



Restauration écologique du ruisseau du Bénusse (FRDR11936)

Diagnose et propositions d'actions

Version définitive du 05 Octobre 2020



Résumé

Historiquement, ruisseau de tête de bassin abritant une faune aquatique riche est diversifiée, le Bénusse se trouve aujourd’hui dans une situation écologique très grave.

En effet, ses peuplements piscicoles et ses communautés macrobenthiques sont totalement déstructurés : les taxons les plus sensibles (lamproie de Planer, écrevisses pieds-blancs et plécoptères) ont disparu et les abondances relevées des espèces encore présentes sont systématiquement très inférieures à celles attendues en l’absence de perturbation.

Si la mauvaise qualité d’eau qui affecte le réseau explique l’absence des taxons les plus sensibles, les altérations morphologiques dont souffre systématiquement le ruisseau contribuent fortement à réduire les densités des espèces les plus tolérantes, comme la truite notamment.

En effet, sur l’ensemble de son linéaire, le cours d’eau est invariablement surélargi, déconnecté de ses berges et demeure homogène du point de vue de ses fonds, de ses vitesses d’écoulements ainsi que de ses profondeurs. A de nombreux endroits, il est même décalé de son thalweg naturel. Son attractivité pour la faune est donc largement déficitaire.

Le dépouillement des archives a révélé que ces altérations morphologiques étaient dues aux nombreuses modifications humaines subies par le ruisseau au cours du temps (rectifications, curages, dérivations de moulins, endiguements).

Par ailleurs, la faible énergie du ruisseau ($< 35\text{W/m}^2$) et son transport solide limité ne lui permettront pas de se restaurer lui-même.

Ainsi, un projet de restauration écologique ambitieux doit être entrepris sur l’ensemble du linéaire étudié pour espérer une recolonisation rapide et durable du Bénusse et de ses affluents par une faune et une flore, typiques et abondantes.

Pour ce faire, le secteur d’études a été découpé en 4 portions ayant fait l’objets d’avant-projets détaillés et chiffrés. La mise en œuvre de ce programme ambitieux de restauration morphologique est une des conditions *sine qua non*, pour que ce réseau hydrographique atteigne enfin le bon état écologique réglementaire. Cependant, les gains écologiques escomptés seront d’autant plus importants si la qualité de l’eau se voit améliorée en parallèle.

Mots clés :

Perturbations écologiques — Très faible intérêt physique – Curages – Reméandrement

Document réalisé par :

Jonathan Paris
Teleos sàrl
Les Rangiers 11e
CH-2883 Montmelon
paris@teleos.info

Avec la participation de :

Guy Périat, Hervé Décourcière, François Degiorgi
Daniel Schlunke (RAF design sàrl)

Page de garde :

Le ruisseau du Bénusse (crédit photo : Florian Ott)



Sommaire

Résumé	1	
1	Problématique	5
	1.1 Contexte géographique et géologique	5
	1.2 Contexte réglementaire	8
	1.3 Objectifs de l’étude	9
2	Etat ancestral le plus probable	10
	2.1 Définition réglementaire du bon état écologique	10
	2.2 Conditions hydromorphologiques attendues en l’absence de perturbation	11
	2.3 Peuplement piscicole attendu en l’absence de perturbation	13
	2.4 Communautés macrobenthiques attendues en l’absence de perturbation	14
3	Etat de conservation observé	15
	3.1 Des peuplements piscicoles	15
	3.2 Des communautés macrobenthiques	17
4	Causes de perturbations les plus probables	19
	4.1 Des températures estivales conformes	19
	4.2 Une qualité d’eau déficitaire	20
	4.3 Des perturbations hydromorphologiques marquées	22
5	Origine des dysfonctionnements physiques constatés	27
	5.1 Création de plans d’eau	27
	5.2 Dérivation des cours d’eau pour les moulins	29
	5.3 Curages	30
	5.4 Rectifications	31
6	Conséquences actuelles	32
7	Bilan	35
8	Une restauration écologique nécessaire	36

	8.1	Objectifs de la restauration	36
	8.2	Principe de restauration	37
	8.3	Exemples de restauration similaires	39
9		Détails des aménagements	40
	9.1.1	Projet 1 : Source du Bénusse	45
	9.1.2	Projet 2 : Source de la Mignonne et moulin Bénusse	54
	9.1.3	Projet 3 : Partie médiane et boisée	64
	9.1.4	Projet 4 : moulin Ringard	74
10		Bibliographie	83

1 Problématique

1.1 Contexte géographique et géologique

Par leurs apports d’eau fraîche et la biodiversité qu’ils renferment, les affluents du Doubs moyen constituent de véritables bouffés d’oxygène pour cette rivière.

