les bulletins SI (service d'information) de la Station. Le bulletin SI fait état de l'attrait exceptionnel à l'échelle de la Suisse du site d'Yverdon-les-Bains pour les limicoles migrateurs.

L'effet des inondations temporaires sur les sols du site d'Yverdon-les-Bains a fait l'objet d'un travail de master EPFL (Ecole polytechnique fédérale de Lausanne) : « Evolution d'un sol tourbeux travaillé soumis à une inondation saisonnière contrôlée. » (Bienz R. 2018). Un protocole de suivi pédologique, constitué de 11 indicateurs biologiques, chimiques et physiques, a été livré et appliqué en automne 2018 et au printemps 2020. A l'heure actuelle, aucune tendance claire ne se dessine quant à l'effet positif ou négatif des inondations sur la qualité des terres tourbeuses.

Les expériences concrètes d'inondations temporaires contrôlées de champs agricoles en Suisse ou à l'étranger sont peu nombreuses. Cependant, dans le canton de Soleure, le site OROEM de Granges (WZV-Objekt Grenchen) et le site de Dünnerbene bei Kestenholz (Limikolenrastplatz von regionaler Bedeutung) constituent des exemples concrets et actuels.

1.1.3 L'expérience d'Yverdon-les-Bains

Le site d'escale pour les limicoles migrateurs, à l'étude dès 2015 sur une parcelle maraîchère de 5 hectares à la périphérie d'Yverdon-les-Bains, est un succès ornithologique et technique. Depuis les premières inondations contrôlées en 2017, il a permis d'allier production agricole et conservation des espèces. En automne 2020 et en automne 2021, plus de 7200 limicoles-jours y ont été recensés, ce qui en fait le site le plus important de Suisse pour l'escale de ce groupe d'oiseaux.

La pérennité du site est actuellement assurée pour 10 ans (jusqu'en 2030) par une convention entre le propriétaire (Ville d'Yverdon-les-Bains), l'exploitant (Stoll Production SA) et l'association coordonnant le projet (Ecales Limicoles - Agriculture). Durant cette période, un suivi scientifique est organisé, tant au niveau des espèces présentes que de l'hydrologie et de l'évolution de la qualité des sols.

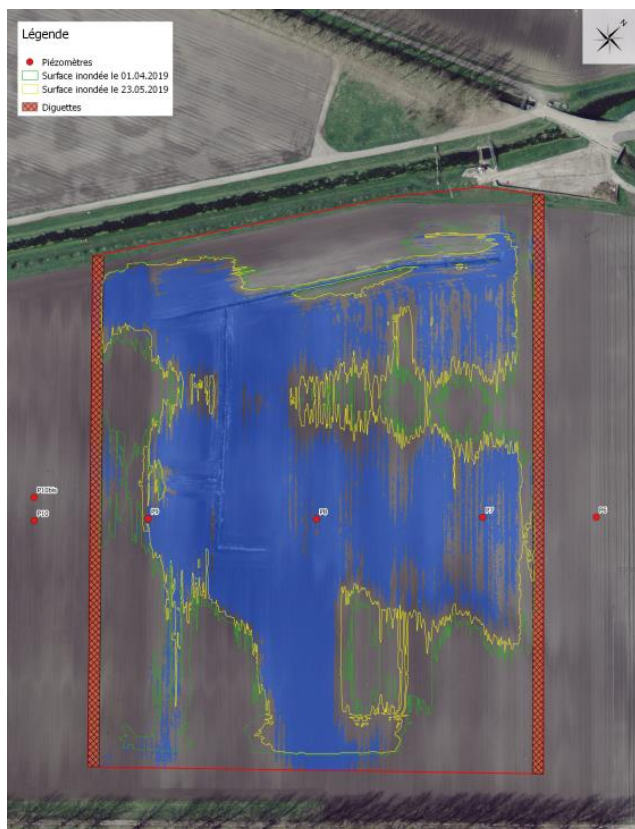


Figure 1 Cartographie de la parcelle temporairement inondée pour l'escale des limicoles à Yverdon-les-Bains

1.1.4 Nécessité d'un site complémentaire près d'Yverdon-les-Bains

Afin d'assurer une production agricole chaque année permettant de respecter le statut de surface d'assolement (SDA), le site d'Yverdon-les-Bains n'est inondé qu'une seule fois par année, soit au printemps (mars-mai), soit en automne (août-octobre). Or des sites d'escale sont nécessaires aussi bien au printemps (migration pré-nuptiale vers le nord) qu'en automne (migration post-nuptiale vers le sud). Il faudrait idéalement pouvoir assurer alternativement l'inondation de deux sites différents dans une même région. Actuellement, l'association Escales Limicoles et Agriculture est en recherche d'un 2^{ème} site.

1.1.5 Buts généraux de la présente recherche

Le projet d'Yverdon-les-Bains est innovant ; il a bénéficié de conditions optimales et de synergies qui ont permis sa mise en œuvre.

La présente recherche explore les conditions nécessaires afin de reproduire ce modèle dans des régions similaires (cantons de Vaud, Fribourg et Soleure) et à terme de réaliser d'autres projets, complémentaires à celui d'Yverdon-les-Bains. Les conditions et contraintes d'installation de sites d'escale, l'effet de l'inondation temporaire sur le sol et le dédommagement financier à l'exploitant doivent être analysés ; ce dernier point est d'une importance capitale pour convaincre les agriculteurs d'héberger un site d'escale.

À court terme, l'idéal serait de trouver deux sites d'escale par canton, puis de reproduire la démarche selon les opportunités et les besoins.

1.1.6 Adéquation avec la politique agricole et autres outils de planification supérieurs

Plusieurs instruments visent un renforcement de la biodiversité mettant à contribution les surfaces agricoles. Tant la Stratégie Biodiversité Suisse que la Conception Paysage Suisse évoquent les besoins de surfaces de qualité à même d'améliorer la mise en réseau des milieux naturels. Un site d'escale pour les limicoles répond pleinement à ces besoins et représente un élément important de l'infrastructure écologique. Bien que

temporaire, il pourrait être reconnu comme un milieu remplissant les critères de qualité OEA (ART-Schriftenreihe 18, juin 2013). De nombreuses espèces cibles ou caractéristiques OEA, telles que le courlis cendré, la bécassine des marais, le vanneau huppé ou encore la couleuvre à collier, profitent de tels sites.

1.2 Le projet de recherche ELA – Canton (VD-FR-SO) – OFAG

Le tableau ci-dessous reporte les questions et objectifs du projet de recherche :

Forschungsfragen und -ziele.
<ol style="list-style-type: none"> 1. Conditions spécifiques d'un site d'escale. Définir les conditions nécessaires pour l'installation d'un site d'escale : géographiques, topographiques, activités périphériques, alimentation en eau, régulation du niveau d'eau, drainages. 2. Surface optimale d'un site d'escale. Évaluer les surfaces minimales, optimales, maximales convenant aux différents groupes de limicoles. 3. Sites potentiels VD – FR - SO. Déterminer les sites potentiels dans les cantons de VD, FR, SO susceptibles de servir d'escales pour les limicoles migrateurs. 4. Synergies agricoles. Identifier les synergies avec les projets d'améliorations structurelles (drainages, irrigation, ...). 5. Pédologie. Analyser, selon l'état des connaissances, les effets des inondations périodiques sur les sols, sur la base du site d'Yverdon et des données de la littérature scientifique (tassement, lessivage des intrants, régénération de la tourbe, faune du sol). 6. Dédommagement à l'exploitant. Chiffrer les pertes de rendement pour l'agriculture en fonction des périodes d'inondation (printemps ou automne) et des cultures concernées. Proposer des solutions pour une indemnisation financière adéquate.

Tableau 1 Questions et objectifs du projet de recherche.

1.2.1 Bénéfices potentiels

La réalisation de sites d'escales permet de montrer au grand public les **synergies concrètes** entre protection de la nature et agriculture. L'observation des oiseaux est une activité qui ne se limite pas aux ornithologues avisés. Les produits issus des « parcelles à limicoles » pourraient être valorisés lors de leur commercialisation (label limicole).

Avantages pour l'agriculture :

- Contribution effective à la protection de la nature
- Optimisation possible de parcelles agricoles naturellement inondées et peu productives
- Meilleure image de la production intensive > possibilité de marketing
- Surfaces potentielles qui pourraient être comptabilisées dans les 3.5% de SPB à mettre en place dans les terres assolées

Avantages pour la nature :

- Mise à disposition de biotopes temporaires abritant des espèces rares et menacées
- Renforcement des populations de batraciens
- Impact positif sur les insectes et la faune aquatique microbienne
- Éléments contribuant à la mise en place de l'infrastructure écologique
- Consolidation de la responsabilité de la Suisse dans l'escale des limicoles en migration intercontinentale

Avantages pour la population :

- Lieux d'observation pour le grand public dans des zones accessibles, sans risque de dérangement
- Présentation d'une synergie nature-agriculture (« *Sur cette parcelle poussaient des carottes ce printemps ; cet automne, des oiseaux migrateurs y font escale !* »).

1.2.2 Risques

- Aspects techniques de la nécessaire régulation de l'eau des sites > envisager une collaboration avec des projets d'améliorations structurelles,
- Pertes de rendement à compenser selon le type de culture,
- Effets positifs ou négatifs des inondations temporaires sur la qualité et la fertilité des sols,
- Inscription du site d'escale dans un inventaire ou dans l'infrastructure écologique (IE) et que cela devienne contraignant au niveau du RF.

1.2.3 Valorisation des résultats du projet de recherche

Après cette phase d'étude, les bases seront posées pour des réalisations concrètes. Les résultats pourront bénéficier :

- aux administrations des autres cantons du Plateau suisse (notamment BE, NE, ZH, AG, TG) qui ont des régions semblables,
- aux administrations en charge du développement de la biodiversité et aux associations de protection de la nature qui souhaiteraient lancer un projet similaire,
- à l'Office Fédéral de l'Agriculture, pour la définition de nouveaux types de surfaces de promotion de la biodiversité ou d'objectifs, en lien avec les futurs projets agro-environnementaux (réseaux écologiques – qualité du paysage).

2 Résultats du projet - Forschungsfragen und -ziele

Le présent chapitre présente le résultat de recherche pour les divers objectifs de recherche du Tableau 1.

2.1 Conditions spécifiques d'un site d'escale

Définir les conditions nécessaires pour l'installation d'un site d'escale : géographiques, topographiques, activités périphériques, alimentation en eau, régulation du niveau d'eau, drainages.

Le présent chapitre résume les démarches, investigations et mesures à mettre en œuvre pour la réalisation et la pérennisation d'un site d'escale.

Si les chapitres 2.2.1 et 2.2.2 définissent les caractéristiques surfaciques (entre 3 et 5 ha) et les contraintes d'accessibilité et de dérangement du site d'escale (site si possible éloigné des routes, des bandes boisées et des sources de dérangements) afin de permettre un accueil optimal des limicoles, divers autres paramètres doivent également être pris en compte afin de définir la faisabilité de l'inondation.

2.1.1 Choix du site

Caractéristiques territoriales du site d'escale :

- Terrain plat (1-2°), situé dans la région du Plateau (cf. chap. 2.3). La profondeur d'eau idéale nécessaire durant l'inondation est de 0 à 15 cm (jusqu'à 20 cm), avec un faible écart à la moyenne. L'émergence d'îlots et la maximisation du linéaire d'interface eau-sol sont également des caractéristiques importantes des sites d'escaliers.
- Surface inondable idéalement de 1-3 ha dans un champ de 3-5 ha (cf. chap. 2.2). La surface minimale pour un site d'escale fonctionnel est estimée à 3 ha.
- Idéalement, suffisamment éloigné des haies et des rideaux d'arbres (cf. chap. 2.2.1), car les limicoles ont besoin de vastes surfaces où ils peuvent repérer la présence de prédateurs (exemple : rivages marins).
- Idéalement, suffisamment éloigné des routes et des autres sources de perturbations (cf. chap. 2.2.1), pour limiter le dérangement.
- Si le site n'est pas suffisamment éloigné et que des visiteurs/curieux sont attendus : le site peut quand même fonctionner, à l'instar de celui d'Yverdon-les-Bains. Il faut néanmoins bien penser à la canalisation des visiteurs (places de parc, indications sur les points d'observation, etc.).

Nature du sol, drainages :

- De préférence sol riche avec abondance de vers de terre, par exemple : sols tourbeux.
- Une couche continue de glaise ou de craie lacustre en profondeur est une plus-value incontestable, car elle permet de diminuer l'infiltration d'eau dans le sol.
- L'existence d'un réseau de drainage en sous-sol, souvent nécessaire pour assurer une bonne production agricole, n'est pas un inconvénient mais au contraire un avantage pour autant que l'on puisse bloquer temporairement le collecteur d'évacuation (durant la période d'inondation) avec une vanne de fermeture. L'assèchement après la période d'inondation sera en effet plus rapide si un réseau de drainage est présent sur le site.

Périodicité des inondations :

- Une inondation par année.
- 1^{er} mars - 31 mai ou 1^{er} août - 30 octobre, voire 30 novembre. Ces périodes d'inondation peuvent être légèrement adaptées selon les impératifs agricoles ou des retards dans la migration d'automne.
- Choix du site et de la période d'inondation notamment en fonction du type de cultures pouvant y être fait, en prenant en compte les machines et moyens des exploitants agricoles.

2.1.2 Investigations préalables pour définir la faisabilité du site d'escale :

Dans un premier temps, une fois un site potentiel identifié, des investigations doivent être menées dans divers domaines afin d'identifier les conditions nécessaires pour l'installation d'un site d'escale pour limicoles.

Les investigations suivantes seront nécessaires :

- Définir la nature du sol (pédologie) et sa perméabilité, afin d'en estimer grossièrement les besoins en eau.
- Estimation du débit nécessaire pour le maintien de l'inondation.

A titre d'exemple, pour le site d'escale d'Yverdon-les-Bains (lieu-dit « Quatre-Vingts »), un débit de 5-10 l/s en moyenne sur l'ensemble de la durée d'inondation est nécessaire pour alimenter en eau un site de 5 ha. Ces valeurs peuvent varier d'une année à l'autre selon le niveau de la nappe et la pluviométrie de la période d'inondation.

- Topographie du terrain : faire une analyse du modèle numérique de terrain (MNT) afin d'identifier les profondeurs d'eau attendues selon le niveau d'inondation. Il n'est en effet pas facile de s'assurer « à l'œil » que la topographie du terrain convienne pour avoir une profondeur d'eau de 0-15 cm sur la presque totalité du site inondé, avec une interface eau-terre maximale.
- La topographie ainsi que la nature du sol ont également un impact sur la propagation latérale de la zone de rehaussement de la nappe / influence sur les exploitations agricoles à proximité, qu'il faudra considérer dans les éventuels aménagements nécessaires pour contenir les inondations tant en surface qu'en profondeur.
- Impact sur la nappe : il convient de prendre en compte les impacts potentiels sur la nappe phréatique et les terrains/constructions environnants, car le niveau piézométrique sera remonté localement avec l'inondation de la parcelle.
- Alimentation en eau :

Les débits devant être fournis sont assez importants, selon le type de sol. Une source d'alimentation en eau fiable doit être disponible à proximité du projet (~500 m au maximum). Si un système de drainage existe sur la parcelle, il faut s'assurer qu'il soit possible de boucher localement les chambres / arrêter l'évacuation de l'eau sous le site d'escale, afin de limiter les apports en eaux lors de l'inondation.

- Une alimentation par les eaux de surface implique à priori moins d'investigations techniques et des installations temporaires simples de mise en œuvre (pompage en rivière avec pompe amovible, électrique/solaire ou diesel ; système de conduites pour amener l'eau sur site ; débitmètre ou mesure du volume pompé afin de pouvoir estimer le débit nécessaire au maintien de l'inondation).

Une autorisation de pompage est néanmoins nécessaire.

Ce type d'alimentation en eau doit être privilégié lors des premières inondations contrôlées, qui permettront de vérifier le fonctionnement du système et de confirmer la faisabilité de l'inondation.

Il convient d'étudier les débits moyens mensuels des cours d'eau et canaux, en les comparant aux débits nécessaires pour l'inondation, avant d'en organiser l'exploitation. Une alimentation par diverses sources peut également être envisagée. En effet, les canaux de drainage des plaines ont souvent des débits relativement faibles par rapport aux débits nécessaires à l'inondation des sites d'escales, notamment pour les mois d'août et septembre.

- Une alimentation par la nappe est de plus en plus souvent exigée par les cantons (pas de nouveaux permis de pompage en rivière ; cours d'eau de plus en plus souvent à l'étiage pour l'inondation automnale commençant au mois d'août).

En cas d'alimentation par la nappe, des études hydrogéologiques seront nécessaires afin d'évaluer la capacité de la nappe, ainsi que l'impact du prélèvement sur le niveau de la nappe (tarissement) et d'éventuelles sources d'eau situées à proximité. *L'utilisation d'un puits*

existant (en cours d'utilisation ou désaffecté) est à préconiser partout où cela est possible. L'installation de pompes solaires dans des puits est utilisée par le canton de Soleure depuis plusieurs années, pour la création de mares temporaires, principalement à l'attention des batraciens.

En cas d'alimentation par les eaux de surface, la capacité de la nappe pourra évoluer d'une saison à l'autre et d'une année à l'autre, en fonction de la pluviométrie. Des informations fiables concernant le niveau moyen de la nappe sont nécessaires avant d'envisager un nouveau puits. Les investigations et investissements pour la création d'un nouveau puits sont très onéreuses.

Une autorisation pour exploiter la nappe est nécessaire.

- Vidange du site d'escale et gestion des apports en eau : la vidange du site d'escale représente une étape cruciale de la période d'inondation, surtout à la fin de l'inondation printanière ou si l'on veut assurer la couverture du sol après une inondation en automne. Le site doit en effet être rapidement exploitable pour les semis et plantations, et une vidange rapide est idéale. Pour cela, la présence d'un système de drainage est un atout. À la fin de la période d'inondation, les drainages sont réactivés afin de vidanger plus rapidement le casier inondé.

Il convient de définir avec l'exploitant les conditions de vidange du site, tel que par exemple « absence d'eau en surface à la fin de la période d'inondation », ou « sol sec sur X cm à la fin de la période », ou simplement « arrêt des pompes et ouverture des drainages à la fin de la période d'inondation ».

2.1.3 Mise en place initiale du site d'escale – premières inondations

Une fois toutes les investigations réalisées et la faisabilité du projet établie (autant que possible), il s'agit de mettre en place une première inondation contrôlée.

Il est conseillé d'abord de procéder à la réalisation d'aménagements temporaires et amovibles, afin de contenir les coûts de l'opération. Des aménagements pourront ensuite être mis en place de manière définitive sur le long terme.