Parmi eux, le Bénusse qui prend sa source sur la commune de St-Vit à 230m d’altitude et qui conflue sur sa rive droite, au niveau de la commune de Routelle à 219m d’altitude, constitue l’un des principaux affluents du Doubs dans le département.

Ce ruisseau draine un bassin versant de 23 km² englobant une partie des communes de Saint-Vit, Pouilley-Français, Velesmes-Essarts et Dannemarie-sur-Crète.

Son socle géologique très majoritairement karstique (85% de formations calcaires ainsi que des alluvions récentes et des galets de grès pour le reste) est entrecoupé d’un réseau de failles provoquant des pertes ainsi que des circulations d’eau souterraines sur plusieurs kilomètres avant de resurgir dans la partie basale du bassin versant.

Ainsi, de nombreuses sources plus ou moins pérennes alimentent le ruisseau qui présente un écoulement permanent sur sa partie basale. (Figure 1).

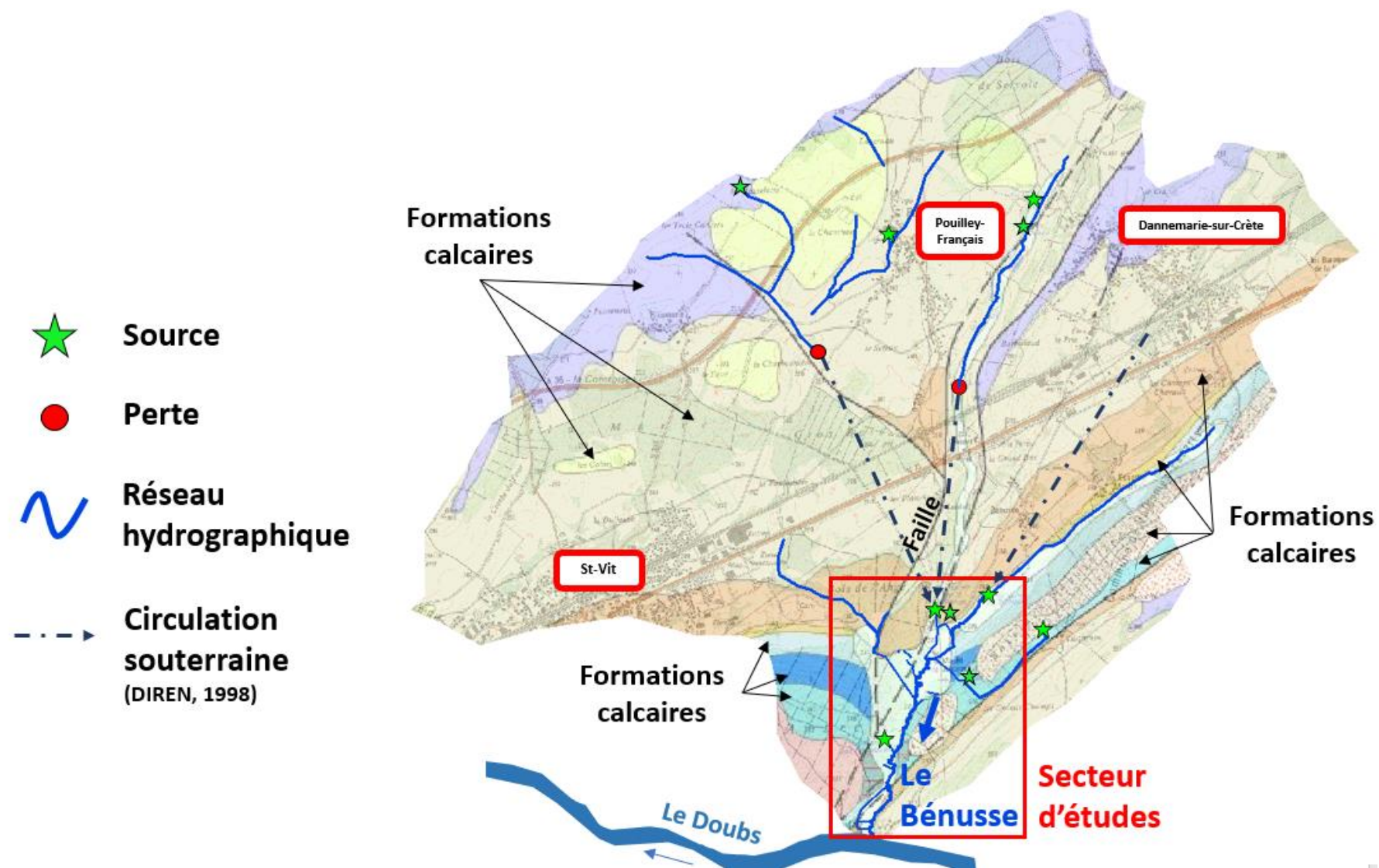


Figure 1 : Carte de localisation du bassin versant et du contexte géologique du Bénusse et position du secteur d'études

Le secteur couvert par la présente étude se concentre sur la partie basale du bassin versant (Figure 2), depuis la confluence avec le Doubs jusqu’aux deux principales résurgences dites de la Mignonne et de la fontaine de Bénusse (soit 2,6 km de ruisseau principal).

Dans sa partie médiane, le ruisseau traverse une forêt ; sur le reste du linéaire, il passe à travers des prairies et des pâtures et reçoit divers petits affluents plus ou moins temporaires.

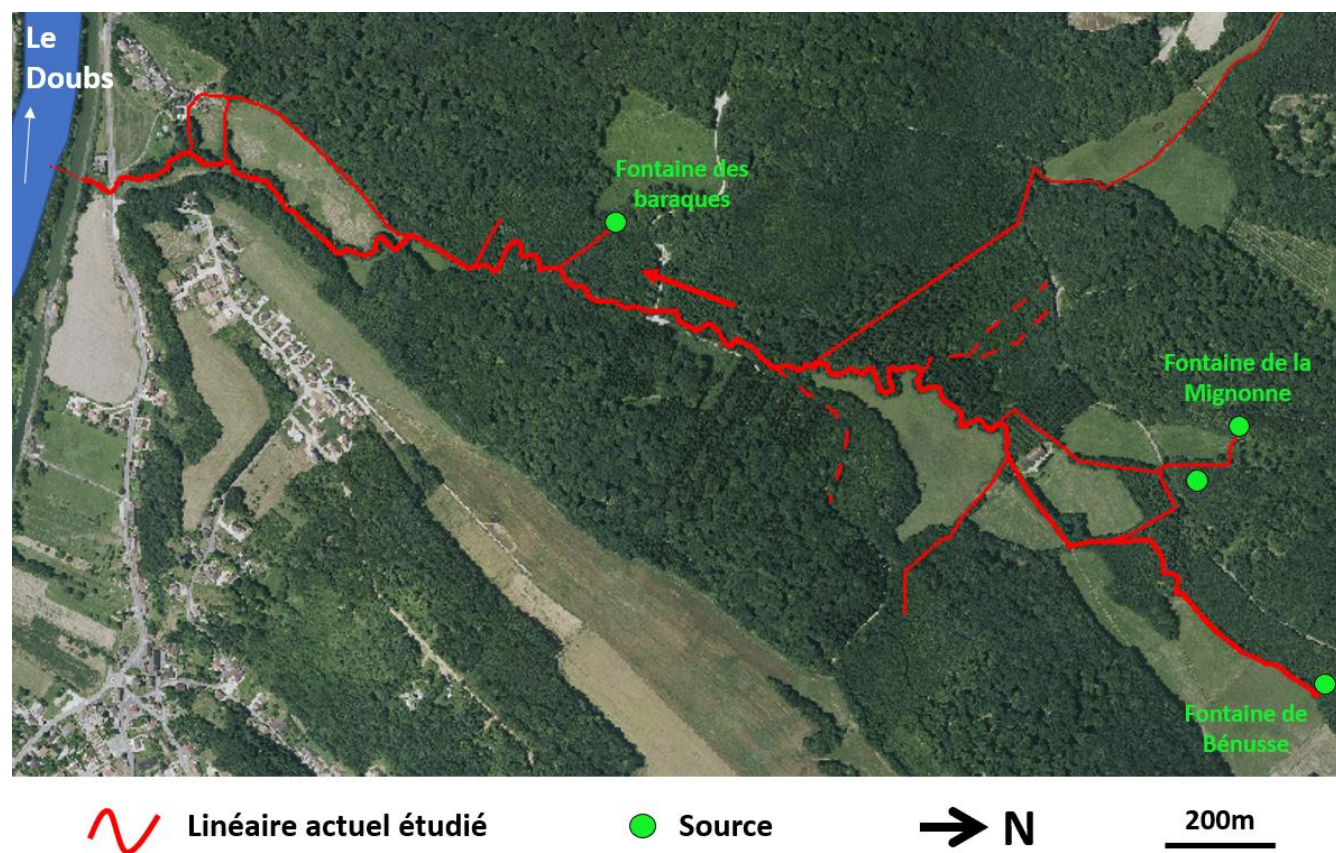


Figure 2 : Détails du secteur étudié

1.2 Contexte réglementaire

Dans le cadre du SDAGE 2016-2021 (Agende de l’Eau RMC, 2020), le Bénusse est identifié comme une masse d’eau (FRDR11936) dans un état écologique moyen depuis au moins 2016 ; au regard notamment de l’état de conservation de ses peuplements piscicoles (Figure 3). Il est également classé en liste 1 au titre de l'article L214-17 du Code de l'Environnement.