Alimentation en eau :

- Pompes et tuyau : pour une première inondation contrôlée, nous préconisons l'exploitation des eaux de surface pour l'alimentation en eau, l'installation du matériel étant généralement simple. Le matériel nécessaire serait alors une (ou plusieurs) pompe amovible à placer dans le(s) cours d'eau, un débitmètre ou système de mesure du volume, un système de tuyau pour acheminer l'eau jusqu'au site d'escalas. La plupart de ces éléments sont couramment utilisés par les exploitations agricoles, qui pourraient les mettre à disposition pour l'inondation du site. En alternative, ce matériel peut être loué et mis en place par une entreprise.
- Si un puits existe à proximité du site et est exploitable, l'utilisation de la nappe est une alternative dès le premier test d'inondation.
- Alimentation électrique : nécessaire selon le type de pompe, ainsi que pour la mesure du débit et du volume. À louer et faire mettre en place.
- Suivi des débits : la mise en place d'un système permettant le suivi des débits apportés sur le terrain est importante, afin de vérifier les hypothèses de base et pouvoir ajuster les demandes et installations pour les inondations à venir, ainsi que confirmer la faisabilité et l'acceptabilité à long terme du site d'escale.
- Suivi piézométrique : au moins lors des premières inondations, louer et faire mettre en place les piézomètres et des sondes de lecture du niveau d'eau (niveau de la nappe phréatique) à l'intérieur et surtout à l'extérieur de la parcelle inondée (recommandation), afin d'identifier l'étendue de l'augmentation du niveau de la nappe et le potentiel impact sur les cultures et installations à proximité. Des sondes avec transmission automatique de données sont un avantage car elles permettent un suivi en temps réel de l'impact de l'inondation. Au minimum 3 sondes sont nécessaires (une de

part et d'autre du site, à une distance dépendant du type de sol, et une dans le site d'escale afin de définir la cote d'inondation optimale).

- Obtenir les autorisations nécessaires (pompage en rivière ou dans la nappe).

Autres aspects pour préparer l'inondation :

- Trouver un ornithologue compétent, expérimenté et disponible chaque jour de l'inondation temporaire, afin de vérifier le bon fonctionnement du site (niveau d'eau optimal, fonctionnement des installations, surveillance générale du site) (financement externe).
- Supprimer par hersage ou broyage toute végétation sur la parcelle à mettre en eau (frais à couvrir par le versement d'une contribution à l'exploitant).
- Mettre en place une signalisation adéquate pour gérer les promeneurs de chiens, les observateurs et le parage de leurs véhicules (financement externe).
- Contracter une assurance en cas de dégâts aux parcelles environnantes (frais à couvrir par le versement d'une contribution à l'exploitant).

Contrôle de l'inondation :

- Contrôle journalier du niveau d'eau nécessaire en fonction de la météo (pluies) et des pannes possibles du système de pompage et adaptation du débit des pompes.
- Relevé des piézomètres (avec ou sans transmission automatique des données) sur le site inondé et en particulier les parcelles qui le jouxtent pour contrôler le niveau de la nappe phréatique, à maintenir à un niveau n'affectant pas les cultures environnantes.

Suivi d'efficacité biologique :

- L'identification et le comptage journalier des limicoles par un ornithologue chevronné est nécessaire pour mesurer l'effet de l'inondation contrôlée. C'est un travail délicat car les limicoles sont très habiles pour se dissimuler et constituent un groupe difficile à identifier. Les autres groupes d'oiseaux sont aussi décomptés. Un suivi des batraciens, en particulier au printemps et des insectes (libellules par exemple) est vivement recommandé selon des protocoles encore à établir.

Coûts estimatifs	
Installation de pompage (y.c. location du matériel)	CHF 20'000
Consommation d'électricité (3mois)	CHF 2'500
Pose/dépose et location des piézomètres et sondes (3)	CHF 9'000
Définition des besoins, coordination des travaux et présentation des résultats techniques et biologiques (réalisé par un bureau d'ingénieurs)	CHF 25'000
Suivi biologique	CHF 5-10'000
Total	CHF 61'500 – 66'500

Tableau 2 Budget indicatif d'une inondation sans installations fixes (trois mois), avec alimentation en rivière par la nappe (puits existant)

Le suivi pédologique, tel qu'il est conçu présentement à Yverdon-les-Bains, coûte CHF 20'000.- pour le contrôle de 11 indicateurs. Ces coûts peuvent être réduits par un choix plus restreint d'indicateurs ou par l'abandon d'une surface de référence. La périodicité du suivi pédologique est aussi à établir.

Le coût de l'opération pourra être réduit après consolidation du fonctionnement du système, grâce à la diminution de l'intensité du suivi.

Le coût de location et installation du système d'alimentation en eau peut être drastiquement diminué en cas de collaboration avec l'exploitant agricole. Le coût donné ici prend en compte la location de l'ensemble du matériel pendant trois mois auprès d'une entreprise spécialisée, ainsi que la pose/dépose et surveillance par ladite entreprise.

En cas d'utilisation d'une pompe et d'un système d'alimentation fixe, les coûts sont de l'ordre de CHF 4'000.- par inondation, qui couvrent grosso-modo les coûts d'électricité et quelques indemnisations supplémentaires pour l'exploitant agricole (surveillance des pompes, etc.).

Aucune expérience concrète d'une alimentation par pompage dans un puit/nappe n'a été à ce jour documentée, c'est pourquoi nous avons considéré un montant équivalent au pompage en rivière. Une étude de faisabilité d'un site d'escale avec alimentation par un puit est en cours dans la plaine de l'Orbe. Nous serons en mesure de documenter plus précisément le coût de cette technique d'inondation dans le futur.

2.1.4 Inondations à long terme

Une fois le bon fonctionnement du site démontré tant d'un point de vue hydraulique/technique que d'un point de vue biologique, on peut procéder à une pérennisation du site.

En premier lieu, d'éventuels aménagements du terrain pourront être réalisés (par exemple : diguettes imperméables de contention latérale de l'inondation ; éventuelle optimisation des drainages ; autres, ...). La mise en place de diguette pour éviter l'inondation latérale s'est élevée à 80'000 CHF pour le site des Quatre-Vingts.

En cas d'alimentation par la nappe au moyen d'un nouveau puit, celui-ci sera réalisé une fois le fonctionnement du site prouvé (quantification des débits et attractivité biologique).

Le suivi du niveau piézométrique et le suivi par un bureau d'ingénieurs ne sera plus nécessaire sur le long terme. Le suivi biologique pourrait aussi être revu et simplifié.

Un contrôle régulier du site restera néanmoins nécessaire, notamment pour vérifier régulièrement le bon fonctionnement des installations et le maintien du niveau d'eau.

Selon l'affluence du public, il pourrait être nécessaire de mettre en place un concept d'accueil du public. Une collaboration avec des associations ou d'autres partenaires est parfaitement envisageable pour un tel projet.

Coûts estimatifs	
Installation de pompage (y.c. location du matériel)	CHF 20'000
Consommation d'électricité (3mois)	CHF 2'500
Contrôle régulier du site et du fonctionnement des installations (réalisé par un bureau d'ingénieurs)	CHF 3'500
Total	CHF 26'000

Tableau 3 Coût budgétaire d'une inondation (trois mois) sans système fixe d'irrigation agricole, avec alimentation en rivière ou par la nappe (puits existant)

L'installation de pompage dépend de la longueur des tuyaux à installer pour atteindre la parcelle à inonder ainsi que l'amenée d'électricité. Le coût de location et d'installation du système d'alimentation en eau peut être drastiquement diminué en cas de collaboration avec l'exploitant agricole. Le coût donné ici prend en compte la location de l'ensemble du matériel pendant trois mois auprès d'une entreprise spécialisée, ainsi que la pose/dépose et surveillance par ladite entreprise.

En cas d'utilisation d'une pompe et d'un système d'alimentation fixe, les coûts sont de l'ordre de CHF 4'000.- par inondation, qui couvrent grosso-modo les coûts d'électricité et quelques indemnisations supplémentaires pour l'exploitant agricole (surveillance des pompes, etc.).

Coûts estimatifs	
Consommation d'électricité (3mois) Contrôle régulier du site et du fonctionnement des installations (réalisé par un bureau d'ingénieurs)	
Total	CHF 7'500

Tableau 4 Coût budgétaire d'une inondation (trois mois) avec système fixe d'irrigation agricole, avec alimentation en rivière ou par la nappe (puits existant)

À long terme, le coût d'une inondation avec un système fixe d'irrigation agricole existant pourrait idéalement être réduit à environ CHF 7'500.- par période d'inondation. Ces coûts d'inondation mentionnés ne sont que techniques et ne comprennent pas le suivi scientifique, le contrôle de l'hydrologie au niveau des nappes et le suivi pédologique ni les éventuelles indemnités de l'exploitant.

2.2 Surface optimale d'un site d'escale

Évaluer les surfaces minimales, optimales, maximales convenant aux différents groupes de limicoles.

Schmid et al. (Stationnement des limicoles faisant escale en Suisse, Station ornithologique de Sempach, 1992) ont classé 196 sites d'escalades de limicoles en Suisse décrits dans un recensement et une cartographie en 1992 ; ces sites sont présentés selon plusieurs critères, notamment leur surface :

Surface	Nombre	Pourcentage
<1ha	5	2%
1-10 ha	43	22%
10-100 ha	92	47%
100-1000 ha	50	26%
>1000 ha	6	3%

Tableau 5 Surfaces des sites d'escale recensés en 1992 par la station ornithologique de Sempach.

Les surfaces concernées semblent étendues si on les compare avec celles de la parcelle inondée des Quatre-Vingts à Yverdon-les-Bains (5 ha), mais ces surfaces sont d'une autre nature et constituent des « régions à potentiel élevé » que la station ornithologique a délimitées et dont une partie seulement est favorable aux limicoles en fonction des conditions saisonnières et hydrologiques. Il est donc difficile de comparer ces valeurs avec les nôtres ; les auteurs soulignent aussi l'importance d'avoir des sites suffisamment grands pour limiter l'effet des dérangements.

2.2.1 L'expérience d'Yverdon

Le site du projet pilote d'Yverdon-les-Bains aux « Quatre-Vingts » couvre 5 ha dont les 2/3 sont recouverts d'eau [1]. L'expérience des quatre premières inondations contrôlées a montré que le site est l'endroit en Suisse où le plus grand nombre de limicoles font escale quand il est inondé [1][2][3][4]. Plusieurs facteurs concourent certainement à ce grand succès : le site est idéalement placé sur les voies de migration (cœur du Plateau, dans le prolongement d'un grand lac) ; les inondations tests ont couvert quasi l'ensemble de la période de passage (août-octobre ou mars-mai) et ont donc permis, avec le temps, la constitution d'une petite population de limicoles en escale ; localement, le site est très favorable par sa position en milieu ouvert au centre de la plaine de l'Orbe et par la grande surface qu'il offre. La surface inondée assure aussi une bonne attractivité pour les limicoles migrants survolant la zone.

Il est vraisemblable qu'une surface inondée plus petite permette aussi l'escale de limicoles. Il est aussi vraisemblable qu'il existe une relation entre la taille d'un site et la quantité et la rareté des limicoles qui peuvent

s'y arrêter (bien que les limicoles puissent certainement être plus concentrés que ce qui est actuellement le cas dans le champ des Quatre-Vingts). Toutefois, le facteur le plus important est probablement celui des dérangements. Un site d'une taille suffisante permet aux limicoles de se replier dans une autre partie du site s'ils sont dérangés [5] et ainsi de ne pas quitter définitivement le lieu d'escale.

Pour les limicoles en escale, Livezey et al. (2016) [6] citent des distances de fuite d'env. 40 m et même de 70 m dans le cas d'un chien non attaché provoquant le dérangement. Pour les oiseaux de la famille des cigognes cette distance est de 50 m environ. Il paraît donc logique de prévoir une zone tampon de 50 m au moins entre la zone favorable aux limicoles et les zones attenantes.

Pour que la zone centrale d'un petit site inondé (par exemple : 2500 m²), il est donc nécessaire d'avoir un champ nettement plus grand (2.25 ha pour une zone centrale de 2500 m² ou 4 ha pour une zone centrale de 1 ha dans une parcelle carrée).

L'effet « zones ouvertes » ou « dégagement » est autant, voire même plus important. Dans l'approche SIG ci-dessous (chap. 2.3.1), on montre que l'effet sur un site d'escale des éléments de type forêt (notamment les hauts rideaux abris de peupliers de la Plaine de l'Orbe) est encore plus grand que l'effet lié aux dérangements ; pour cette raison, un tampon de 100 m de largeur a été appliqué aux forêts et aux zones construites jouxtant des sites potentiellement favorables.

2.2.2 Un abaque pour aider à la délimitation

Les valeurs de bandes tampons de 50 m et de 100 m ont été prises en considération dans l'approche SIG appliquée à la définition d'objets potentiels dans les cantons de Vaud, Fribourg et Soleure (voir chap. 2.3.2). La figure 2 illustre la partie centrale (ordonnée) d'un champ d'une taille donnée (abscisse) pour un champ carré (ligne noire) et pour un champ rectangulaire deux fois plus long que large (ligne bleue) lorsque l'on a imposé une zone tampon de 50 m sur son pourtour (il existe généralement une activité de tous les côtés d'un champs donné).

L'analyse de la figure 2 nous montre qu'il est conseillé de viser **au minimum** un champ de 3-5 ha et une zone centrale inondée de l'ordre de 1-3 ha. C'est l'ordre de grandeur de la surface du site d'escale d'Yverdon et on a maintenant la preuve qu'il fonctionne bien.

Cependant, on a aussi observé depuis 2019 que des grands groupes de limicoles (plusieurs dizaines d'individus) de grande taille (courlis corlieu, barge à queue noire, chevalier aboyeur) étaient attirés par le site d'escale d'Yverdon-les-Bains, qu'ils tournaient en vol sur le site puis poursuivaient leur route sans s'arrêter. Cela a été notamment le cas de 23 courlis corlieu le 12 avril 2023 et de 40 chevaliers aboyeurs le 1^{er} mai 2023 (J.-C. Muriset - ornitho.ch). Il est plausible de penser qu'un site d'escale deux ou trois fois plus étendu permettrait à ces grands vols de s'arrêter.

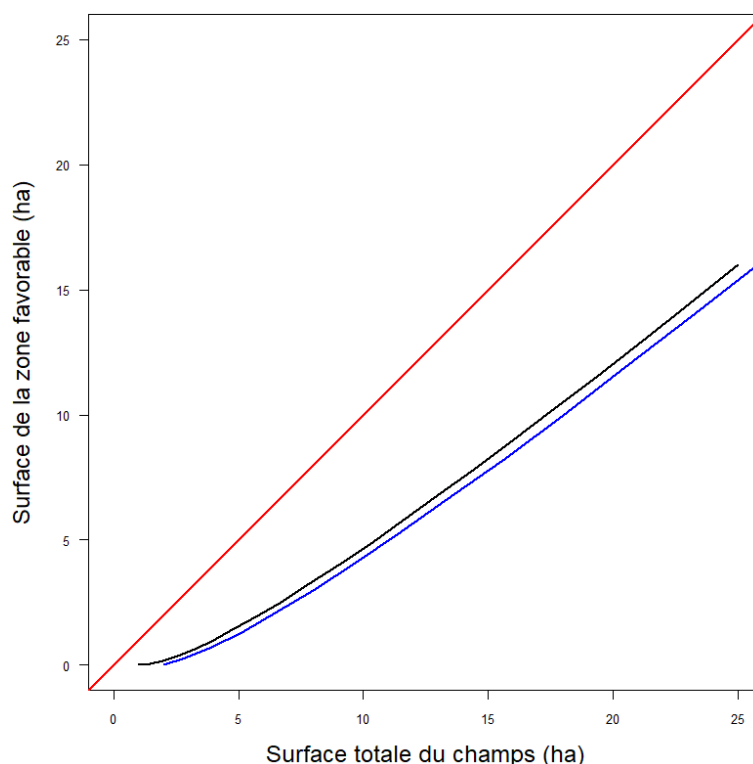


Figure 2 Relation entre la surface favorable centrale d'un champ (ordonnées) quand on lui a retranché une zone tampon de 50 m sur son pourtour. Ligne noire : champ carré de surface donnée en abscisses ; ligne bleue : champs deux fois plus long que large de surface donnée en abscisses. Ligne rouge, sans zones tampons.

2.3 Sites potentiels VD-FR-SO

Déterminer les sites potentiels dans les cantons de VD, FR, SO susceptibles de servir d'escales pour les limicoles migrateurs.

2.3.1 Recherche sur base de données et analyses SIG

Un premier modèle a été élaboré par la Station ornithologique Suisse (Dr Jérôme Guélat et Dr Sylvain Antoniazza) sur la base d'analyse de données SIG. La démarche est décrite ci-dessous.

L'axe principal de migration des limicoles pour les trois cantons de Vaud, Fribourg et Soleure étant le Plateau suisse, le travail n'a été réalisé que sur cette zone biogéographique.

Comme l'étude porte sur le potentiel d'escale en milieu agricole, la couche "Exploitation agricole : surfaces d'utilisation" a été utilisée comme couche de base¹.

Quelques facteurs principaux ont été retenus pour la sélection des sites potentiels :

- Les limicoles requièrent des zones relativement ouvertes ; ils n'aiment pas la proximité à la forêt, aux constructions, etc.). Ainsi, une zone tampon de 100m a été appliquée autour des polygones des catégories "Agglomération et zone habitée" et "Centre de grande ville" (de la couche "TLMRegio_Land-Cover" du swissTLMRegio). Ces zones ont été retirées de la couche focale. Dans la même idée, une zone tampon de 100m a été appliquée aussi autour des polygones des catégories "Wald" et "Wald offen" (de la couche "TLM_BODENBEDECKUNG" du swissTLM3D), qui ont aussi été retirés de la couche focale.

¹ https://www.geodienst.ch/services/lwb_nutzungsflaechen?locale=fr

- Le deuxième facteur principal est la topographie du site (pente inférieure à 1-2°) pour avoir des zones inondées assez grandes et pas trop profondes. Pour cela le MNT25² a été utilisé afin de ne sélectionner que les surfaces présentant ces caractéristiques géographiques.
- Le troisième facteur principal est le dérangement. Une zone tampon de 50m autour de tous les chemins et routes (avec la couche "TLM_STRASSE" du swissTLM3D) a été générée et ces zones ont été retirées de la couche focale.
- Par la suite, des priorités ont été fixées parmi tous les polygones retenus (qui sont nombreux).
 - Priorité 3 : par défaut, les surfaces de la couche focale obtenues avec les restrictions ci-dessus ont une priorité 3.
 - Priorité 2 : une priorité 2 a été donnée aux surfaces qui devraient être plus facilement inondables. Pour cela, la couche « Feucht Acker » obtenue de l'Agroscope a été utilisée. Tous les polygones de la sélection SIG ayant au-moins 80% de surface inondable (définie par l'attribut P_Gesamt = 14 ou 15 dans la couche de l'Agroscope), sont retenus.
 - Priorité 1 : finalement une priorité 1 est attribuée aux champs qui sont dans des carrés kilométriques qui ont accueilli un nombre substantiel de limicoles au cours des 5 dernières années (2017-2021).
- Finalement les surfaces très petites (inférieure à 1'000m²) ont été retirées de la sélection.



Figure 3 Sites potentiels dans le canton de Vaud (exemple de résultats obtenu par l'approche systématique SIG). La plaine de l'Orbe est bien visible au centre du canton ainsi que les parties vaudoises de la plaine de la Broye au nord-est. Le reste des sites est disséminé sur l'ensemble du plateau vaudois.