RUISSEAU DE BENUSSE A SAINT VIT	2018	2017	2016
Etat écologique	MOY	MOY	MOY
Poissons	MOY	MOY	MOY

Figure 3 : Etat écologique du du Bénusse depuis 2016 et paramètre déclassant (d’après Agence de l’Eau RMC, 2020)

Or, une étude de la fédération de pêche du Doubs, menée en 2008, a révélé diverses atteintes de qualité la qualité d’eau et de la qualité physique du réseau (Ott, 2008).

Ainsi, en respect de la Directive Cadre Européenne et de la Loi sur l’Eau, il est impératif d’agir pour que cet hydrosystème atteigne le bon état écologique d’ici 2021.

C’est pourquoi, en 2014, le contrat rivière « Vallées du Doubs et territoires associées » a fixé les objectifs suivants :

- Restauration de la continuité écologique sur le ruisseau de Bénusse (Fiche action n° I11-BEN-01)
- Opération de restauration physique sur la partie amont du linéaire du ruisseau de Bénusse (Fiche action n° I23-BEN-01)

Par conséquent, en 2016, La Fédération du Doubs pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique, en accord avec ses partenaires, Agence de l’Eau, Département du Doubs et EPTB, s’est portée maitre d’ouvrage pour réaliser ses actions et a confié à Teleos la mission de proposer des solutions techniques pour une restauration ambitieuse du Bénusse et de ses affluents.

1.3 Objectifs de l’étude

Chronologiquement, les objectifs qui ont été fixés par la Fédération de Pêche du Doubs étaient de :

- Déterminer l’état de conservation actuel et passé du réseau hydrographique.
- Circonscrire et hiérarchiser les éventuelles causes de perturbations.
- Proposer des solutions techniques écologiquement ambitieuses afin de restaurer ce cours d’eau.

2 Etat ancestral le plus probable

2.1 Définition réglementaire du bon état écologique

Selon l’arrêté du 27 juillet 2015 de l’article R. 212 du Code l’Environnement, le bon état écologique est respecté lorsque « *les valeurs des éléments de qualité biologique applicables au type de masse d'eau de surface montrent de faibles niveaux de distorsion résultant de l'activité humaine, mais ne s'écartent que légèrement de celles normalement associées à ce type de masse d'eau de surface dans des conditions non perturbées.* » (Figure 4)

	TRÈS BON ÉTAT	BON ÉTAT	ÉTAT MOYEN	ÉTAT MÉDIOCRE	ÉTAT MAUVAIS
DÉFINITION GÉNÉRALE	Les valeurs des éléments de qualité biologique pour la masse d'eau de surface correspondent à celles normalement associées à ce type dans des conditions non perturbées et n'indiquent pas ou très peu de distorsions. Il s'agit des conditions et communautés caractéristiques. Pas ou très peu d'altérations anthropogéniques des valeurs des éléments de qualité physico-chimique et hydromorphologique applicables au type de masse d'eau de surface par rapport aux valeurs normalement associées à ce type dans des conditions non perturbées.	Les valeurs des éléments de qualité biologique applicables au type de masse d'eau de surface montrent de faibles niveaux de distorsion résultant de l'activité humaine, mais ne s'écartent que légèrement de celles normalement associées à ce type de masse d'eau de surface dans des conditions non perturbées.	Les valeurs des éléments de qualité biologique applicables au type de masse d'eau de surface s'écartent modérément de celles normalement associées à ce type de masse d'eau de surface dans des conditions non perturbées. Les valeurs montrent des signes modérés de distorsion résultant de l'activité humaine et sont sensiblement plus perturbées que dans des conditions de bonne qualité.	Les eaux montrant des signes d'altérations importantes des valeurs des éléments de qualité biologique applicables au type de masse d'eau de surface et dans lesquelles les communautés biologiques pertinentes s'écartent sensiblement de celles normalement associées au type de masse d'eau de surface dans des conditions non perturbées sont classées comme médiocres.	Les eaux montrant des signes d'altérations graves des valeurs des éléments de qualité biologique applicables au type de masse d'eau de surface et dans lesquelles font défaut des parties importantes des communautés biologiques pertinentes, normalement associées au type de masse d'eau de surface dans des conditions non perturbées, sont classées comme mauvaises.

Figure 4 : Définition générale des classes d'état écologique des cours d'eau, plans d'eau, eaux de transition, eaux côtières en fonction des éléments de qualité (arrêté du 27 Juillet 2015)

Ainsi d’une manière générale, c’est la qualité biologique, soit la situation du cortège d’espèces typiques, qui définit l’état de conservation des milieux aquatiques. Pour déterminer si le ruisseau du Bénusse est en bon état écologique, il est donc préalablement indispensable de définir quelles conditions de vie devraient régner en l’absence de perturbation et quelles communautés caractéristiques seraient susceptibles de s’y développer.

2.2 Conditions hydromorphologiques attendues en l’absence de perturbation

D’après les principes d’hydromorphologie (Bravard & Petit, 1997; Lefort, 2018; Malavoi & Bravard, 2010), le Bénusse devrait être caractérisé par un chenal unique méandrant en équilibre dynamique autour de son thalweg.

La nappe alluviale serait en équilibre dynamique permanent avec le niveau du cours d’eau et serait, la plupart du temps, très proche de la surface du sol (< 30 cm).

Cette connexion des lits et de la nappe assurerait également la présence d’une forêt alluviale typique, saine et fonctionnelle qui ménage de nombreuses caches via l’encorbellement des berges créé par la végétation (Figure 5).



Figure 5 : Photographie d'un tronçon de cours d'eau forestier en parfait état de conservation comme il est attendu sur le secteur d'études

Au sein du lit mouillé, l’hétérogénéité des substrats, des profondeurs, et des vitesses d’écoulement devrait constituer une importante mosaïque d’habitats diversifiés assurant le développement d’une faune macrobenthique et piscicole riche et typique du bassin versant (Figure 6).

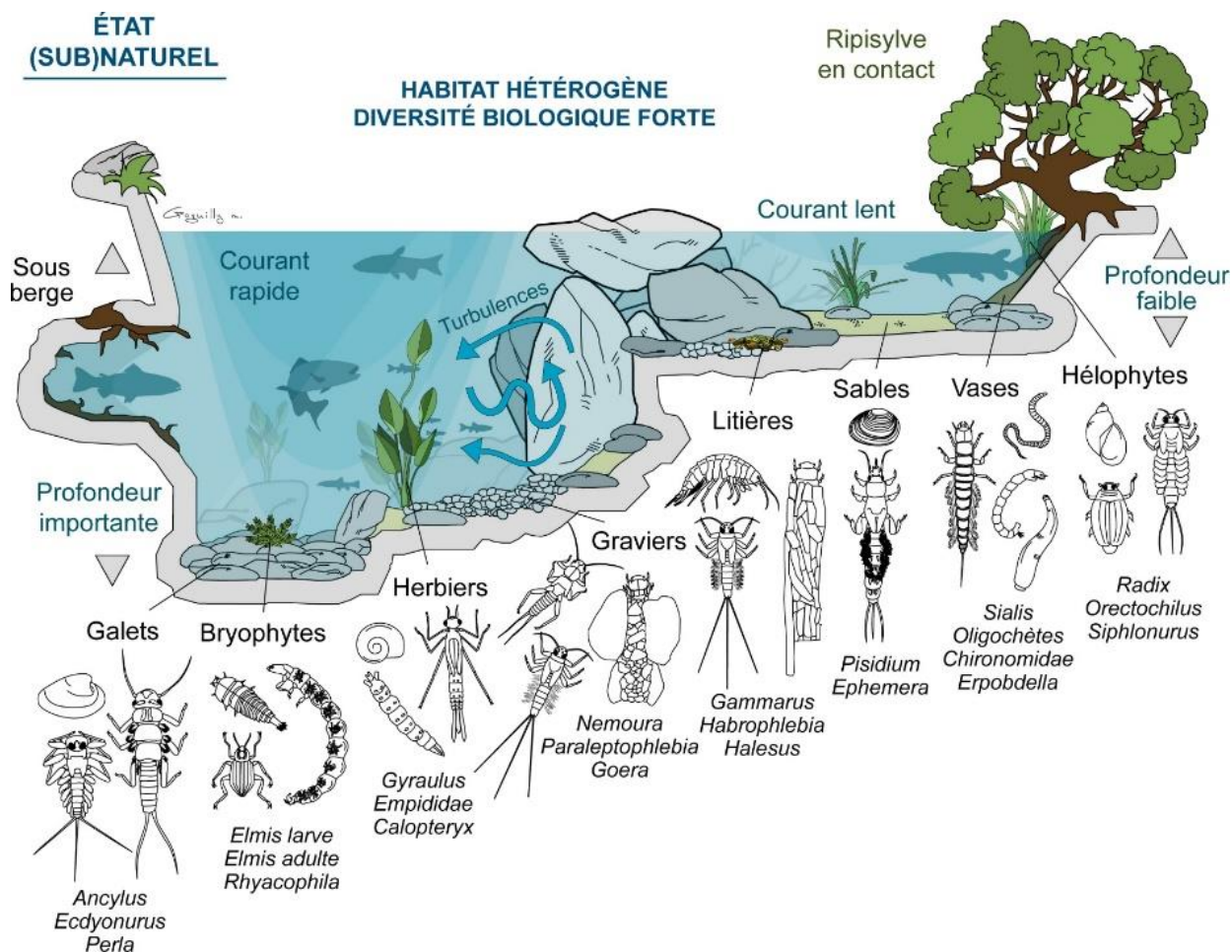


Figure 6 : Illustration en coupe de la situation originelle la plus probable du ruisseau du Bénusse.