² <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/geodata/height/dhm25.html>

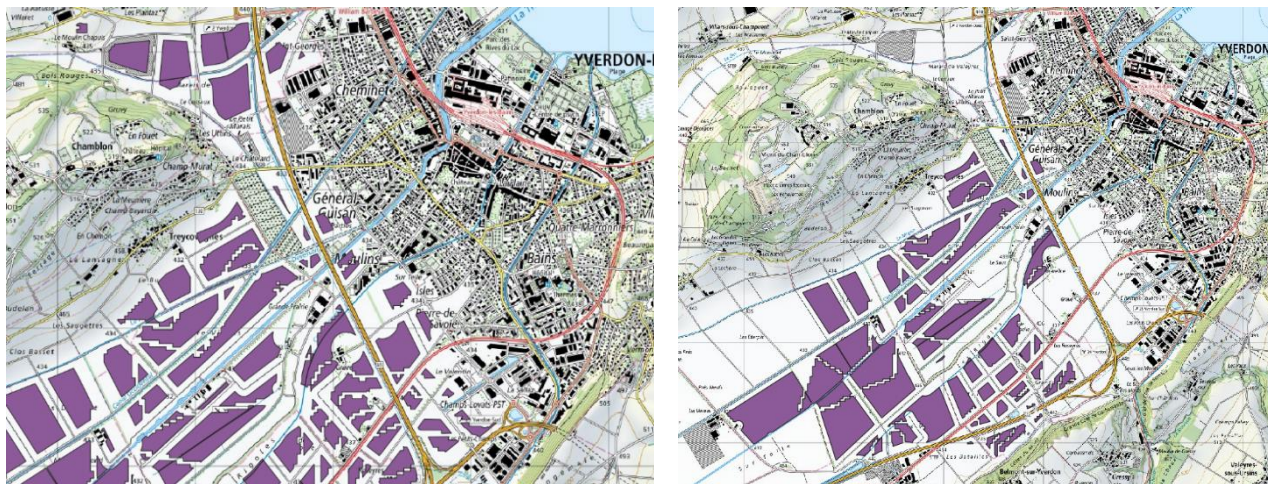


Figure 4 Plan à gauche : Zoom des sites potentiels dans la région d'Yverdon (exemple de résultats obtenu par l'approche systématique SIG). La plupart des grands champs des zones plates ressortent comme potentiels. Plan à droite : sites potentiels de priorité 1 dans la région d'Yverdon (exemple de résultats obtenu par l'approche systématique SIG). La basse plaine de l'Orbe était très favorable à l'arrêt des limicoles, de nombreux champs ont une priorité 1 et le nombre de sites est assez proche de celui présenté en figure 4. Dans d'autres zones, beaucoup moins de champs ont une priorité 1.

2.3.2 Résultats de l'analyse SIG

La carte ci-après présente les sites potentiels de priorité 1 identifiés dans les cantons de Vaud, Fribourg et Soleure selon l'approche systématique SIG.

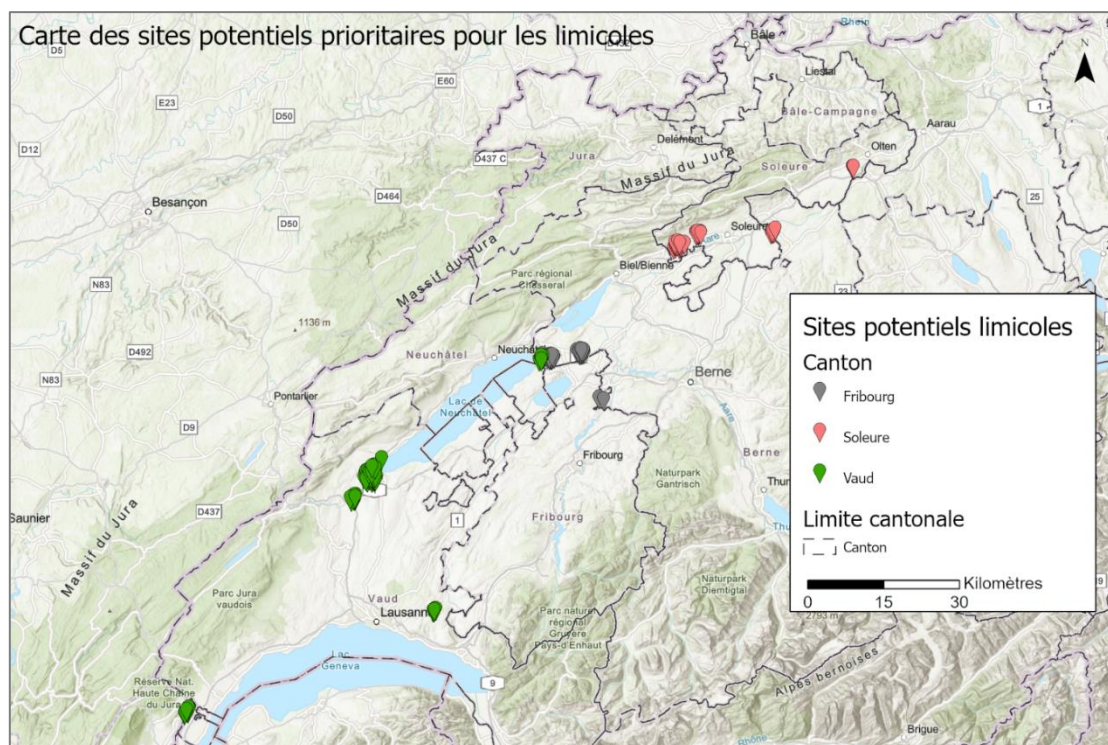


Figure 4 Carte des résultats de l'approche SIG d'identification des sites potentiels de priorité 1 pour les limicoles dans les cantons de Vaud, Fribourg et Soleure. La basse Plaine du Rhône (Villeneuve, Noville, Rennaz) présente également plusieurs sites adéquats pour créer des espaces-limicoles. Son axe pratiquement N-S est aussi favorable à la migration des limicoles qui continuent à l'automne en prenant le Val d'Illiez et passent le Col de Cou/Bretolet (nombreuses observations de migration nocturne). Ce secteur n'est pas représenté sur la carte car il ne fait pas partie de la zone biogéographique du plateau.

2.3.2.1 Vaud

Pour les champs de priorités 1, on voit six zones se dégager :

- la région du Marais de la Versoix, a priori dans cette zone, c'est surtout le marais lui-même qui sert de site d'escale ;
- il en va de même au Lac de Bret où les champs retenus sont marginaux ;
- pour la région de Chavornay, c'est généralement surtout les étangs du Creux de Terre qui sont utilisés ;
- dans la région de la Sauge (Cudrefin), c'est plutôt l'étang de la Sauge qui est généralement utilisé ;
- un petit champ est encore identifié à l'embouchure de la Thièle à Yverdon, mais cela est dû à la proximité aux sites d'escale du bord du lac (îles et bancs de sable) ;
- reste donc essentiellement la basse plaine de l'Orbe dont plusieurs champs ont accueilli un nombre important de limicoles ces dernières années : le champ volontairement inondé des Quatre-Vingts, mais aussi un champ entre Ependes et l'aérodrome qui a en particulier été inondé durant l'été 2021 très humide et qui a vu s'arrêter des effectifs importants d'oiseaux.

Les champs de priorités 2 se situent principalement dans la plaine de l'Orbe et la basse plaine de la Broye, avec quelques sites disséminés ailleurs.

Les champs de priorités 3 regroupent presque tous les champs un peu plus marginaux (avec tout de même une surface relativement grande de la plaine de la Broye juste au nord de Payerne).

2.3.2.2 Fribourg

Les champs de priorité 1 se trouvent dans trois zones :

- à l'Auried de Kleinbödingen, mais là, l'arrêt des limicoles a vraisemblablement surtout lieu dans l'Auried lui-même ;
- dans la région de Krümml (Agriswilmoos selon carte 25'000) où les limicoles s'arrêtent surtout au bord des étangs ;
- de part et d'autre de la Broye au nord du Vully ; là, le score de 500 limicoles-jour est atteint grâce au champ situé au sud de « Erlenhof » qui a été inondé durant les inondations de l'été 2021 et qui a attiré de grands groupes de limicoles. Ce champ a été converti en mesure Vanneau en 2022 (mais le nombre de limicoles qui se sont arrêtés en 2022 a été plus modeste qu'en 2021 ; communication de Lucas Lombardo sur le site du CHClub300).

Les champs de priorité 2 couvrent une grande partie du Seeland fribourgeois ainsi qu'une zone de la basse plaine de la Broye. Puis quelques sites plus marginaux.

Les champs de priorité 3 sont relativement disséminés.

2.3.2.3 Soleure

Les champs de priorité 1 sont dans quatre zones :

- les champs près de Boningen sont identifiés comme prioritaires à cause des observations dans les champs près de Rothrist. Ceux de la région du Inkwilersee sont dus aux observations autour du lac ;
- à Selzach, les oiseaux semblent s'arrêter le long de l'Aar ;
- au sud de Granges, les observations ont vraisemblablement surtout lieu dans les champs, mais les données sont signalées généralement à l'échelle du carré kilométrique, un affinage serait nécessaire pour connaître les meilleurs champs.

Les champs de priorité 2 sont surtout situés dans la plaine entre Granges et Soleure et dans quelques autres sites.

Les champs de priorités 3 couvrent le reste.

2.4 Synergies agricoles

Identifier les synergies avec les projets d'améliorations structurelles (drainages, irrigation, ...).

Les cantons partenaires du projet ont investigué les diverses synergies, principalement en lien avec des projets agricoles en cours, dans les sites potentiels identifiés dans l'approche SIG. Des synergies ont été cherchées dans le cadre de projets de drainage, irrigation, remaniements parcellaires, projets de conservation des sols tourbeux et autres projets touchant aux terrains agricoles (revitalisation de cours d'eau, etc.).

Un tableau de synthèse a été proposé aux cantons comme support pour l'identification et la classification des sites potentiels présentant des synergies ou des contraintes, afin d'évaluer la probabilité de succès du site sur la base d'une analyse préliminaire, sans consultation des propriétaires fonciers ni des données techniques spécifiques au site. Les informations concernant la surface des sites, les propriétaires fonciers, les acteurs à considérer, ainsi que d'autres informations utiles ont également été fournies par les cantons.

Nom	ID (FR)	Canton	Commune(s)	Synergie principale	Synergies - précisions	Contrainte principale	Contraintes - précisions	Surfaces		
								ha	coord.	propriété foncière

Est-ce un site potentiel	Catégorie site potenti	Description du projet	Acteurs à considérer	Probabilité succès (1="élevée" à 3="faible")	Explication de la probabilité de succès	Autres remarqué	Ist-Zustand, lokale Experten	Carte

Figure 5 Informations fournies dans la table des sites potentiels retenus par les cantons.

La table ci-dessous (Tableau 6) reporte les principales synergies et contraintes proposées aux cantons pour le choix des sites. Parmi les synergies principales retenues le plus souvent, on trouve clairement la propriété foncière (parcelles appartenant au canton) ainsi que les réseaux écologiques et les fréquences d'inondation à l'état actuel. En effet, les sites d'escales pourraient se réaliser en premier lieu sur des parcelles déjà fréquemment inondées et pour lesquelles des solutions permettant l'exploitation de la parcelle sont recherchées.

Tableau 6 Synergies et contraintes principales considérées dans l'analyse.

Synergie principale	Contrainte principale
Inondations fréquentes	Drainages (non contrôlés)
Drainages (projet à venir et/ou drainages contrôlables)	Disponibilité en eau
Irrigation (facilité d'alimentation en eau)	Structures (CFF, autoroute, aéroports, autres)
Drainages/irrigation	Environnement (sites pollués; nappe; autre: préciser)
Remaniement parcellaire / AF	Propriété (nombre de propriétaires; sensibilités; etc.)
Projet de conservation des sols	Autres projets aux objectifs contradictoires (préciser)
Projet de modification de topographie (adaptation de la sur	Surface d'assèchement
Bassin de rétention des crues / INO contrôlée	Autres
Synergie aménagement cours d'eau	
Réseaux écologiques / infrastructure écologique	
Planification paysagère / régionale	
Compensation environnementale	
Inventaire (OROEM et autres inventaires)	
Stratégie biodiversité suisse	
Critères de qualité OEA	
Parcelle propriété du canton	
Autre	

La sélection de sites résultant de cette analyse reste un document de travail interne aux cantons et n'est pas destiné à être publié. Les propriétaires et exploitants concernés seront approchés au cas par cas selon les opportunités.

À court-moyen terme, l'objectif est de créer au moins deux sites d'escales par canton, afin de pouvoir alterner les inondations printanières et automnales tout en maintenant une exploitation agricole.

Au total, 50 sites ont été retenus par les trois cantons (18 sites pour Fribourg, 22 sites pour Soleure et 10 sites pour Vaud). La carte de la Figure 6 montre la position indicative des sites retenus après analyse.

Pour le canton de Fribourg, la plupart des sites se trouvent dans le district du Lac, avec une majorité de sites dans le Grand-Maraïs. Un site a été retenu également dans le district de la Broye et un en Singine.

Pour le canton de Vaud, la presque totalité des sites se trouve dans la plaine de l'Orbe, à l'instar du site déjà existant à Yverdon-les-Bains. Quelques sites se trouvent également à proximité du Grand-Maraïs, entre le lac de Neuchâtel et le lac de Morat.

Pour le canton de Soleure, les sites sont assez bien repartis dans la plaine de l'Aar.

Les chapitres suivants reportent les démarches entreprises par les divers cantons afin d'identifier les synergies agricoles possibles et de mettre en évidence les meilleurs sites qui ont été identifiés via la démarche SIG du chap. 2.3.2.

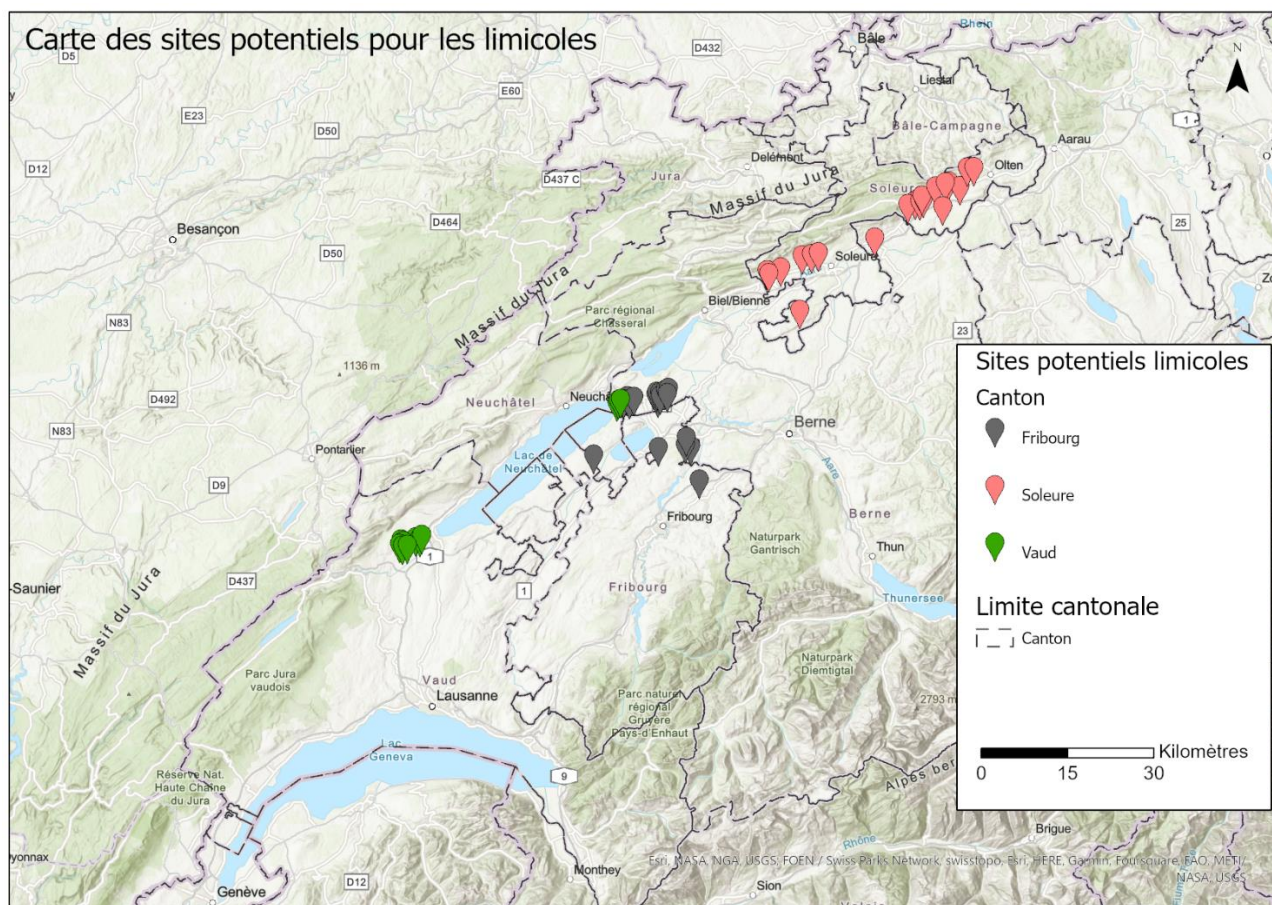


Figure 6 Carte de la distribution géographique des sites retenus suite à l'analyse des synergies agricoles dans les cantons de Vaud, Fribourg et Soleure.

2.4.1 Analyse des sites escales limicoles par le canton de Vaud

Sur la base du modèle SIG élaboré par Sempach, nous avons ajouté des données spatiales disponibles au niveau cantonal :

- Surfaces en propriété de l'Etat de Vaud
- Surfaces annoncées dans le cadre des paiements directs
- Surfaces des exploitations liées à l'Etat de VD (Etablissements pénitentiaires de la plaine de l'Orbe (EPO), Domaine de Marcelin, Domaine de Granges Verney). Sans surprise, seuls les EPO sont concernés pas des sites potentiels.

Les informations liées à la propriété ne sont pas disponibles sous forme de géodonnées. Toutefois ces informations sont disponibles au cas par cas pour les collaborateurs de l'Etat de Vaud ayant un accès à la plateforme du registre foncier. Cela a permis de vérifier la propriété foncière des parcelles retenues par l'analyse.

Les drainages ne sont pas géoréférencés sur le canton de Vaud, il n'était dès lors pas possible de se baser sur cette donnée pour en ressortir les surfaces non drainées. Toutefois, selon le secteur des améliorations foncières, dans les périmètres le plus propices, à savoir la plaine de l'Orbe et de la Broye, la quasi-totalité des terrains est actuellement drainée.

Un grand nombre de parcelles est ressorti de l'analyse, nous nous sommes dès lors concentrés sur les surfaces de priorité 1, dont des périmètres de plus de 3 ha étaient gérés par un seul exploitant, afin d'éviter des négociations complexes et une gestion future par plusieurs exploitations. Nous nous sommes également concentrés sur les parcelles à proximité du site des Quatre-Vingts pour ce qui est de la Plaine de l'Orbe, celles propriétés de l'Etat de Vaud ainsi que celles à proximité d'un cours d'eau afin de garantir la mise en eau artificielle. Nous avons ensuite vérifié les propriétaires et gardé les parcelles dont ces derniers sont plus susceptibles d'accepter (fondations, communes). Des sites à proximité de l'aéroport militaire de Payerne n'ont à ce stade pas été retenus dans l'analyse, à cause du conflit potentiel avec les avions. Des investigations concernant la faisabilité à proximité d'un aéroport militaire doivent être menées avant de proposer ces sites.

Finalement, 10 parcelles ont été retenues. Comme pour les autres cantons, cela ne veut pas dire que les parcelles non retenues ne sont pas adéquates. Si les parcelles retenues ne permettent pas la mise en place de la mesure, le travail effectué par la station ornithologique permettra d'aller chercher d'autres parcelles potentielles.