2.3 Peuplement piscicole attendu en l’absence de perturbation

Etant donné la proximité des sources (< 3 km) et la faible taille du bassins versants (23 km²), le Bénusse devrait demeurer frais (<18°C) toute l’année et indemne de toute forme de pollution (très bon état chimique et absence de contaminants). Ses caractéristiques abiotiques l’apparenterait à un biocénotype B3-B4 selon la typologie de Verneaux (1973).

D’après les travaux de Degiorgi et Raymond (2001), la truite commune (*Salmo rhodanensis*) dominerait un peuplement piscicole composé également d’espèces typiques du bassin du Doubs telles que le chabot (*Cottus gobio*), la lamproie de Planer (*Lampetra planeri*), la loche franche (*Barbatula barbatula*) et le vairon (*Phoxinus phoxinus*) (Figure 7).

Les biomasses cumulées devraient atteindre en moyenne 300 à 400 kg/ha selon la proximité avec le Doubs.

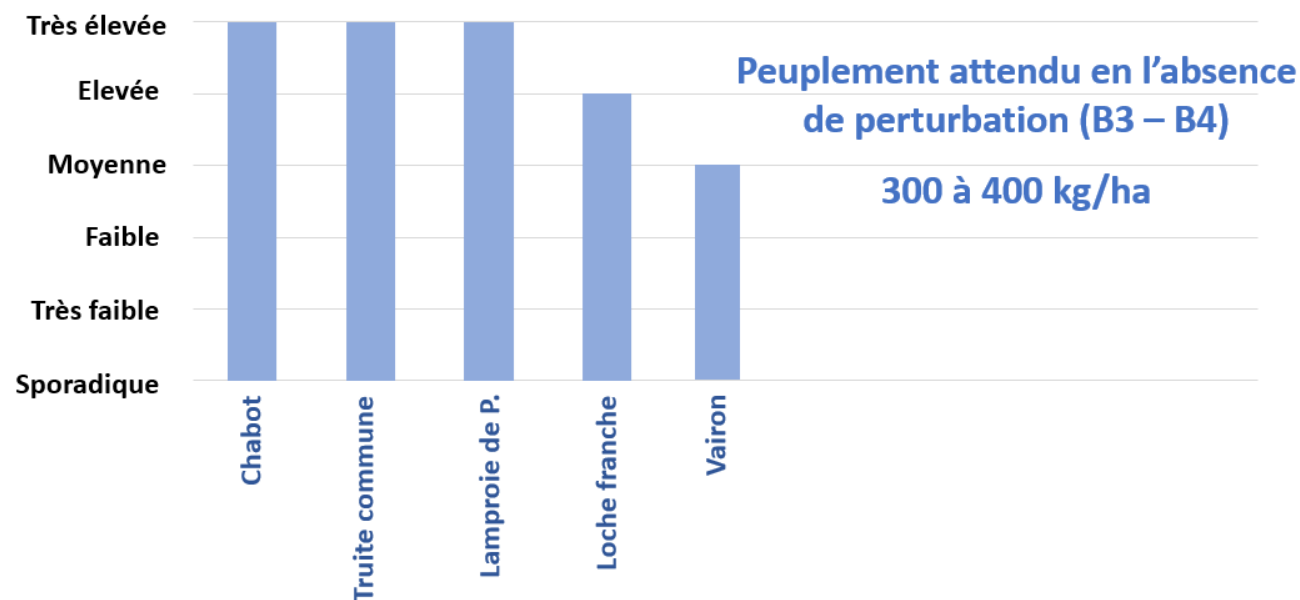


Figure 7 : Composition du peuplement type du ruisseau du Bénusse attendu en l’absence de perturbation

2.4 Communautés macrobenthiques attendues en l’absence de perturbation

Le macrobenthos, qui est composé de l’ensemble de la petite faune invertébrée colonisant le fond des cours d’eau, est un très bon indicateur de la qualité de l’eau.

En comparaison à d’autres cours d’eau préservés et de gabarits équivalents, la densité de macrobenthos devrait atteindre près de 20 000 individus/m² répartis au sein de près de 50 taxons, dont de nombreux genres polluosensibles (Figure 8).

A titre d’exemples, diverses stations référentielles à l’échelle régionale sur les bassins versants de la Loue, du Doubs et de l’Yonne comptent 30 à 50 genres cumulés de Plécoptères, Ephéméroptères et de Trichoptères (SIALIS, 2011; Teleos Suisse, 2010; Verneaux, 1973).

L’écrevisse pieds-blancs, qui historiquement colonisait l’ensemble des cours d’eau franc-comtois devrait également être présente en densité élevée sur l’essentiel du réseau.

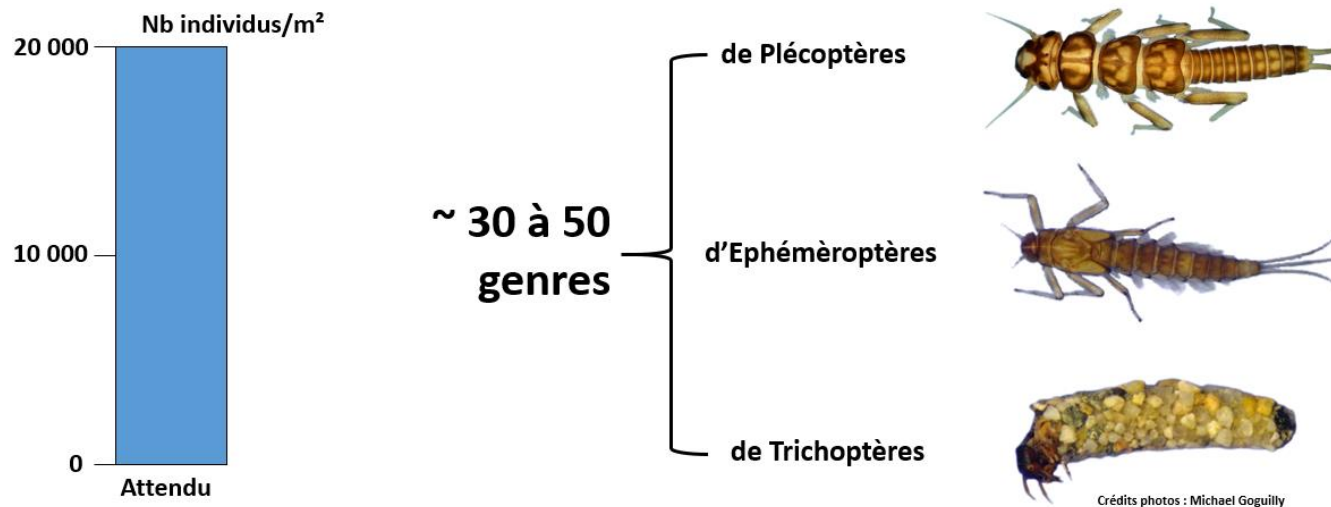


Figure 8 : Abondance globale du macrobenthos et nombre de genres de Trichoptères, Ephéméroptères, Plécoptères attendues en l’absence de perturbation sur ces ruisseaux (Sialis, 2011 ; Teleos Suisse 2010 ; Verneaux, 1973)

3 Etat de conservation observé

3.1 Des peuplements piscicoles

Les peuplements piscicoles du ruisseau sont totalement déstructurés, et ce, des sources jusqu’à la confluence.

Les espèces électives présentent des abondances systématiquement inférieures à celles attendues en l’absence de perturbation si bien que les biomasses cumulées d’espèces en place sont 6 à 10 fois en dessous du potentiel (Figure 9).

La lamproie de Planer n’a pas été retrouvée sur le secteur d’études depuis au moins l’année 2008 (Ott, 2008). La truite, quant à elle, n’est présente que de façon sporadique en tête du réseau.

La partie aval est colonisée par un grand nombre d’espèces atypiques normalement inféodées à des biotypes plus basaux. Ces individus sont issus du Doubs, dont la confluence est tout proche.

A noter également la présence ponctuelle d’une espèce introduite considérée comme invasive : le pseudorasbora (*Pseudorasbora parva*).

Abondance



Amont

45 kg/ha

Centre

68 kg/ha

Aval

31,5 kg/ha



Figure 9 : Etat de conservation des peuplements piscicoles du Bénusse en 2019 (Données Fédération de Pêche du Doubs)

3.2 Des communautés macrobenthiques

Durant l’été 2008, les communautés macrobenthiques ont été inventoriées selon le protocole MAG20 par la Fédération de Pêche du Doubs (Ott, 2008) sur de nombreuses stations du secteur d’études.

Les notes IBGN calculées à partir des listes faunistiques démontrent que la macrofaune benthique est dans un état de conservation catastrophique (Figure 10). Alors que la note attendue en l’absence de perturbation est de 20/20, les scores obtenus en 2008 variaient de 5 à 14.

Dans le détail, les taxons les plus sensibles comme les plécoptères et les écrevisses pieds-blancs n’ont pas été retrouvés sur le réseau. Les éphéméroptères et les trichoptères subsistent difficilement et ne sont représentés respectivement que par 2 et 10 genres.