2.4.2 Analyse des sites escales limicoles par le canton de Fribourg

Sur la base du modèle SIG élaboré par Sempach, nous avons ajouté des données spatiales disponibles au niveau cantonal :

- Surfaces d'assolement (SDA)
- Périmètres des projets d'irrigation : projets réalisés et projets en cours, resp. en réflexion. Pour les projets réalisés, la couche contient essentiellement les projets qui ont fait l'objet d'une subvention au titre de l'Ordonnance sur les améliorations structurelles dans l'agriculture (OAS), elle n'est pas exhaustive, certaines installations ponctuelles n'étant pas répertoriées.
- Périmètres des zones drainées : données non couvrantes, essentiellement les projets qui ont fait l'objet d'une subvention au titre de l'OAS. Des drainages qui ont pu être réalisés sans subventionnement et sans mise à l'enquête ne figurent pas dans nos bases de données. Cette couche est donc incomplète.
- Surfaces des exploitations liées à l'Etat de FR (Grangeneuve, Sorens, Bellechasse). Sans surprise, seule l'exploitation de Bellechasse est concernée pas des sites potentiels.

Les informations liées à la propriété ne sont pas disponibles sous forme de géodonnées. L'accès au registre foncier est toutefois public et peut se faire via un lien sur chaque article du portail cartographique (limite de 20 renseignements par jour/personne/langue). Cela permet de vérifier au cas par cas la propriété foncière.

La carte de l'aléa ruissellement (OFEV) a également été ajoutée au projet. Elle met en évidence les zones potentiellement menacées par le ruissellement, sur la base d'une modélisation non vérifiée sur le terrain. Selon la connaissance du terrain des experts consultés, il ressort que les zones concernées pas le ruissellement ne correspondent souvent pas aux sites connus pour être inondés régulièrement. Nous n'avons donc pas utilisé ces données dans l'analyse.

Au vu du nombre élevé de sites potentiels mis en évidence dans le modèle de base, nous avons sélectionné dans un premier temps uniquement les sites de priorité 1 et les avons passés en revue en navigant sur la carte. Plusieurs personnes ont participé à cette analyse, représentant différents secteurs :

- Grangeneuve, section agriculture, secteur amélioration des structures, connaissance des projets d'irrigation et de drainages notamment,
- Service des forêts de la nature, section faune, chasse et pêche, connaissance du terrain et des espèces à protéger,
- Service des forêts et de la nature, section nature et paysage, lien avec les biotopes de haute valeur écologique (en zone agricole et hors zone agricole), contrats LPN
- Grangeneuve, section agriculture, secteur ressources naturelles, connaissance des contraintes d'exploitation liées aux sites potentiels et des synergies possibles avec les programmes existants.

Nous avons évalué les sites par secteurs, avec une attention focalisée sur les sites en mains publiques (canton, communes, institutions). Un site retenu dans le choix final ne signifie pas que ce devra être cette parcelle précisément, mais une parcelle dans ce secteur, voire seulement une partie d'une parcelle. Un maximum d'informations a été rassemblé dans le fichier excel.

Dans un deuxième temps, nous avons passé en revue les sites de priorité 2, estimant que le critère de « non-observation de limicoles » n'était pas rédhibitoire si par ailleurs, la faisabilité d'un projet était jugée élevée. C'est ainsi que nous avons délimité un site potentiel sur les parcelles d'Agrico à St-Aubin, qui sont également propriété de l'Etat de Fribourg, mais exploitées par un agriculteur vaudois.

Le choix final d'une vingtaine de parcelles reste indicatif et ne doit en aucun cas exclure les autres sites. Il est important de disposer de l'ensemble de ces données et de pouvoir les consulter en fonction de l'évolution de certains projets.

Un projet de cartographie des sols du Grand-Marais (BOKA = Bodenkartierung Grosses Moos) devrait apporter des connaissances nouvelles. Les résultats sont actuellement connus, mais n'ont pas encore été communiqués. Le projet vise à clarifier sur quels sols une agriculture intensive, notamment la culture maraîchère, restera possible à l'avenir et où la fertilité du sol peut être améliorée durablement par des mesures ciblées. Cette étude pourrait constituer une importante base décisionnelle en vue d'améliorer les sols et d'investir dans les infrastructures agricoles telles que des installations d'irrigation et de drainage et des chemins ruraux. Le projet comprend des sols marécageux dans treize communes du canton de Berne et six communes du canton de Fribourg. Il est possible qu'en fonction des résultats de cette étude, certaines surfaces perdent leur qualité de SDA, voire soient abandonnées par l'agriculture. Dès lors ces surfaces pourraient plus facilement être dévolues à la conservation des espèces.

2.4.3 Analyse des sites escales limicoles par le canton de Soleure

Les surfaces du modèle SIG de la station ornithologique de Sempach constituent une vue d'ensemble précieuse du potentiel du Plateau soleurois. La faisabilité des mesures en faveur des limicoles en halte a été étudiée de manière approfondie. Pour ce faire, les surfaces de la station ornithologique ont été superposées aux couches du géoportail du canton de Soleure. Cette comparaison a conduit à une priorisation des surfaces identifiées par la Station ornithologique.

Les couches suivantes du géoportail ont été utilisées :

- Zone agricole cantonale et de protection Witi Granges-Soleure
- Objet WZV 102
- "Surfaces bleues" dans l'objet OROEM 102 (surfaces de limicoles avec interdiction de drainage et indemnisation des dégâts d'humidité par le canton).
- Informations foncières, propriété foncière (notamment propriété du canton)
- Surfaces d'assolement (inventaire cantonal des SDA)
- Drainages
- Utilisation du sol (notamment zone à bâtir)
- Zones de protection des eaux souterraines

La faisabilité des mesures est la plus élevée dans les zones de protection des eaux et zone agricole Witi Granges-Soleure (kant. Landwirtschafts- und Schutzzone Witi Grenchen-Solothurn), car elles sont conformes à la zone (§1 du règlement de la zone "einen Teil der Grenchner Witi als Wasser – und Zugvogelreservat von nationaler Bedeutung zu erhalten "). Dans le périmètre de l'OROEM à Granges et dans les surfaces déjà désignées pour les limicoles ("surfaces bleues / Blaue Flächen"), la faisabilité est particulièrement bonne, car il existe dans ce secteur un plan d'affectation cantonal ainsi qu'une obligation de conserver l'objet de l'OROEM. Il existe en particulier une interdiction de nouveaux drainages et les dommages causés par l'humidité aux cultures agricoles sont déjà indemnisés par le canton.

En outre, la faisabilité des mesures sur les surfaces appartenant au canton est la meilleure, car les investissements y sont en principe déjà garantis et le maître d'ouvrage est en même temps propriétaire du terrain. La propriété foncière privée et les rapports de propriété compliqués, comme les hoiries, compliquent considérablement un projet ou peuvent le rendre impossible.

Les surfaces d'assolement adéquates ou en partie adéquate constituent généralement un critère négatif, car elles nécessitent une pesée des intérêts avec une justification détaillée (imposé par la destination) et peuvent donner lieu à une obligation de compensation (fiche d'information du canton 2022). Selon l'avis du canton, les surfaces avec d'importants ouvrages de drainage existants entraînent une faisabilité réduite, car les propriétaires des ouvrages ont des obligations à long terme envers la Confédération et le canton. Les surfaces situées dans des zones à bâtir ne sont pas prises en compte, car une autre utilisation y est déjà prévue. Enfin, la construction de biotopes dans les zones de protection des eaux souterraines est très fortement limitée et ne peut être autorisée qu'exceptionnellement après des études hydrogéologiques, raison pour laquelle ces surfaces ne sont pas prioritaires. La situation de part et d'autre d'une frontière cantonale (Limpachtal) complique également le projet.

En plus de la comparaison avec les géodonnées cantonales, nous avons discuté des surfaces potentielles avec divers ornithologues locaux. Nous avons ainsi pu déterminer le type d'inondations, c'est-à-dire leur fréquence et leur étendue, ainsi que les observations actuelles de limicoles en halte sur de telles surfaces. Ces informations ont été insérées sous forme de commentaires.

2.5 Pédologie

Analyser, selon l'état des connaissances, les effets des inondations périodiques sur les sols, sur la base du site d'Yverdon et des données de la littérature scientifique (tassement, lessivage des intrants, régénération de la tourbe, faune du sol).

Un des buts du projet Escales Limicoles Agriculture est de concilier les différents usages d'un site d'escale, à savoir la production agricole et l'accueil des limicoles. En effet, dès 2017, des interrogations ont été formulées concernant l'impact des inondations temporaires sur :

- les ressources alimentaires à disposition des limicoles,
- la capacité de production agricole,
- le maintien à court et moyen termes de la fertilité chimique, physique et biologique du sol.

L'objectif de ce chapitre est de donner des éléments de réponse objectifs quant aux avantages, limites voire inconvénients de cet essai pilote multi-usage du sol.

Il s'agit également d'élargir le propos à la problématique des effets connus ou présumés d'inondations temporaires sur les sols tourbeux présents sur le Plateau suisse.

Ce chapitre se base principalement les résultats obtenus sur le site d'escale pour limicoles au sud d'Yverdon-les Bains. Les données datent de 2018-2019 (issues d'un projet de Master réalisé à l'EPFL au laboratoire ECOS par Romain Bienz [7] et de 2020 (rapport de Romain Bienz, bureau ECOTEC Environnement SA) [8]. La réflexion générale s'appuie également sur quelques données issues de la littérature.

2.5.1 Les sols du site d'Yverdon-les Bains : caractéristiques, formation et avenir

Le site d'étude se situe au nord de la plaine de l'Orbe, une profonde gouttière d'érosion glaciaire comblée par une alternance de dépôts fluviaux et lacustres quaternaires [9]. Ces dépôts sont surmontés par des couches de tourbe palustre qui peuvent aussi être intercalées entre les différents dépôts minéraux.

Le site d'étude, au lieu-dit Les Quatre-Vingts est composé de deux parcelles agricoles contiguës. La « parcelle inondée » est un site de repos temporaire pour les limicoles en migration (site d'escale) et la « parcelle non inondée » fait office de référence pour analyser l'impact des inondations sur le sol. Le site d'escale couvre cinq hectares de terre cultivée. L'inondation temporaire est planifiée et contrôlée pour correspondre aux périodes de migration des limicoles du printemps (mars-mai) ou de l'automne (août-octobre). En dehors de ces périodes d'inondation, l'exploitant utilise cette parcelle pour y installer des cultures maraîchères ou des grandes cultures.

2.5.1.1 Type de sol : un sol "type"

Les deux parcelles ont fait l'objet en 2018 d'une description des sols à l'aide de sondages à la tarière à main (profondeur maximale 1,2 m). La photo et le schéma (Figure 7) donnent des indications sur le sol le plus fréquent, le sol "type" des deux parcelles, qui est considéré comme représentatif du site d'étude. De manière très schématique, ce sol est un sol tourbeux dont l'épaisseur de la couche de tourbe en surface est faible. Dans le cas présent, la couche de surface est calcaire car elle contient des carbonates issus de la craie sous-jacente. Selon le Référentiel Pédologique (AFES, 2009) [10], ce sol ne fait pas partie des tourbes (Histosols) en raison de son épaisseur de tourbe très faible. Il est classé dans les sols minéraux à excès d'eau (REDUCTI-SOL TYPIQUE) à Anmoor épihistique (à faible épaisseur de tourbe en surface), drainé. Ce type de sol est un des sols fréquents de la plaine de l'Orbe. Pour plus de précision se référer à Gobat & Guenat [11].

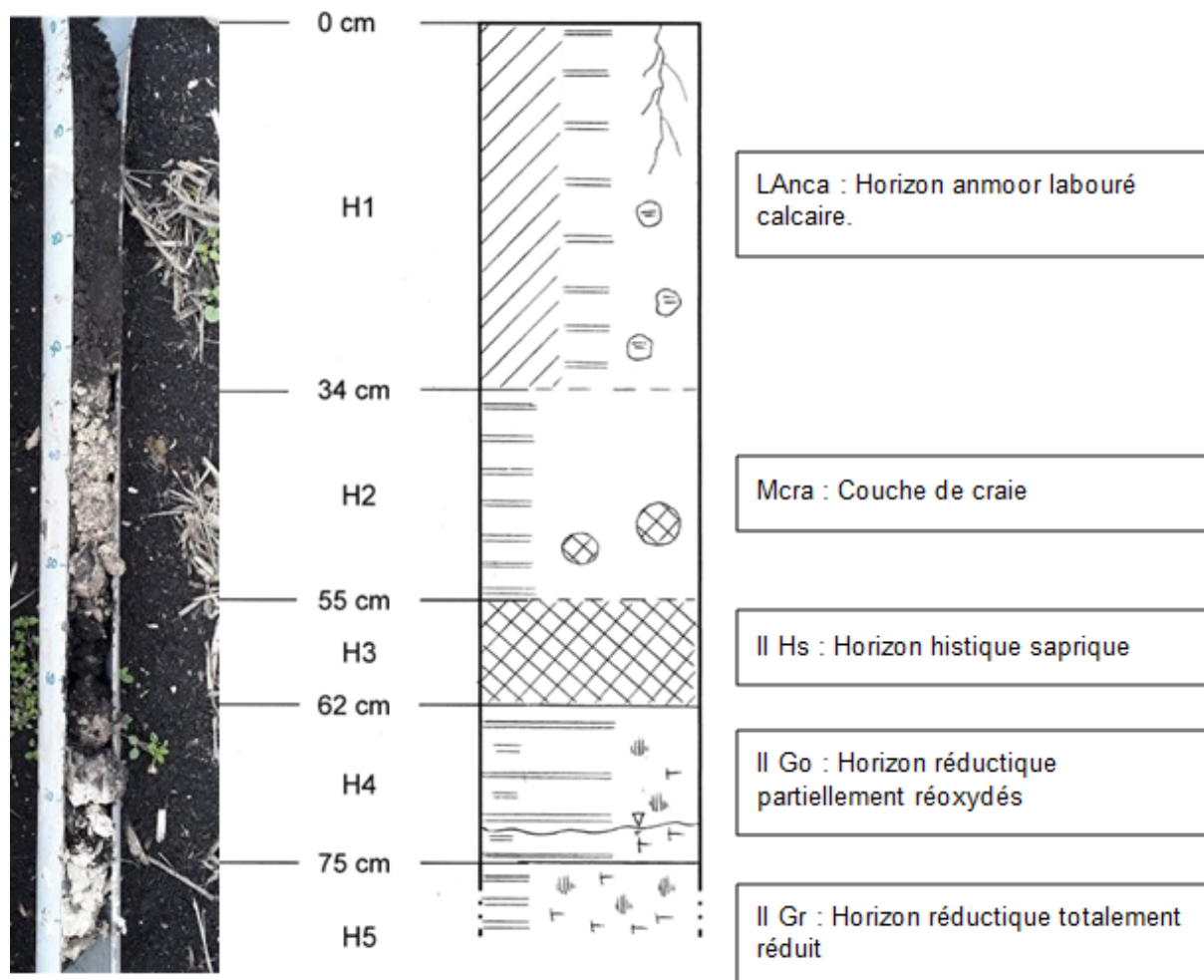


Figure 7 Photo du profil F_E5 associé au croquis descriptif réalisé sur le terrain en 2019.

2.5.1.2 La formation du sol

La formation débute par le dépôt d'une couche minérale imperméable qui tapisse le fond d'une dépression peu profonde remplie d'eau stagnante riche en calcium. Dans ces conditions, les débris végétaux issus d'une végétation de bas-marais s'accumulent peu à peu dans l'eau et forme une tourbe (horizon histique) de bas-marais alcalin. La tourbe aurait pu continuer à s'accumuler année après année pour former un horizon tourbeux beaucoup plus épais, mais la formation de la tourbe a été interrompue par des dépôts de craie qui se forment lorsque les conditions hydrologiques de la plaine changent (variation du niveau d'eau par exemple). A ce stade, ce sol permet le développement d'un bas-marais alcalin, un écosystème qui occupe la majeure partie de la plaine de l'Orbe. C'est un milieu riche en biodiversité, sujet aux inondations, considéré comme insalubre et qui ne produit que de maigres fourrages. Dès le début du 19^{ème} siècle, d'importants aménagements anthropiques (drainages souterrains, rectification des cours d'eau, creusage de canaux à ciel ouvert)

se déploient sur toute la plaine, y compris dans et à proximité du site d'étude pour lutter contre les inondations, l'engorgement des sols, augmenter leur capacité de production et faciliter les travaux agricoles (augmentation de la portance, homogénéisation et meilleur contrôle du fonctionnement hydrique des parcelles). Ainsi, tous les sols tourbeux drainés de la plaine ont acquis une aptitude agronomique très élevée et sont cultivés de manière intensive. C'est le cas du site d'étude d'Yverdon-les-Bains.

2.5.1.3 Impact du drainage sur le sol

Paradoxalement, ces aménagements anthropiques compromettent à moyen terme, la pérennité du sol et sa fonction de production. D'une part, le drainage stoppe définitivement la formation de la tourbe. D'autre part, suite au drainage, le sol se tasse, puis la tourbe se minéralise, un phénomène aggravé par les travaux aratoires (labour) et par l'érosion éolienne. Le sol s'amincit peu à peu. La plupart des sols tourbeux drainés sont cultivés depuis 50 à 150 ans ; durant cette période, les épaisseurs de tourbe ont diminué de 50 à 200 cm [12]. A moyen-long terme, dans de telles conditions, la disparition de la tourbe est inéluctable. Il peut en résulter la mise à nu des couches inférieures du sol composées de craie lacustre, comme dans le site d'étude ou de niveaux sableux ou argileux, des substrats bien moins propices que la tourbe à la production agricole intensive. La possibilité de cultiver certaines parcelles, selon l'épaisseur de tourbe restante et la profondeur la nappe, s'estime entre quelques années et quelques dizaines d'années.

De plus, comme le niveau du sol s'est abaissé, les drainages ne sont plus efficaces, voire sont détruits par les machines agricoles et les racines de cultures sont de nouveau au contact de la nappe. L'évolution des sols tourbeux implique en général un remplacement des drainages par un système plus profond pour continuer à cultiver ces terres [12]. Ce remplacement a un coût, estimé à CHF 25'000 par hectare, ce qui représente 4 à 5 milliards pour l'ensemble de la Suisse [13][14]. Un investissement important, d'autant plus que les drainages continueront de favoriser la perte d'épaisseur de ces sols.

Dans le cas du site d'étude, en 2020, une réfection des systèmes de drainage a été effectuée dans le secteur, y compris dans la parcelle inondée (site d'escale) et celle non inondée (Figure 8).



Figure 8 Photo aérienne du site d'escale (délimitée par le polygone vert) et parcelle témoin (à gauche du site d'escale)

2.5.1.4 Hétérogénéité des sols à l'intérieur du site d'étude

La photo aérienne (Figure 8) révèle, en absence de végétation, des nuances de couleur de la surface du sol. Sur la parcelle inondée, on distingue le tracé d'un ancien cours d'eau. Sur les deux parcelles, les nuances de couleur traduisent les variations de la composition du sol. En effet, l'épaisseur, voire le nombre de couches de tourbe ou de craie changent sur une distance de quelques mètres. Quatre photos (Figure 9) illustrent différents aspects "du sol représentatif" au sein du site d'étude. Cette importante variation spatiale des sols aura une incidence sur le suivi pédologique : pour être représentatif, le nombre de prélèvements sera plus élevé que dans le cas de parcelles aux sols très homogènes.



Figure 9 Photos de quatre profils de sols prises lors de travaux de drainage (2020) dans le site d'escale (C. Roulier).

2.5.2 Interventions sur le site d'étude : inondations, travaux et suivis pédologiques

Le tableau 7 résume les inondations, différents travaux réalisés, les suivis pédologiques depuis la date de création du site d'Escale Limicoles en 2017.

Année	Inondations	Travaux réalisés	Suivis pédologiques
2017	Automne (15 sept. – 31 oct.)	-	Pas de suivi
2018		Réalisation de digues étanches sur la parcelle inondée	1 ^{er} suivi en automne (8 novembre 2018)
2019	Printemps (1 ^{er} mars – 31 mai)	Pose d'un réseau de drainage sur l'ensemble du site (hiver 2019-2020)	Pas de suivi
2020	Automne (1 ^{er} août - 31 oct.)	Pose d'un réseau d'irrigation sur l'ensemble du site	2 ^e suivi au printemps (21-23 /03/2020)
2021	Automne (17 août - 31 oct.)	-	Pas de suivi

Tableau 7 Calendrier des inondations, travaux réalisés, suivis pédologiques (périodes de récolte d'échantillons de sols).

2.5.3 Suivi pédologique : méthodologie

2.5.3.1 Stratégie d'échantillonnage

Le prélèvement des échantillons du sol en vue des analyses est effectué selon une grille régulière dans les deux parcelles (Figure 10). Au total, 32 points de prélèvement, 16 dans chacune des parcelles, un nombre nécessaire pour obtenir une valeur moyenne représentative des différents indicateurs chimiques et physiques, tout en garantissant une précision de 10%, ont été choisis. Les échantillons de sol sont prélevés à la tarière à main sur toute l'épaisseur de la première couche.

L'échantillonnage séquentiel n'a pas été utilisé pour les indicateurs biologiques qui ont leur propre protocole. En ce qui concerne la détermination de la biomasse et densité de vers de terre, 5 placettes par parcelle ont été mesurées. Quant à l'activité biologique du sol, elle possède un protocole d'échantillonnage élaboré par Sol-Conseil (1 échantillon composite par parcelle).

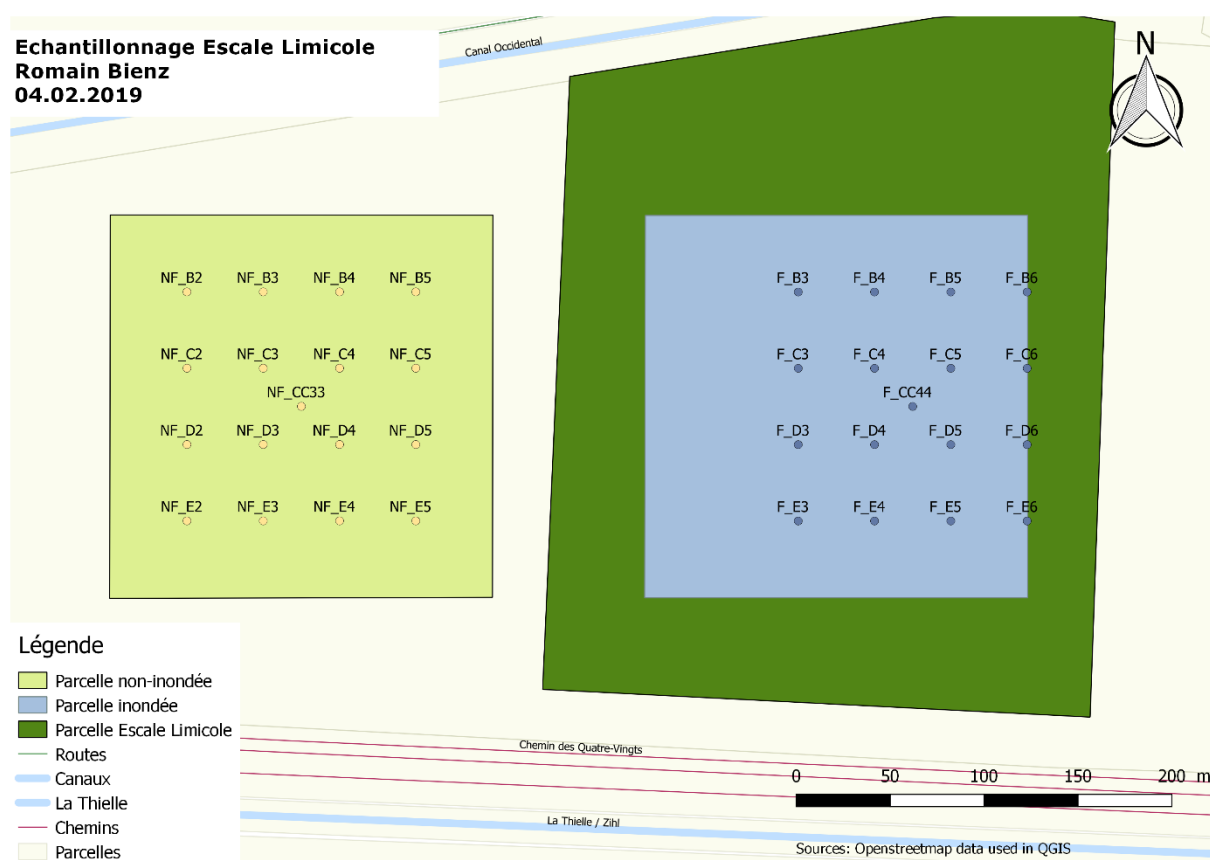


Figure 10 Localisation des points d'échantillonnage dans les deux parcelles.

2.5.3.2 Choix des indicateurs pédologiques

Le suivi des deux parcelles (inondée et parcelle témoin non inondée) est effectué au moyen des indicateurs quantitatifs biologiques, chimiques et physiques (Tableau 8).

Les indicateurs listés en noir peuvent varier en fonction de la période de prélèvement (conditions météorologiques) et des pratiques culturales (type de culture, fertilisation, travail du sol) voire au conditionnement durant le transport et le stockage ainsi qu'au protocole d'analyse [7]; ils témoignent du niveau de fertilité à court terme du sol.

Les indicateurs listés **en bleu** sont plus stables et reflètent des tendances d'évolution à plus long terme du sol, de l'évolution du stock et de la qualité de la matière organique ; la matière organique étant une des sources essentielles de la fertilité du sol à moyen voire long terme. De même certains indicateurs biologiques

caractérisent le fonctionnement biologique du sol et sa fertilité à moyen terme. De plus, les vers de terre sont une ressource alimentaire pour les limicoles.

Tous les indicateurs de 2018 n'ont pas pu, pour des raisons techniques, être mis en œuvre en 2020. De plus, certaines méthodes d'analyses (indiquées avec *) sont différentes entre le suivi de 2018 et celui de 2020 car réalisées dans des laboratoires différents.

INDICATEURS DE FERTILITE	SIGNIFICATION DE L'INDICATEUR	SUIVI 2018	SUIVI 2020
Indicateurs chimiques			
Azote inorganique : NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+	Éléments nutritifs	X	X (sauf NO_2^-)
Azote total (Ntot)	Réserve en éléments nutritifs	X	X
Carbone total (Ctot) : Carbone organique+ Carbone minéral	Réserve en éléments nutritifs, inclus des carbonates	X	X
Carbone organique total (COtot)	Réserve en éléments nutritifs, stockage carbone	X	X
Rapport C/N (COtot/Ntot)	Dégradabilité de la matière organique	X	X
Teneur en matière organique (MO)	Réserve en éléments nutritifs, stockage carbone	X	X
Phosphore disponible * (P)	Éléments nutritifs	X	X
Indicateurs physiques			
Teneur en eau	Humidité du sol	X	X
Épaisseur de l'horizon de surface H1	Réserve en tourbe	X	X
Pénétrométrie	Degré de compaction du sol à différentes profondeurs	X	X
Indicateurs biologiques			
Biomasse et densité de vers de terre	Fertilité des sols Source de nourriture pour les limicoles	X	X
Carbone microbien Cmicr	Biomasse microbienne	X	
Rapport COtot/Cmicr	Proportion des microorganismes dans le taux de carbone	X	
Activité biologique du sol ATP	Biomasse des organismes vivants	X	X
CO ₂	Activité des microorganismes du sol	X	X
Rapport ATP/CO ₂	Taux d'activité biologique des microorganismes	X	X

Tableau 8 Synthèse des indicateurs chimiques, physiques, biologiques suivis en 2018 et 2020. Les indicateurs en marron sont les plus stables dans le temps. Une croix signale que l'indicateur a été suivi durant l'année indiquée.

2.5.3.3 Traitement statistique des données

Les données numériques sont traitées au moyen du logiciel R pour les analyses statistiques. Au préalable, un test de normalité (Shapiro-Wilk) est appliqué à toutes les données quantitatives pour vérifier si elles suivent une loi normale ou non, puis un second test de dépendance des jeux de données est également appliqué. Ces pré-requis permettent de choisir les tests statistiques les plus adaptés pour la suite (comparaison entre les parcelles et suivi temporel). Ainsi, les outils statistiques utilisés pour comparer les jeux de données entre eux et déterminer s'ils sont significativement différents sont les suivants :

- Unpaired t-test de Welch pour les données indépendantes et normalement distribuées ;
- Paired t-test de Welch pour les données dépendantes et normalement distribuées ;
- Unpaired Wilcoxon test pour les données indépendantes ne suivant pas une distribution normale ;
- Paired Wilcoxon test pour les données dépendantes ne suivant pas une distribution normale.

Le seuil choisi (p) est 0.005.

2.5.3.4 Les conditions à respecter pour un suivi pédologique pertinent

Il est important de garder à l'esprit que le protocole mis en place en 2018 était basé sur les hypothèses suivantes :

- les deux parcelles étudiées ne sont différenciées que par l'inondation saisonnière contrôlée sur la parcelle inondée et ne subissent pas d'autres modifications ;
- la parcelle inondée et la parcelle témoin (non-inondée) sont cultivées de la même façon. Le travail de la terre et les apports en engrais sont donc supposés similaires ;
- le protocole de suivi est identique depuis le prélèvement des échantillons jusqu'à la méthode analytique.

Ces hypothèses sont également applicables au suivi temporel (2018, 2020) des parcelles. Malheureusement, dans les faits, il n'a pas été possible d'imposer à l'exploitant le même mode cultural dans les 2 parcelles (ne serait-ce qu'en raison de l'inondation d'une des 2 parcelles) et il n'a pas été possible d'obtenir les détails des modes culturels des 2 parcelles en 2019 et en 2020.

2.5.4 La fertilité du sol : résultats et interprétation

Les tableaux ci-dessous récapitulent les données du suivi 2018 et de 2020 pour les parcelles inondée et non inondée. Les indicateurs de fertilité chimique, physique et biologique sont caractérisés par leur valeur moyenne et leur écart-type. Les tests statistiques testent la différence significative (seuil de 0,005%) entre les parcelles.

Indicateurs chimiques

Parcelle	Année	Nitrate NO ₃ ⁻ [mg/kg]	Ammonium NH ₄ ⁺ [mg/kg]	Azote total N [% m.s.]	Carbone organique total [% m.s.]	Rapport C/N [-]	Matière organique [% m.s.]	Phosphore [mg/kg]
Inondée	2018	151,01 (128,14)	1,94 (0,48)	1,31 (0,15)	20,84 (1,48)	16,0 (0,77)	35,95 (5,08)	47,62 (17,10)
	2020	5,00 (1,08)	0,07 (0,03)	1,07 (0,08)	16,05 (1,39)	15,2 (0,43)	24,96 (2,3)	159,47 (43,47)
Non inondée	2018	116,91 (37,81)	4,97 (1,10)	1,17 (0,08)	19,41 (0,53)	16,6 (0,67)	34,30 (4,82)	41,71 (8,20)
	2020	3,48 (1,38)	0,21 (0,12)	1,05 (0,05)	16,76 (0,87)	16,0 (1,00)	25,08 (1,00)	116,52 (13,71)

Tableau 9 Valeurs moyennes et (écarts types) des indicateurs de fertilité chimique obtenues dans la parcelle inondée et non inondée pour les années 2018 et 2020. m.s : matière sèche.

Indicateur	<i>Welch t-test</i> entre la parcelle inondée et la parcelle témoin en 2018	<i>Welch t-test</i> entre la parcelle inondée et la parcelle témoin en 2020.	Paired <i>t-test</i> entre les parcelles inondées pour les années 2018 et 2020.	Paired <i>t-test</i> entre les parcelles non-inondées pour les années 2018-2020.
[NH ₄ ⁺]	Différence significative	Différence significative	Différence significative	Différence significative
[NO ₃ ⁻]	Différence significative	Différence significative	Différence significative	Différence significative
[P]	Pas de différence significative	Différence significative	Différence significative	Différence significative
MO	Pas de différence significative	Pas de différence significative	Différence significative	Différence significative
[CO _{tot}]		Différence significative	Différence significative	Différence significative
[N _{tot}]	Différence significative	Différence significative	Différence significative	Différence significative
C/N	Différence significative	Différence significative	Différence significative	Différence significative

Tableau 10 Tests statistiques sur les données de fertilité chimique.

Les indicateurs chimiques de fertilité les plus sensibles (nitrate, ammonium, phosphore) montrent de très grands écarts types qui témoignent de la grande hétérogénéité des sols au sein de chacune des parcelles (inondée et non inondée).

D'autres indicateurs sont plus stables (carbone organique total, matière organique et azote total, C/N). Les teneurs en matière organique sont élevées pour un sol agricole, elles sont typiques des sols tourbeux. Les rapports C/N sont bas et indiquent une décomposition rapide de la matière organique, témoin et d'une matière organique facilement biodégradable. Par ailleurs, la teneur en matière organique élevée caractérise ici un processus de décomposition rapide de la matière organique, ce qui indique que la fertilité chimique du sol est élevée, ceci dans les deux parcelles.

Indicateurs physiques

Parcelle	Année	Teneur en eau [% massique]	Épaisseur de l'horizon H1 [m]
Inondée	2018	36,79 (4,10)	0,30 (0,04)
	2020	39,19 (1,58)	0,30 (0,03)
Non inondée	2018	36,06 (3,54)	0,34 (0,05)
	2020	38,91 (0,80)	0,35 (0,03)

Tableau 11 Valeurs moyennes et (écarts types) des indicateurs de fertilité physique obtenues dans la parcelle inondée et non inondée pour les années 2018 et 2020.

L'épaisseur de l'horizon tourbeux (H1) est faible et confirme le premier diagnostic, le sol des deux parcelles n'est plus une tourbe mais un sol organique dont l'épaisseur de tourbe a diminué suite aux drainages et exploitations successifs.

Indicateur	<i>Welch t-test</i> entre la parcelle inondée et la parcelle témoin en 2018	<i>Welch t-test</i> entre la parcelle inondée et la parcelle témoin en 2020.	Paired <i>t-test</i> entre les parcelles inondées pour les années 2018 et 2020.	Paired <i>t-test</i> entre les parcelles non-inondées pour les années 2018-2020.
Epaisseur H1	Pas de différence significative	Différence significative	Pas de différence significative	Pas de différence significative
Teneur en eau	Pas de différence significative	Pas de différence significative	Différence significative	Différence significative

Tableau 12 Tests statistiques sur les données de fertilité physique.

Il faut nuancer les résultats des analyses statistiques. Les éventuelles différences statistiques entre les parcelles ou au cours du temps correspondent dans la réalité à de très faibles différences de valeurs moyennes (quelques millimètres pour l'épaisseur et 3 % d'eau). Ces différences sont négligeables dans la réalité du terrain.

Résistance à la pénétration

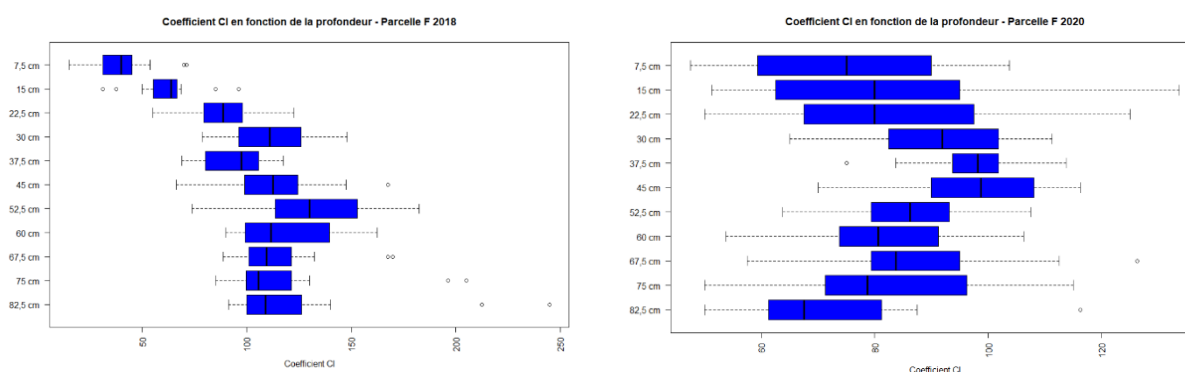


Figure 11 Coefficient CI (résistance à la pénétration) à différentes profondeurs, pour la parcelle inondée en 2018 et 2020.

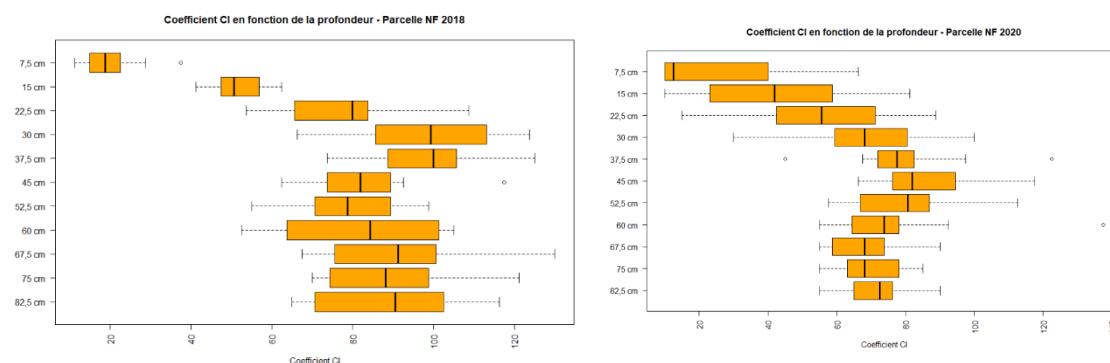


Figure 12 Coefficient CI (résistance à la pénétration) à différentes profondeurs, pour la parcelle non inondée en 2018 et 2020.

Les deux parcelles non-inondée/ inondée présentent une évolution de la résistance à la pénétration avec la profondeur similaire : un maximum de résistance à la pénétration est atteint entre 30 et 45 cm. Ce niveau correspond probablement à la semelle de labour. Le profil général indique une résistance à la pénétration inférieure en 2020 qu'en 2018 pour la parcelle non-inondée. Globalement, la parcelle inondée a un profil indiquant un sol légèrement plus dur en 2018 et en 2020 que le sol de la parcelle non-inondée mais, à ce stade, les différences ne peuvent être imputables qu'à l'inondation.

Indicateurs biologiques

Parcelle	Année	ATP [ng ATP/g m.s.]	CO ₂ 4 jours [µgCO ₂ /g/h]	CO ₂ /ATP	Densité de vers de terre [ind. / m ²]	Biomasse de vers de terre [g/m ²]
Inondée	2018	3747,2	14,2	3,7	10,00 (12,96)	2,64 (4,35)
	2020	3375,6	12,4	3,6	0 (0)	0 (0)
Non inondée	2018	2596,4	13,1	5,0	10,00 (8,39)	5,78 (5,31)
	2020	3311,5	11,7	3,5	0 (0)	0 (0)

Tableau 13 Valeurs moyennes et (écarts types) des indicateurs de fertilité biologiques obtenus dans la parcelle inondée et non inondée pour les années 2018 et 2020.

Les données concernant la biomasse et la densité de vers de terre ainsi que celle de l'activité biologique du sol (ATP/CO₂) ne sont pas analysées statistiquement. Le format des données ou leur nombre n'étant pas adaptés.

Le nombre de vers de terre et leur biomasse sont très faibles, dans les deux parcelles lors des deux années de suivi. Ces valeurs basses sont typiques des sols tourbeux, beaucoup moins riches en vers de terre que les sols minéraux. Cependant, ces résultats sont très en-dessous de ce qu'il est possible d'attendre dans un sol tourbeux. Les données de la littérature mentionnent entre 59 et 140 individus par mètre carré avec respectivement une biomasse de 64 à 40 g par mètre carré dans des sols tourbeux analogues. Dans le cas du site d'étude, les très faibles valeurs pourraient s'expliquer en partie par des conditions météorologiques peu favorables à l'activité des vers de terre lors des périodes précédant les prélèvements, une hypothèse qui reste à vérifier.

Au vu de ces très faibles valeurs de population de vers de terre, on peut s'interroger sur les ressources alimentaires des limicoles. Vu leur nombre dans le site d'escale, d'autres sources de nourriture que les vers sont certainement à disposition pour les limicoles. Il serait intéressant d'identifier ces autres sources potentielles.

Les valeurs d'ATP, reflets de la biomasse microbienne sont qualifiées, d'après les normes, de riches à très riches dans toutes les situations. Le rapport CO₂/ATP, qui témoigne de l'activité microbienne a été jugé médiocre à satisfaisant pour la parcelle inondée et satisfaisant pour la parcelle non inondée. L'inondation aurait ainsi tendance à diminuer, au moins temporairement l'activité des microorganismes, qui sont en grande majorité des organismes aérobies.

2.5.5 Suivi pédologique : effets des inondations sur le sol

Les conditions pour un suivi pédologique pertinent n'ont pu être respectées entre 2018 et 2020.

Entre ces deux suivis, deux événements majeurs sont venus modifier le déroulement du suivi :

- la réalisation de digues étanches à l'est et à l'ouest de la parcelle inondée. Ces travaux ont directement modifié le sol de la parcelle inondée et ont été suivis de différences de culture entre les deux parcelles. Des cultures différentes peuvent impliquer une couverture du sol, un travail du sol ainsi qu'un apport en engrais différents et avoir une incidence sur les indicateurs de fertilité ;
- la pose d'un réseau de drainage durant l'hiver 2019-2020 sur l'ensemble du site d'étude, qui bouleverse totalement le fonctionnement des sols avec des conséquences sur tous les indicateurs de fertilité du sol.

De plus, le protocole de suivi a été modifié notamment au niveau des périodes de prélèvements, la première automnale, la seconde printanière ; une différence qui peut avoir une incidence sur les valeurs des indicateurs de fertilité les plus sensibles. Certains indicateurs ont dû être abandonnés pour des raisons techniques et pour d'autres les méthodes analytiques sont différentes entre 2018 et 2020.

De telles modifications créent d'importantes différences entre 2018 et 2020 qu'il est difficile de dissocier de celles induites par l'inondation saisonnière. L'interprétation des données et les conclusions qui en résultent sont donc soumises à caution.

L'effet de ces changements (hors inondation) sur la fertilité du sol est clairement visible dans l'évolution de la parcelle non inondée. En l'absence de telles modifications, la parcelle témoin (non inondée) était supposée ne pas évoluer drastiquement, les seuls changements devant affecter les indicateurs les plus sensibles. Or, dans le cas présent, tous les indicateurs de fertilité, même les plus stables sont statistiquement différents entre 2018 et 2020. Seule l'épaisseur de tourbe H1 n'a pas évolué. Ces différences entre 2018 et 2020 ne peuvent s'expliquer par de simples variations de pratiques culturales, de fertilisation par exemple entre 2018 et 2020. Il n'est donc plus possible d'utiliser cette parcelle non inondée comme une référence pour étudier l'effet des inondations sur la parcelle inondée (entre 2018 et 2020).

La parcelle inondée a également évolué entre 2018 et 2020, presque tous les indicateurs de fertilité ont changé. Il n'est donc pas possible, vu les modifications apportées dans les deux parcelles de dissocier l'effet des modifications de la parcelle à celui des inondations.

2.5.6 Bilan du suivi pédologique : limites et perspectives

Le bilan du suivi pédologique est négatif puisque le suivi n'a pas pu être effectué dans des conditions correctes qui respectaient les hypothèses de base. Cependant, on peut tirer, à ce stade, quelques conclusions de ce travail.

Vu les importantes modifications apportées aux deux parcelles entre 2018 et 2020, il faut considérer que 2020 est l'année de départ du suivi, à conditions que d'autres modifications importantes ne sont pas survenues depuis 2020 dans l'une ou l'autre parcelle du site d'escal.

Les suivis 2018 et 2020 débouchent sur plusieurs recommandations :

- A l'avenir, le protocole de suivi doit être strictement respecté, c'est à dire que les deux parcelles ne doivent plus être profondément modifiées, les différences de gestion des parcelles étant strictement limitées à l'inondation. Dans ce cadre-là, une réflexion doit être menée avec l'agriculteur qui gère la parcelle pour garantir une même gestion des deux parcelles (type de culture, fertilisation, travaux agricoles).
- Adaptation des indicateurs de fertilité : les indicateurs chimiques mettent en évidence des tendances intéressantes concernant la minéralisation de la tourbe qu'il sera nécessaire de confirmer dans le futur. Il est néanmoins conseillé de réfléchir à une variante allégée du protocole dans laquelle les formes minérales d'azote (nitrate, ammonium) et le phosphore assimilable ne sont pas mesurées. Il s'agit de se concentrer sur les indicateurs plus stables, en lien avec la matière organique (Corg, matière organique, N total, C/N).
- Les indicateurs physiques sont faciles à analyser et à traiter et apportent des éléments de réponses utiles à ce projet. Ils sont toutefois insuffisants pour être interprétés en termes de qualité et de fertilité des sols et doivent être complétés par des analyses de la structure du sol (test type VESS ou protocole développé récemment spécifiquement par la HAFL pour les sols organiques).
- Les indicateurs biologiques ont un potentiel intéressant qui reste à exploiter pleinement. Pour l'indicateur « vers de terre », il est nécessaire d'optimiser le protocole d'échantillonnage afin de l'adapter au sol rencontré sur les parcelles (les prélèvements faits dans des conditions optimales de température et d'humidité). L'analyse de la ressource alimentaire pour les limicoles pourrait être complétée par la recherche d'autres organismes : les invertébrés aquatiques pouvant se développer durant la période d'inondation. Le test facile à mettre en œuvre (Baït Lamina, ISO 18311) permettrait de suivre la qualité biologique du sol et de quantifier l'activité alimentaire des organismes du sol.
- Fréquence du suivi : l'abandon d'indicateurs sensibles aux variations annuelles (saison, fertilisation) au profit d'indicateurs de fertilité plus stables permettrait d'espacer les suivis (3 à 5 ans) et de réaliser un suivi à plus long terme. Deux années d'inondation sont un laps de temps très court ne garantissant pas forcément de quantifier tous les processus physico-chimiques dont certains peuvent se développer, en l'absence de toute autre perturbation, sur des dizaines d'années.

- En accord avec l'agriculteur, une quantification des rendements agricoles dans la parcelle inondée/non inondée serait une contribution intéressante pour l'effet de l'inondation. Cette donnée permettrait de compenser partiellement l'abandon des indicateurs de fertilité les plus sensibles.

2.5.7 Perspectives : un site multifonctionnel : production agricole, escale de limicoles, préservation du climat

Pour faire face au changement climatique, la limitation des gaz à effet de serre (GES) est devenue une priorité nationale. Dans ce cadre, il s'agit de promouvoir le rôle de séquestration du carbone par les sols. Récemment adopté par le Conseil fédéral (29 mars 2023), le rapport sur la séquestration du carbone par le sol identifie deux priorités : empêcher les pertes dans les sols organiques comme les marais et préserver et augmenter la matière organique dans les sols agricoles minéraux [15][16].

“La restauration des sols organiques naturels (hauts-marais et bas-marais) et la réhumidification des sols agricoles organiques peuvent apporter une contribution importante à l'atténuation du changement climatique, en stoppant ou minimisant les émissions dues à la minéralisation de la tourbe et en maintenant le carbone restant “ [16].

La problématique de perte de matière organique est un phénomène particulièrement grave pour les sols tourbeux agricoles [12][17]. Elle oppose d'un côté les sols tourbeux et leur richesse écologique [18] et de l'autre, les meilleures terres arables du pays, qui produisent un quart des légumes indigènes, mais qui ne peuvent être cultivées sans entraîner une perte progressive du sol, de carbone par minéralisation de la matière organique suite au drainage [12][19]. Les sols organiques constituent le plus grand réservoir de carbone terrestre et le drainage des terres tourbeuses entraîne l'émission dans l'atmosphère de gaz à effet de serre tels que le CO₂ et le N₂O [13][14][20]. Cela peut représenter jusqu'à 1,5 % des émissions de CO₂ de la Suisse pour 2015 [19].

En ce qui concerne la régénération de la tourbe, il n'existe, à ce jour, aucune mesure efficace [12][21][22]. Même la ré-inondation permanente (par opposition à temporaire, saisonnière par exemple) et maintenue à long terme des terrains, permettra au mieux de stopper la minéralisation, mais ne permettra pas, dans une échelle de temps humaine, de régénérer les épaisseurs de tourbe perdues.

La tendance actuelle est à la mise en place de mesures visant à conserver le stock de matière organique voire freiner la perte de matière organique et réduire les émissions de GES [19][23]. Plusieurs techniques sont mises en place mais sont peu documentées. On peut citer :

- L'apport de faible épaisseur de matériaux terreux issus du décapage des sols de chantier. Cette technique peut constituer une solution permettant de continuer à cultiver les sols organiques dégradés [12] principalement. Mais elle n'est vraisemblablement pas en mesure de freiner leur minéralisation et leur affaissement et l'effet sur la fertilité des sols à moyen-long terme n'a pas été documentée.
- La reconstitution d'un sol complet (de plus de 60 cm d'épaisseur) par apport de matériaux (avec ou sans remise en surface de la tourbe). Malheureusement les terres « végétales » (issues du décapage de l'horizon A du sol) sont sujettes à spéculation et très rarement valorisées sur les sols agricoles.
- La ré-inondation temporaire des terrains qui tente de concilier utilisation agricole et préservation de la matière organique [24]. Quelques expériences de ce type ont déjà été réalisées. Par exemple, en Allemagne du Nord, des alternatives basées sur la paludiculture sont mises en place depuis une trentaine d'années. Des cultures de sphaignes pour l'horticulture, de roseaux ou de massettes pour la production de matériaux isolants ou de pellets de chauffage ou encore le remplacement des vaches laitières par des races rustiques à viande sont autant de solutions permettant de concilier une préservation des sols organiques avec une activité de production agricole durable et rentable dans ce contexte. Des tests menés en Angleterre montrent que la remontée de nappe en hiver (de -50 cm à -30 cm) ne réduit pas la production de laitue. Pendant la saison de végétation, elle n'a pas d'effet majeur sur la production agricole. Par contre, une remontée de la nappe pendant toute l'année diminue la production de laitue de 37%. En tenant compte des émissions de GES, la remise en eau hivernale est considérée comme un bon compromis pour concilier maintien de la production maraîchère et diminution des émissions de GES [25]. Ces exemples font d'ailleurs parties des recommandations de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) pour une exploitation durable des sols organiques tourbeux. En Suisse, plusieurs projets pilote de riziculture ont été développés dans les plaines tourbeuses drainées (Seeland, plaine de l'Orbe). Cette culture de niche nécessite une remise en eau temporaire de 4 à 5 mois. Cet aménagement augmente localement la biodiversité

(batraciens, libellules, etc.) [26]. Son efficacité pour préserver la matière organique est certainement élevée mais elle n'a pas été quantifiée dans les projets pilotes [27].

Une adaptation au contexte suisse et aux conditions locales particulières de sols tourbeux s'avère certainement nécessaire avant une mise en application concrète. Mais il est déjà possible de discerner des synergies intéressantes entre la paludiculture et le projet d'escaliers limicoles tel que pensé par l'association ELA. Dans l'optique de préservation de la matière organique et du climat, le suivi pédologique permettrait, tel qu'il est proposé, de dégager des tendances quant à l'impact de la ré-inondation temporaire sur la matière organique. Il est clair qu'un suivi complémentaire basé sur la quantification des GES serait un apport très intéressant mais sa mise en œuvre est complexe d'un point de vue technique et scientifique.

En conclusion, vu le rôle central du sol dans les problématiques de production agricole durable, de régulation climatique, de source alimentaire pour les limicoles, il est évident que lors du choix d'éventuels autres sites d'escaliers, le sol doit être pris en compte dans les critères de sélection de sites. En effet, l'impact des inondations sera très différent selon le type de sol, sol « minéral » ou sols tourbeux. Dans ce dernier cas, est-il préférable de choisir un sol tourbeux drainé avec une faible ou une importante épaisseur de tourbe ? Pour un choix d'un site d'escalier, il s'agit d'une pesée d'intérêts entre la faisabilité technique et le coût (mise en œuvre, gestion du site), les avantages et les pertes ou gains à court et à plus long termes d'ordre agronomique, pédologique, de ressources en eau et de régulation climatique.

2.6 Dédommagement à l'exploitant

Chiffrer les pertes de rendement pour l'agriculture en fonction des périodes d'inondation (printemps ou automne) et des cultures concernées. Proposer des solutions pour une indemnisation financière adéquate.

Plusieurs pistes sont à développer pour permettre une juste indemnisation des agriculteurs acceptant de consacrer périodiquement une parcelle à la conservation des espèces. La politique agricole soutient et encourage de telles synergies, mais les contributions prévues notamment dans le cadre des paiements directs à la biodiversité restent faibles en comparaison des pertes de rendement estimées.

Pour la mise en place de sites d'escalier pour limicoles, divers aspects et coûts doivent être pris en compte.

En particulier, les coûts pour la création d'un site d'escalier peuvent être ainsi décortiqués :

1. Coûts pour l'étude de faisabilité
2. Coûts pour la réalisation des premières inondations expérimentales
3. Coût pour la pérennisation du site
4. Coûts pour les inondations suivantes
5. Pertes de rendement lors de chaque inondation.

Les étapes 1 à 4 ne doivent engendrer aucun coût pour l'exploitant agricole. Comme montré au chap. 2.1 ces coûts peuvent être élevés, en fonction du type de suivi mis en place et des disponibilités en eau sur la parcelle. Sur la base des discussions avec les services cantonaux, ces coûts devraient être pris en charge principalement par les services faune et nature des cantons respectifs.

Les indemnisations pour pertes de rendement devraient quant à elles être prises en charge par les services de l'agriculture. Le chapitre 2.6.1 montre les premières réflexions et récolte de données concernant les indemnisations de perte de rendement.

En parallèle des calculs de pertes de rendement, nous avons réfléchi aux possibilités de création de nouveaux types de surfaces de promotion de la biodiversité. Ce point est investigué dans le chapitre 2.6.2.

2.6.1 Estimation des pertes de rendement en fonction des cultures

Avant d'estimer les pertes de rendements liées à l'inondation d'une parcelle agricole pour les limicoles, il est nécessaire d'évaluer la compatibilité des cultures avec une inondation périodique.

Le présent chapitre détaille la compatibilité d'un certain nombre de cultures avec un site d'escale pour les limicoles et estime les pertes de rendement qui sont liées.

L'Annexe A montre que plusieurs cultures sont envisageables avant ou après une inondation, mais qu'il est difficile de faire des généralités. La date de mise en place et de récolte dépend de l'altitude, de la variété, des conditions météorologiques. Les pertes de rendement avancées dans l'annexe A ne tiennent pas compte de certains coûts de mise en place que l'exploitant n'aura pas eus, étant donné que l'inondation est planifiée.

Une certaine flexibilité dans les dates/périodes d'inondation est nécessaire pour concilier l'usage agricole d'une surface avec sa mise à disposition temporaire pour des objectifs de protection de la nature. Si une parcelle est dédiée à une mesure de remplacement, dans le cadre d'un projet exigeant la compensation d'impacts environnementaux (p.ex. construction, remaniement parcellaire...), l'exploitation agricole sera adaptée à la période d'inondation. Mais s'il s'agit de trouver une compatibilité entre nature et agriculture, la période inondée devra faire preuve d'une certaine flexibilité.

Selon l'expérience du site des Quatre-Vingts : une inondation automnale est moins contraignante car elle permet la réalisation de divers types de cultures maraîchères avant la période d'inondation (divers choux, carottes, salades, etc.). Le désavantage d'une inondation d'automne est que le terrain est laissé à nu pendant tout l'hiver (dès la fin du mois d'octobre).

L'inondation printanière est plus contraignante par rapport au type de cultures, mais diverses cultures maraîchères sont quand même compatibles, éventuellement avec quelques adaptations des périodes de semis/récolte et/ou une légère diminution du rendement.

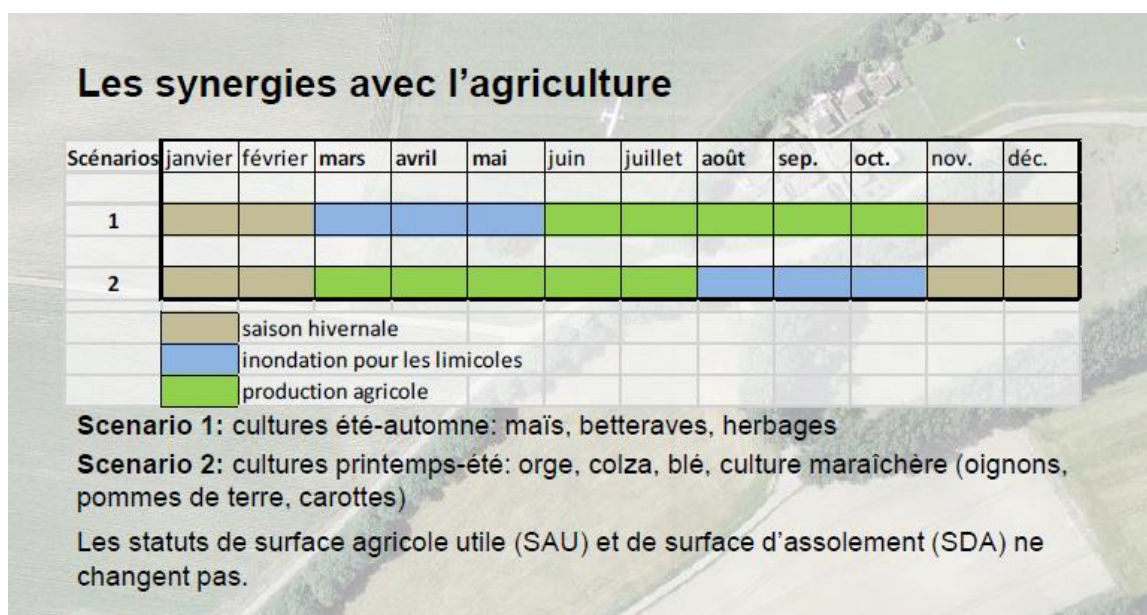


Figure 13 Synergies entre cultures et inondations pour les limicoles selon deux scénarios (évaluation figurant dans le poster de 2015 présentant la faisabilité du projet de site d'escale à Yverdon-les-Bains)

2.6.1.1 Compatibilité avec les cultures fourragères

Dans les herbages, une inondation est théoriquement toujours « compatible », seule compte la perte de rendement, à calculer selon le nombre de coupes perdues et la valeur de chacune de ces coupes (en fonction du type de prairie, voir tableau ci-dessous).

Tableau 14 Perte de rendement des cultures fourragères par utilisation.

Nb. Utilis.	PER ³ / BIO	Coupe 1	Coupe 2	Coupe 3	Coupe 4	Coupe 5	Coupe 6
	CHF/are/an	CHF/are	CHF/are	CHF/are	CHF/are	CHF/are	CHF/are
6 (135 dt MS/an)	42	13	9	6	6	4	4
5 (115 dt MS/an)	36	11	9	5	7	4	
4 (90 dt MS/an)	29	10	9	6	4		
3 (60 dt MS/an)	17	8	6	3			

D'autre part, un réensemencement de la prairie peut s'avérer nécessaire après une ou plusieurs périodes d'inondation, selon l'état de la végétation.

Tableau 15 Estimation du réensemencement : frais de semis (2x travail du sol), semences et supplément fumure.

	CHF/are		CHF/are
Prairie > 20 ares	17 ⁴	Prairie < 20 ares	34

2.6.1.2 Compatibilité avec les grandes cultures

La plupart des grandes cultures ont une période de croissance étendue et ne sont pas compatibles avec une inondation aux périodes favorables aux limicoles. Pour les cultures qui entrent en ligne de compte d'un point de vue des dates de semis et de récolte, il faut tenir compte d'autres facteurs contraignants. Si une culture est théoriquement compatible avec une inondation, il faut s'assurer que l'exploitant concerné ait les connaissances et qu'il y ait un marché pour cette culture. D'autre part, certaines cultures sont plus sensibles que d'autres aux maladies et leur intégration dans une rotation peut entraîner des problèmes sur les cultures suivantes.

Nous avons essayé d'envisager une rotation intégrant une inondation annuelle.

Après une inondation de printemps, la seule culture encore envisageable serait le maïs, avec une variété précoce, semée en juin. Cela reste peu optimal et il faut s'attendre à un rendement plus faible.

Après une inondation d'automne, quelques rotations entrent en ligne de compte, mais nécessitent des compromis, notamment une flexibilité sur le début de l'inondation qui doit être adapté à la date de la récolte de la culture précédente. Une inondation à début août est trop tôt pour la majorité des cultures.

Voici quelques propositions d'une rotation sur quatre ans, compatibles avec une inondation d'automne. Les cultures peuvent se suivre dans un autre ordre en faisant attention aux règles de rotation habituelles. Inondation possible au plus tôt à mi-août.

Tableau 16 Exemples de rotation de cultures sur 4 ans avec une inondation chaque automne.

Blé d'automne	Pommes de terre	Epeautre	Lupin / Féverole
Blé d'automne	Avoine de printemps	Epeautre	Lupin / Féverole
Blé d'automne	Lin	Epeautre	Avoine de printemps
Blé d'automne	Lin	Epeautre	Lupin / Féverole

³ PER Prestations écologiques requises

⁴ D'après le guide pour l'estimation de dommages causés aux cultures de l'USP

La rotation pourrait également se faire avec davantage de cultures différentes (par exemple sur cinq ans). A noter que chaque culture supplémentaire demande des connaissances supplémentaires à l'exploitant.

Tableau 17 Exemples de rotation de cultures sur 5 ans avec une inondation chaque automne.

Blé d'automne	Lupin / Féverole	Epeautre	Pommes de terre	Lin
Blé d'automne	Lupin / Féverole	Epeautre	Lin	Avoine de printemps
Blé d'automne	Pommes de terre	Epeautre	Lin	Lupin / Féverole

Une alternance entre une inondation de printemps et une inondation d'automne, avec des périodes non inondées plus longues, offrirait davantage de possibilités de rotations.

2.6.1.3 Compatibilité avec les cultures maraîchères

Les cultures maraîchères, d'une durée plus courte, semblent plus facilement compatibles avec une escale pour les limicoles. De nombreuses cultures maraîchères ont une durée de croissance entre 8 et 10 semaines, il y a donc la possibilité de faire une deuxième, voire une troisième culture en plein champ sur la même surface, dépendant du début de mise en culture. Dans les cultures maraîchères, une inondation soit avant, soit après la culture peut donc plus facilement être envisagée. Dans le tableau de l'Annexe A, les périodes de semis-récolte indiquent la période à laquelle une culture est semée et récoltée en général : une date de semis précoce correspond généralement à une date de récolte tôt.

Les marges brutes de la plupart des cultures maraîchères sont toutefois élevées. Il faudra s'attendre à des indemnités plus conséquentes. Le manuel ProfiCost Gemüse (2018) [28], de l'union maraîchère suisse, donne une base de calcul pour estimer les coûts, les rendements et les bénéfices des cultures maraîchères.

A titre d'exemple, nous avons choisi la culture du brocoli, compatible avec une inondation tant printanière qu'automnale. Le rendement de la culture, y.c. les paiements directs, est estimé à CHF 36'000/ha. Le bénéfice, après déduction de tous les coûts liés à cette culture serait de CHF 1'528/ha. La perte de rendement en cas d'inondation ne peut toutefois pas tenir compte de tous les coûts de production, notamment ceux des bâtiments de stockage et d'amortissement des machines, qui ne sont pas diminués en cas d'inondation périodique volontaire. Une modélisation sera nécessaire pour une estimation précise.

A l'aide des modèles de calcul de ProfiCost et sur la base du brocoli à titre d'exemple, nous avons tenté d'identifier les coûts qui reviennent de toute façon à l'exploitant, même s'il ne met pas en place la culture. Les coûts directs comme les semences, les intrants, les emballages, la main d'œuvre n'ont pas lieu d'être. Par contre un certain nombre de postes ne peuvent pas être réduits (CHF/ha) :

Coûts estimatifs	
Assurances (notamment assurance grêle)	CHF 1'050
Installation d'irrigation (partiellement, amortissement installation)	CHF 150
Bâtiments (sauf si autre utilisation possible)	CHF 1'491
Fermage (sauf si réduit en conséquence)	CHF 646
Frais généraux de l'exploitation	CHF 764
Cotisation SGA Freiland Frischgemüs	CHF 87
Total	CHF 4'188

Ces coûts incombent à l'exploitant dans tous les cas et seraient une base de discussion pour évaluer l'indemnité. En outre, il conviendra de clarifier si le versement des paiements directs est impacté par une période d'inondation et cas échéant de rajouter les contributions non perçues en conséquence.

2.6.1.4 Aspects importants à prendre en compte du point de vue de l'agriculture

Une fois la période d'inondation terminée, il faut compter au minimum 15 jours de sec (sans précipitations) pour permettre au sol de se réessuyer avant que l'agriculteur puisse faire le nécessaire pour mettre en place sa culture. Ce délai peut être prolongé en cas de précipitations et impactera la culture suivante et donc les dédommagements à verser. L'efficacité du système de drainage est donc un facteur important pour assurer la mise en culture après inondation. Le type de sol influence également le temps nécessaire entre la fin de l'inondation et le moment où une activité agricole est à nouveau possible.

Lors d'une inondation après une culture, les produits phytosanitaires et leurs métabolites peuvent être lessivés et se retrouver dans les eaux. Il en va de même pour l'azote résiduel et le phosphore. Ceci est contradictoire avec tout ce qui est entrepris pour diminuer l'impact des cultures sur la qualité des eaux (plans phyto). L'impact est d'autant plus fort que la parcelle est drainée à la fin de l'inondation. De manière plus générale, on peut avoir un conflit d'intérêt avec d'autres objectifs environnementaux. Par exemple la couverture du sol : une inondation d'automne jusqu'à fin octobre rend difficile la mise en place d'un couvert végétal. Le sol pourrait rester à nu de novembre (fin de l'inondation) jusqu'au semis d'une culture qui pourra être mise en place au printemps.

Dans la rotation des cultures, on compte généralement une période où la parcelle est occupée par une prairie temporaire, afin de permettre au sol de se régénérer. Selon les rotations, il y aura donc entre 2 et 4 ans de prairie sur une parcelle en grandes cultures. Si une inondation est envisagée durant cette phase, il faudra évaluer non seulement la perte de rendement due au fourrage qui fera défaut, mais il faut pouvoir garantir que l'objectif de régénération du sol, visé par la prairie temporaire, ne soit pas entravé par la période d'inondation.

L'inscription à certains programmes recommandés par la politique agricole n'est plus possible en cas d'inondation, notamment ceux concernant la couverture du sol. Il en résulte une perte de contributions dont il faut aussi tenir compte. Dans le cas d'une inondation en automne, la mise en place d'une interculture est pratiquement exclue, tout comme les cultures d'hiver, les dérobées et les engrais verts. Selon les cas, le respect des règles PER pourrait même être compromis. Les parcelles comprenant des cultures récoltées avant le 31 août doivent avoir une couverture du sol l'année en cours (art. 17 OPD). Une dérogation serait nécessaire pour permettre une inondation en automne. Il s'agit de déterminer si une inondation peut remplacer une couverture appropriée du sol. Pour éviter cette situation, l'inondation d'automne devrait être écourtée, afin de garantir une protection appropriée du sol en hiver.

La compatibilité d'un site d'escale pour les limicoles avec la production agricole dépend de nombreux facteurs. Cette première analyse démontre qu'il n'y a pas de scénario optimal : soit un site est dédié à la production et ce sont les périodes d'inondation qui doivent s'adapter aux dates de semis et de récolte, soit le site remplit prioritairement une fonction écologique et les cultures sont choisies en fonction de périodes d'inondation optimales.

Idéalement les inondations de surfaces agricoles destinées à l'escale des limicoles devraient pouvoir se faire de manière alternée sur différentes parcelles dans une même région, afin d'entraver le moins possible la production et de limiter les risques.

Pour avoir des chiffres solides quant à la perte de rendement, il conviendra d'étudier en détail chaque situation. Les réflexions et les estimations faites dans le cadre de cette étude donnent une orientation, mais ne constituent en aucun cas des valeurs à reprendre tel quel.

2.6.2 Reconnaissance et valorisation des sites d'escale pour les limicoles en tant que surfaces de promotion de la biodiversité

Ce chapitre analyse les mesures actuelles ou qui pourraient être envisagées au niveau cantonal et fédéral en zone agricole pour promouvoir les sites d'escale pour les limicoles et les intégrer dans des programmes de la politique agricole.

2.6.2.1 Mesures cantonales

Des programmes cantonaux peuvent être développés pour combler une partie de la perte de rendement liée à une escale limicoles. Dans le canton de Fribourg, la stratégie cantonale biodiversité (SCB) prévoit des mesures, notamment en zone agricole, qui correspondent aux objectifs visés par un site limicoles. Des

financements annuels sont assurés jusqu'à 2028 pour autant que la SCB soit validée au niveau politique (Grand Conseil) en automne 2023.

2.6.2.2 Mesures fédérales

Dans le cadre de la politique agricole 2022 (PA22+) et des stratégies agricoles régionales (SAR), qui ne seront finalement pas mises en oeuvre, l'OFAG avait proposé une mesure pour les limicoles. Cette mesure limicoles, proposée par la Confédération comme mesure de biodiversité régionale dans le cadre des contributions pour une agriculture adaptée aux conditions locales (CACL) aurait été complémentaire à un site d'escale mais se serait limitée toutefois aux possibilités de nidification.

Tableau 18 Mesure limicole CACL proposée par la Confédération dans le cadre des stratégies agricoles régionales.

VN4_B	Biodiversité régionale	Les espèces limicoles sont favorisées.	Les limicoles, comme p.ex. le Vanneau huppé, nécessitent comme lieu de nidification des surfaces au sol non travaillées durant la période de nidification. L'exploitant n'effectue aucun travail du sol entre le 20 mars et le 30 mai, afin d'assurer le succès de la couvée (sur SPB et non-SPB).	Aucun travail du sol entre le 20 mars et le 30 mai	Surfaces sur lesquelles des pontes (ou un potentiel de ponte) sont identifiées par un spécialiste.
--------------	------------------------	--	--	--	--

Cette mesure est intéressante car elle correspond à la période d'une inondation printanière.

Dans le développement actuel de la politique agricole et dans la perspective des futurs projets agro-environnementaux (fusion des projets réseaux écologiques et qualité du paysage), un site d'escale pour les limicoles pourrait devenir une mesure novatrice dans certaines régions.

2.6.2.3 Types 16 : Escales limicoles

Les SPB de type 16 sont des surfaces de promotion de la biodiversité spécifiques à la région. Un site d'escale pour les limicoles répond à cette définition. Les conditions nécessaires pour créer un site d'escale favorable aux limicoles seraient appliquées à ce type 16. Il est évident que ces mêmes conditions favorisent indirectement d'autres espèces (amphibiens, insectes), la valeur écologique d'un tel type de SPB spécifique à la région est donc reconnue.

La contribution maximale de 1000 CHF/ha (10.-/are) actuellement possible pour une SPB de type 16 ne couvre les pertes de rendement d'aucune culture. Un site d'escale limicoles devrait pouvoir bénéficier d'une contribution plus élevée qu'une mesure réseau moins contraignante comme le report de la date de fauche par exemple. Une réflexion quant à la différenciation des contributions selon les contraintes et l'efficacité des mesures est en cours. La juste indemnité à prévoir pour un site d'escale peut faire partie de cette réflexion.

A noter enfin que les SPB type 16 sont possibles uniquement dans le périmètre dans un réseau écologique. Ce point est contraignant, notamment pour la Plaine de l'Orbe car les terrains sont généralement situés hors des périmètres des réseaux écologiques.

Au regard des connaissances acquises sur le site des Quatre-Vingts à Yverdon-les-Bains durant la période 2015-2022 les remarques suivantes concernant la création d'une SPB type 16 peuvent être formulées :

- ✓ Les surfaces prises en compte ne devraient pas être inférieures à 3 ha en un seul tenant. 5 ha ou plus est idéal.
- ✓ La classification en SPB devrait être mise en place pour une durée minimale de 10-15 ans.
- ✓ Elle devrait répondre aux critères énoncés dans le chapitre 3.1.1 « Choix du site ».
- ✓ Les indemnités payées aux agriculteurs devraient être fonction de leur marge bénéficiaire nette perdue et non de leur chiffre d'affaires. La question d'une part d'amortissement sur machines non utilisées reste à discuter.
- ✓ Les indemnités devraient dépendre de la nature des cultures possibles, donc de la nature du sol et des possibilités d'arrosage.

- ✓ Les indemnités devraient être calculées sur une perte moyenne sur la durée d'assolement des cultures en fonction des différentes marges bénéficiaires, différentes pour des carottes ou du maïs par exemple.
- ✓ Les indemnités ne devraient être versées qu'en cas de mise en inondation temporaire.
- ✓ Un bonus peut être envisagé en cas de culture biologique.
- ✓ Une convention passée entre l'exploitant et un organisme ou une association/société reconnus prenant en charge la mise en place et le suivi scientifique des inondations devrait être une condition. Le type 16 « escale limicoles », mis en place dans les terres assolées, pourra être comptabilisé dans les 3.5% de SPB sur terres assolées exigés. Ce statut est un argument essentiel pour l'acceptabilité de la mesure. De plus, dans le cadre de la future politique agricole, les contributions à la biodiversité (CBD) pourraient être différenciées et davantage liées à l'efficacité des mesures. Ce point est également très important au vu du bénéfice que représente les sites d'escale pour la biodiversité.

2.6.3 Conclusion sur la compatibilité des escales limicoles avec l'agriculture et pistes de développement

Le chapitre 2.6 montre que la réalisation d'un site d'escale pour les limicoles va faire face à un certain nombre de difficultés. Les conditions qui ont prévalu sur le site des Quatre Vingt à Yverdon ne se représenteront vraisemblablement pas ailleurs. Une synergie nature – agriculture est largement mise en évidence dans ce projet, mais elle fait l'objet de compromis de part et d'autre.

Plusieurs cas de figures peuvent être envisagés. Soit un site est dévolu en priorité à la protection de la nature et c'est l'exploitation agricole qui s'adapte aux conditions optimales pour les limicoles. Dans ce cas, on pourra se préoccuper d'abord de la faisabilité technique du projet, puis trouver un exploitant qui accepte de cultiver la parcelle avec les contraintes dues aux inondations.

Soit une surface est dévolue prioritairement à la production agricole et l'exploitant accepte une inondation temporaire à certaines conditions. Dans ce deuxième cas, les périodes d'inondation sont adaptées aux impératifs de l'agriculture et partant, moins idéales pour les limicoles. Chaque situation devrait être analysée de manière approfondie pour assurer la compatibilité avec la production et calculer la juste indemnité dans ce cas précis.

Dans ces deux cas, le propriétaire du terrain sera déterminant dans la réussite du projet. Si le terrain appartient à un organisme public, il sera possible d'imposer une inondation, ce qui est difficilement envisageable si la parcelle appartient à un privé ou un exploitant.

Au regard des résultats de cette étude, il semble plus facile de créer une nouvelle SPB de type 16 (cf. chap. 2.6.2) que d'inonder des champs hors du cadre SPB (chap. 2.6.1). À court terme et dès 2024, il pourrait être envisagé la création d'une SPB de type 16 spéciale limicoles avec une contribution de base de CHF 1'000.-/ha. Le reste des dédommagements estimé entre CHF 2'000 et 5'000 CHF par hectare devra être trouvé via un financement externe, une pratique déjà réalisée pour le type 16 *Riz humide* en collaboration avec l'OFAG et IG Nassreiss CH.

Cette fourchette de dédommagement complémentaires (CHF 2'000 CHF à 5'000 CHF/ha) émane des auteurs du présent travail et fixe un ordre de grandeur de dédommagement à proposer aux exploitants qui seraient disposés à héberger un site d'escale pour limicoles. Afin de rendre la création d'un type 16 *Escale limicoles* attractif, il est primordial que les SPB type 16 soient reconnues comme SPB sur terres assolées (TA). De plus, la promotion de cette nouvelle SPB dans les réseaux écologiques sera tout aussi importante afin de garantir sa mise en œuvre par quelques exploitants.

Afin d'introduire cette nouvelle SPB de type 16, les prochaines étapes pourraient s'articuler ainsi :

1. Identification du type de SPB, des conditions à remplir et du dédommagement. Responsable: cantons de Vaud et Fribourg
2. Transmission du dossier à l'OFAG
3. Inscription officielle de la nouvelle SPB dans la prochaine période agricole
4. Mise à jour du catalogue de SPB (flyer de l'OFAG).

3 Communication à l'extérieur

Ce chapitre répond aux questions suivantes formulées par l'OFAG suite à la livraison du rapport intermédiaire :

Comment les résultats seront-ils communiqués à l'extérieur (OFAG ; cantons, Services de l'agriculture cantonaux, agriculteurs, etc.) ?

Ce projet constitue une base de travail utile aux services de l'Etat en charge de promouvoir la conservation des espèces dans la zone agricole. En l'état il n'est pas destiné à être publié, car il ne s'agit en aucun cas d'une planification, mais d'un inventaire de surfaces potentielles, de critères à prendre en considération et d'une liste de questions à approfondir au moment où un projet est envisagé. Au niveau cantonal nous voyons son utilité à différents niveaux :

- Informations aux organes cantonaux concernés, service des forêts et de la nature (protection des espèces), service de l'environnement (projets de revitalisation), secteur des améliorations structurales (projets irrigation, réfections de drainages, remaniements parcellaires)
- Inventaire de surfaces potentielles en cas de projet à fort impact environnemental nécessitant une mesure de remplacement de grande envergure (p.ex. route de contournement)
- Inventaire de surfaces potentielles en cas de volonté d'une collectivité (commune, canton, autre institution) souhaitant mettre sur pied un projet exemplaire.
- Base de données pour initier un projet sur une parcelle en mains privées, avec le soutien technique et financier du canton et d'autres partenaires.

Les agriculteurs des régions sélectionnées par les analyses SIG/cantons ont-ils été informés de la démarche ?

Les agriculteurs n'ont pas encore été informés. Il est à notre avis d'abord nécessaire d'affiner la recherche, afin de réduire le nombre de sites et d'analyser leur pertinence. Cette première étape a été réalisée dans le cadre des recherches de synergies (cf. chap. 2.4). Des contacts se feront au cas par cas selon les opportunités identifiées.

Nous estimons qu'il serait contreproductif de communiquer avant d'avoir un maximum d'éléments de réponse par rapport à tous les aspects de l'étude (compensations, impact sur les sols...). Par contre, dès maintenant nous pouvons saisir les différentes occasions de parler du projet en cours, sans lui donner encore un caractère officiel et surtout définitif.

Comment les agriculteurs pourraient-ils être sensibilisés/motivés/prêts à mettre en place des surfaces inondées temporairement ? Quels sont les freins (agricoles, administratifs, etc.) ?

Différentes situations pourront être mises à profit pour qu'un site potentiel idéal puisse être mis en œuvre :

- Synergies avec les besoins et obligations légales des infrastructures écologiques (IE), pour lesquelles les cantons doivent rendre un premier projet à l'OFEV pour avril 2024. Les sites d'escales pour limicoles pourraient être un élément important de l'IE dans le futur (trame humide).
- Synergies avec les besoins et obligations légales de l'espace réservé aux eaux (ERE), notamment avec mise en place de zones d'agriculture extensive en bord de cours d'eau.
- Mesure de compensation recherchée dans le cadre d'une amélioration structurelle ou d'un autre projet agricole ayant un impact environnemental.
- Faisabilité technique assurée.
- Compensation financière à la hauteur des pertes économiques.
- Zones humides existantes à valoriser.
- Reconnaissance des SPB type 16 dans les 3.5% sur terres assolées
- Autres synergies selon la réalité du site.

Le canton de Soleure a déjà implémenté des surfaces de SPB de type 16 pour le vanneau huppé. A Grenchen, les dégâts dus à l'eau/inondations peuvent être signalés dans les "surfaces bleues" (« Blauen Flächen » dans le plan d'affectation cantonal). Ceux-ci sont alors estimés par un expert et indemnisés par le canton. En contrepartie, de nouveaux drainages ne sont pas autorisés dans ces surfaces.

4 Conclusion

Ce projet a permis de faire un état des lieux des connaissances sur les sites d'escaliers pour limicoles et plus précisément :

- d'identifier des zones susceptibles d'accueillir des surfaces à limicoles (plaine de l'Orbe, le Vully, la plaine de l'Aar, etc.);
- d'identifier les effets des inondations sur les sols (pratiques culturales, minéralisation, etc.);
- de mettre en évidence les caractéristiques que les surfaces doivent absolument avoir pour être fonctionnelles, sur la base des expériences acquises ;
- de récolter de données concernant les coûts de mise en place de ces mesures ;
- d'étudier les cultures compatibles avec la mise en place d'un site d'escalier ;
- d'évaluer les coûts, respectivement les pertes pour l'exploitant et de rassembler les éléments à prendre en compte dans le calcul d'une juste indemnité le maintien de surfaces inondables ;
- de proposer des pistes pour la création d'un nouveau type de SPB ou d'autres moyens pour compenser les pertes de rendement ;
- de mettre en évidence les obstacles administratifs et techniques, à la mise en place de ces surfaces.

Le présent travail a permis de déterminer une méthodologie d'identification des sites potentiels (approche SIG systématique) et de synergies agricoles (inputs supplémentaires par les cantons sur la base des connaissances locales) qui pourront être appliqués à plus large échelle. Les résultats de cette recherche (sélection de sites potentiels et de sites ayant des bonnes synergies agricoles) sont quant à eux gardés à usage interne des cantons dans un premier temps. Cet inventaire des surfaces permettra aux services cantonaux d'intervenir au cas par cas et selon les opportunités afin de mettre en place de nouveaux sites d'escaliers. Une communication concernant l'importance de ces sites et la description de leurs caractéristiques ainsi que des possibilités de financement sera réalisée. Les propriétaires et exploitants directement concernés (sites potentiels avec synergies) ne seront approchés que selon les opportunités. L'approche systématique SIG a permis d'identifier 141 sites potentiels (priorité 1) soit 77 sites dans le canton Vaud, 29 dans le canton de Fribourg et 35 dans le canton de Soleure. Grâce au travail des cantons partenaires, ce nombre a pu être réduit en fonction des synergies agricoles envisageables sur certaines parcelles. Au total, 50 sites ont été retenus par les 3 cantons (18 sites pour Fribourg, 22 sites pour Soleure et 10 sites pour Vaud). La faisabilité d'un tel projet dans un site inventorié, mais non retenu dans ce choix n'est pas du tout exclu.

Du point de vue agronomique, l'étude pédologique a démontré que les inondations ont un impact plutôt négatif sur le fonctionnement d'un sol notamment à cause de l'alternance de période d'inondation et d'assèchement favorisant le lessivage des éléments phosphorés. La détermination des objectifs de l'inondation, la durée d'inondation ainsi que le choix des parcelles à inonder sont donc particulièrement importants afin de minimiser ces impacts négatifs.

La recherche menée sur les pertes de rendement met en exergue la flexibilité nécessaire dans les dates/périodes d'inondation pour concilier l'usage agricole d'une surface avec sa mise à disposition temporaire pour des objectifs de protection de la nature. La compatibilité d'un site d'escalier pour les limicoles avec la production agricole dépend de nombreux facteurs. Cette première analyse démontre que plusieurs cultures sont envisageables avant ou après une inondation, mais il est difficile de faire des généralités. Il n'existe pas de scénario optimal : soit un site est dédié à la production est ce sont les périodes d'inondation qui doivent s'adapter aux dates de semis et de récolte, soit le site remplit prioritairement une fonction écologique et les cultures sont choisies en fonction de périodes d'inondation idéales.

Idéalement les inondations de surfaces agricoles destinées à l'escalier des limicoles devraient pouvoir se faire de manière alternée sur différentes parcelles dans une même région, afin d'entraver le moins possible la production et de limiter les risques.

Pour avoir des chiffres solides quant à la perte de rendement, il conviendra d'étudier en détail chaque situation. Les réflexions et les estimations faites dans le cadre de cette étude donnent une orientation, mais ne constituent en aucun cas des valeurs à reprendre tel quel. Les indemnités pour pertes de rendement pourraient être prises en charge par les services de l'agriculture.

En plus des pertes de rendement, ou en parallèle, il convient de mettre en place des surfaces de promotion de la biodiversité. La création d'une SPB unique pour toute la Suisse permettrait de faciliter grandement les démarches et d'homogénéiser les mesures limicoles entre les cantons. Les réflexions ont toutefois démontré que les contributions pour ce type de surfaces devront être différenciées selon les cas.

L'objectif principal de cette étude est d'avoir une base pour la création de nouveaux sites d'escales. Il faudra ainsi rapidement saisir toutes les occasions permettant la mise en œuvre des prochains sites (idéalement au moins deux par cantons : un site pour l'escale printanière et un pour l'escale automnale). Cependant, diverses questions restent encore ouvertes, notamment :

- Précisions concernant l'impact sur les sols, via un suivi à long terme ;
- Validation des principes de financement des nouveaux sites d'escale, tant à court terme (SPB de type 16 jusqu'en 2024/2025) qu'à long terme (projets agro-environnementaux dès 2026) ;
- Affinage de la stratégie de communication vers l'extérieur.

Cette étude a mis en évidence les conditions d'installation de sites d'escales dans les cantons de Vaud, Fribourg et Soleure et a identifié les implications pour l'agriculture. Même si des points essentiels restent à préciser, respectivement quantifier, c'est un premier pas en direction de la mise en place d'un réseau de sites d'escales pour les limicoles migrants, allant dans le sens des recommandations de la Station [5] et améliorant la responsabilité de notre pays pour la protection de ces oiseaux migrants peu connus du public mais indispensables au maintien de la biodiversité au niveau continental et intercontinental.

5 Bibliographie

- [1] CSD Ingénieurs, Station ornithologique suisse, Nos Oiseaux, Association Escales Limicoles et Agriculture, «Site d'escale pour les limicoles aux Quatre-Vingts (Yverdon-les-Bains). Inondation automne 2021,» Non publié, Cuarny et Yvonand, 2022.
- [2] CSD Ingénieurs, Station ornithologique suisse, Association Escales Limicoles et Agriculture, «Site d'escale pour les limicoles - Yverdon-les-Bains. Inondation Automne 2017,» Non publié, Yverdon-les-Bains, 2018.
- [3] CSD Ingénieurs, Station ornithologique suisse, Nos Oiseaux, Association Escales Limicoles et Agriculture, «Site d'escale pour les limicoles aux Quatre-Vingts (Yverdon-les-Bains). Inondation contrôlée du printemps 2019,» Non publié, Yverdon-les-Bains, 2019.
- [4] CSD Ingénieurs, Station ornithologique suisse, Nos Oiseaux, Association Escales Limicoles et Agriculture, «Site d'escale pour les limicoles aux Quatre-Vingts (Yverdon-les-Bains). Inondation automne 2020.,» Non publié, Yverdon-les-Bains, 2021.
- [5] Schmid H., Leuenberger M., Schifferli L. & S. Birrer (1992). Stationnement des limicoles faisant escale en Suisse. Station ornithologique suisse, Sempach.
- [6] Livezey, K. B., Fernández-Juricic, E. & D. T. Blumstein (2016). Database of Bird Flight Initiation Distances to Assist in Estimating Effects from Human Disturbance and Delineating Buffer Areas. *Journal of Fish and Wildlife Management* 7: 181–191.
- [7] R. Bienz, «Évolution d'un sol tourbeux travaillé soumis à une inondation saisonnière contrôlée,» (Non publié) École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, 2018.
- [8] ECOTEC Environnement SA, «Rapport de suivi - Suivi pédologique d'une inondation saisonnière contrôlée sur un sol tourbeux travaillé - Projet Escales Limicoles et Agriculture,» Non publié, Genève, 2020.
- [9] Atlas géologique de la Suisse: Yverdon-les-Bains (CN 1203), 2009.
- [10] AFES, Référentiel pédologique français 2008, Paris, Quae, 2009.
- [11] J.-M. Gobat et C. Guenat, Sols et paysages. Types de sols, fonctions et usages en Europe moyenne. Lausanne, 2019.
- [12] OFEV, «Stratégie Sol Suisse pour une gestion durable des sols,» Conseil fédéral suisse - Info Environnement, Berne, 2020.
- [13] Ö. Berglund et K. Berglund, «Influence of water table level and soil properties on emissions of greenhouse gases from cultivated peat soil,» *Soil Biology and Biochemistry*, vol. V, n°143, pp. 923-931, 2011.
- [14] B. Kløve, T. Sveistrup et A. Hauge, «Leaching of nutrients and emission of greenhouse gases from peatland cultivation at Bodin, Northern Norway,» *Geoderma*, vol. III, n°1154, pp. 219-232, 2010.
- [15] Communiqué du Conseil Fédéral. Berne, 29.03.2023 - Préserver le carbone organique dans les sols pour limiter les émissions de CO₂. et conserver la qualité des sols. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/sol/communiques.msg-id-94002.html>.
- [16] Rapport du Conseil fédéral donnant suite au postulat 19.3639 Bourgeois du 18 juin 2019. Séquestration du carbone par le sol <https://www.news.admin.ch/newsd/message/attachments/76408.pdf>.
- [17] G. T. Swindles, P. J. Morris, D. J. Mullan, R. J. Payne, T. P. Roland, M. J. Amesbury, M. Lamentowicz, T. E. Turner, A. Gallego-Sala, T. Sim, I. D. Barr, M. Blaauw, A. Blundell, F. M. Chambers, D. J. Charman, A. Feurdean, J. M. Galloway, M. Galka, S. M. Green, K. Kajukalo, E. Karofeld, A. Korhola, L. Lamentowicz, P. Langdon, K. Marcisz, D. Mauquoy, Y. A. Mazei, M. M. McKeown, E. A. Mitchell, E. Novenko, G. Plunkett, H. M. Roe, K. Schoning, Ü. Sillaso, A. N. Tsyganov, M. van der Linden, M. Väliranta et B. Warner, «Widespread drying of European peatlands in recent centuries,» *nature geoscience*, vol. 12, pp. 922-928, 2019.
- [18] OFEV, «Portrait: 2015, année du sol marécageux,» Office fédéral de l'environnement, 20 mai 2015. [En ligne]. Available: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themen/thema-boden/boden--dossiers/portraet--im-jahr-des-moorbodens.html>. [Accès le 28 décembre 2018].
- [19] H. Baumgartner, «De la terre à la terre» *Magazine Environnement*, n°14, pp. 21-26, 2017.
- [20] L. Norberg, Ö. Berglund et K. Berglund, «Seasonal CO₂ emission under different cropping systems on Histo-sols in southern Sweden,» *Geoderma Regional*, vol. III, n°17, pp. 338-345, 2016.
- [21] E. Grand-Clement, K. Anderson, D. Smith, M. Angus, D. Luscombe, N. Gatis et R. Brazier, «New approaches to the restoration of shallow marginal peatlands,» *Journal of Environmental Management*, n° 1161, pp. 417-430, 2015.
- [22] S. Kareksela, T. Haapalehto, R. Juutinen, R. Matilainen, T. Tahvanainen et J. Kotiaho, «Fighting carbon loss of degraded peatlands by jump-starting ecosystem functioning with ecological restoration,» *Science of the Total Environment*, n° 1537, pp. 268-276, 2015.
- [23] OFEV, «Sols suisses. État et évolution» OFEV - État de l'environnement n° 1721, Berne, 2017.

- [24] S. Pro Agricultura, « Ergebnisse BOVE ». [En ligne]. Disponible sur: <https://proagricultura.ch/projekte/laufende-projekte/ergebnisse-bove/>.
- [25] Y. Wen et al., «Raising the groundwater table in the non-growing season can reduce greenhouse gas emissions and maintain crop productivity in cultivated fen peats», J. Clean. Prod., vol. 262, p. 121179, 2020.
- [26] A. Gramlich, Y. Fabian, et K. Jacot, « Ökologischer Nassreis-Anbau auf vernässenden Ackerflächen in der Schweiz », Agridea, no 3804, 2021.
- [27] J. Leifeld, D. Vogel, et D. Bretscher, «Treibhausgasemissionen entwässerter Böden», Agroscope Sci., no 74, 2019.
- [28] ProfitCost Gemüse, Vollkosten und Deckungsbeiträge für den Anbau von Gemüse. Ausgabe 2018. Arbeitsgruppe Betriebswirtschaft VSGP (208 S.)

6 Annexes

Annexe A Tableau des indemnités et comptabilités entre agriculture et sites limicoles

Tableau des indemnités et compatibilités entre agriculture et sites limicoles

	Type de culture	Indemnité CHF/are		semis	récolte	Période de culture favorable	Compatible avec inondation		Remarques
		PER,	(IPS)				printemps	automne	
Céréales	céréales d'automne	53.-	54.-	fin septembre-novembre	juillet-août		✗	!	2
	céréales de printemps	52.-	53.-	fin février	juillet-août		✗	✓	
Graines oléagineuses	Colza	44.-	44.-	fin août	fin juin-juillet		✗	✗	1
	Tournesol	32.-		fin mars	octobre		✗	✗	période de végétation longue pour arriver à maturité
	Soja	18.-		début mai	fin septembre		!	✗	1 retarder le semis ou écourter l'inondation
Plantes protéagineuses	Protéagineux d'automne (féverole, pois)	16.-		fin septembre	début août		✗	✗	
	Protéagineux de printemps			fin février	fin août		!	!	2 retarder le semis = risque de sécheresse à la floraison; max 15%
Maïs	Maïs grain	36.-		fin avril	octobre-novembre		✗	✗	2 somme des températures pour maturité
	Maïs ensilage	43.-		fin avril jusqu'en juin (2ème culture)	dès septembre		!	!	2
	Mais vert	18.-		fin avril-juin	dès août		✓	✓	
Plantes sarclées	Betteraves fouragères	80.-		fin mars	octobre-novembre		✗	✗	1
	Betteraves sucrières	57.-		fin mars	octobre-novembre		✗	✗	
	Pdt précoce			février-fin juillet	juin		✗	!	3
	pdt de consommation			avril	septembre-juin		✗	✗	
	Pdt industrie	144.-		avril	octobre		✗	✗	1
	Pdt plants			début avril	juillet		✗	✓	
Tabac	Tabac	473.-		mai	dès juillet - août (septembre selon variété)		!	2	évent. si inondation printemps écourtée; très sensible au tassement et à l'eau stagnante; production uniquement sous contrat
	Prairie intensive	42.-							
	Prairie moyennement intensive	32.-							
	Prairie peu intensive	19.-							
	Prairie extensive	9.-							
Cultures fouragères intercala	Fauche d'automne	10.-							
	Fauche de printemps	13.-							
Cultures maraîchères	Haricots-machines	48.-		mai-juillet	juillet-septembre		!	✓	seulement si bien séché, les légumineuses supportent mal le trop d'eau
	Pois à battre	48.-		début mars-mi mai	début juin-début août	avril-août	!	!	2 pas de surface dans le canton de Fribourg
									épinard se sème tout l'année. durée de culture: 6 - 8 semaines. sol doit pouvoir sécher avant le semis > probablement mieux l'inondation au printemps > laisser sécher et semis d'automne
	Epinards	53.-		mars-septembre	septembre-juin		!	!	
	Chou à choucroute	302.-		fin mai - début juin	début octobre-début novembre		✓	✗	1
	Asperge blanches et vertes	434.-		mi mars - mi avril	avril - juin		✗	✗	culture pluriannuelle > inondation exclue
	Betterave à salade	352.-		mi avril - mi juin	mi août-mi novembre		!	✗	1 pour les semis tards une inondation printaniers pourrait être possible
	Choux-fleur	403.-		mi février- mi juillet	mi mai - début novembre		✓	✓	est planté chaque semaine
	Brocolis	432.-		mi février- mi juillet	mi mai - début novembre		✓	✓	3 est planté chaque semaine
	Céleri pomme	380.-		mi mai - début juin	septembre - novembre		!	✗	
	Choux pommés	17.- -453		mars-début juin	mai-novembre		✗	!	2
	Chou de chine			mi mars-mi août	mi mai-début novembre		✓	✓	durée de culture 60-70 jours
	Poireaux			février-fin juillet	avril-décembre		✓	✓	3 durée de culture 100 à 150 jours
	Oignons d'hiver semé			mi août-mi septembre	mi juin-fin juillet		✗	✓	
	Oignons d'été semé	275.-		mars-mi avril	mi juillet-octobre		✗	!	2
	Carottes	192.-		mars à juin	juillet à novembre		!	!	
	Rhubarbe			printemps et automne	avril - juin		✗	✗	1 culture pluriannuelle > inondation exclue
	Salade			début mars-fin août	fin avril - début novembre		✓	✓	planté chaque semaine
	Courges			mai	mi août-début octobre		!	✗	1 évent. si inondation printemps écourtée
	Melone			début mai-mi juin	fin juillet-début septembre		!	✗	

Rendement élevé pris en considération

* Selon USP Agriexpert - dommage sangliers édition 2022
** Mélange Landsberger, mélange vesce-avoine, mélanges standards, colza fourrager, seigle fauché en vert etc.

impossible
possible, selon conditions
possible sans restriction