Enfin les abondances relevées sont systématiquement très basses, 3 à 10 fois inférieures au potentiel local.

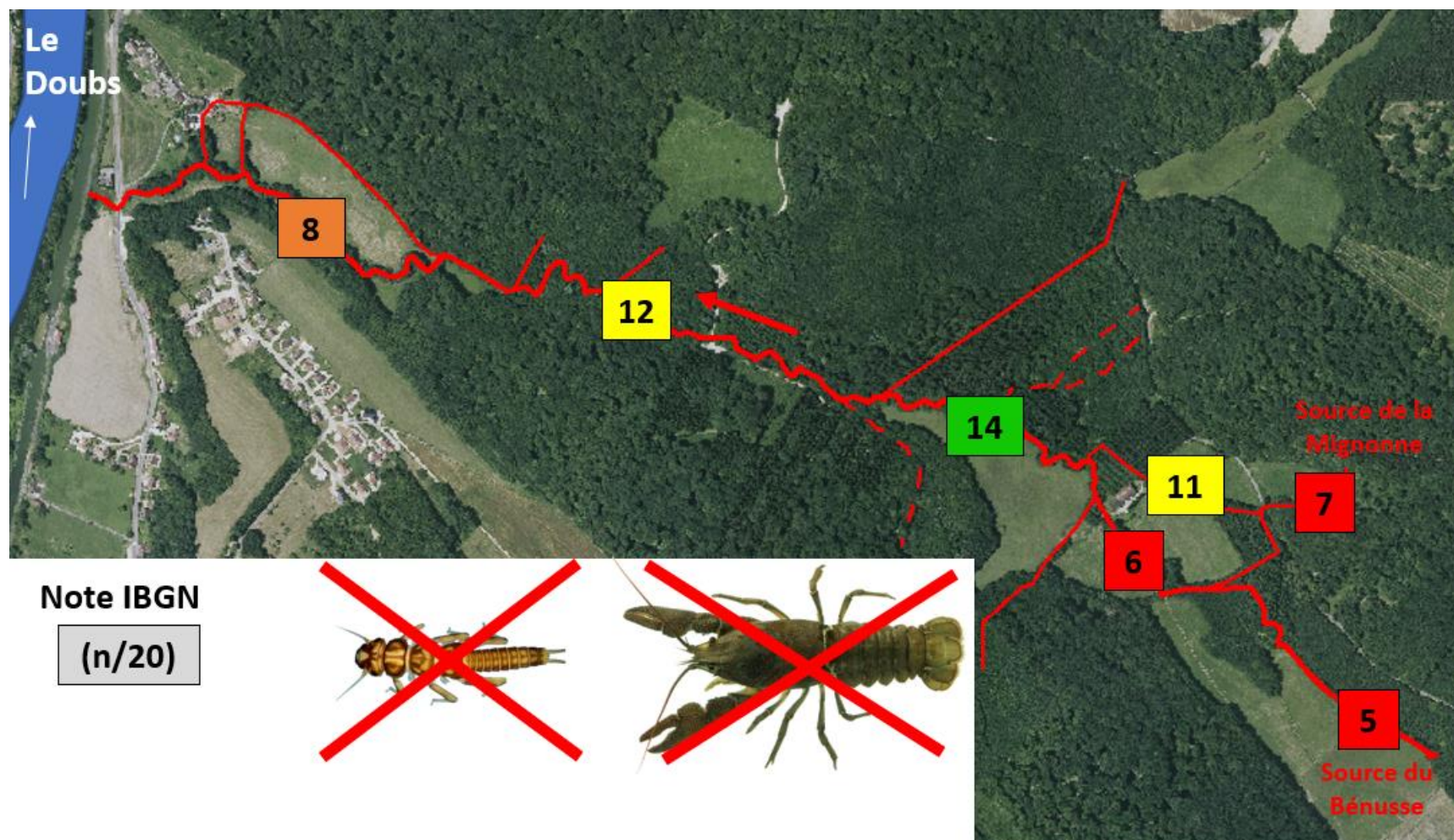


Figure 10 : Notes IBGN relevées sur les différentes stations d'inventaires macrobenthiques en 2008 par la fédération de pêche du Doubs (Ott, 2008)

4 Causes de perturbations les plus probables

4.1 Des températures estivales conformes

Le suivi thermique mis en place en 2019 sur la station d’inventaire piscicole centrale (Figure 11) montre que les températures mesurées durant l’été estival restent inférieures à 18°C.

Elles demeurent donc parfaitement compatibles avec le développement optimal de la truite commune et de ses espèces accompagnatrices (Elliott, 1976).

Ce paramètre n’explique pas donc pas les déficits observés au niveau des édifices biologiques.

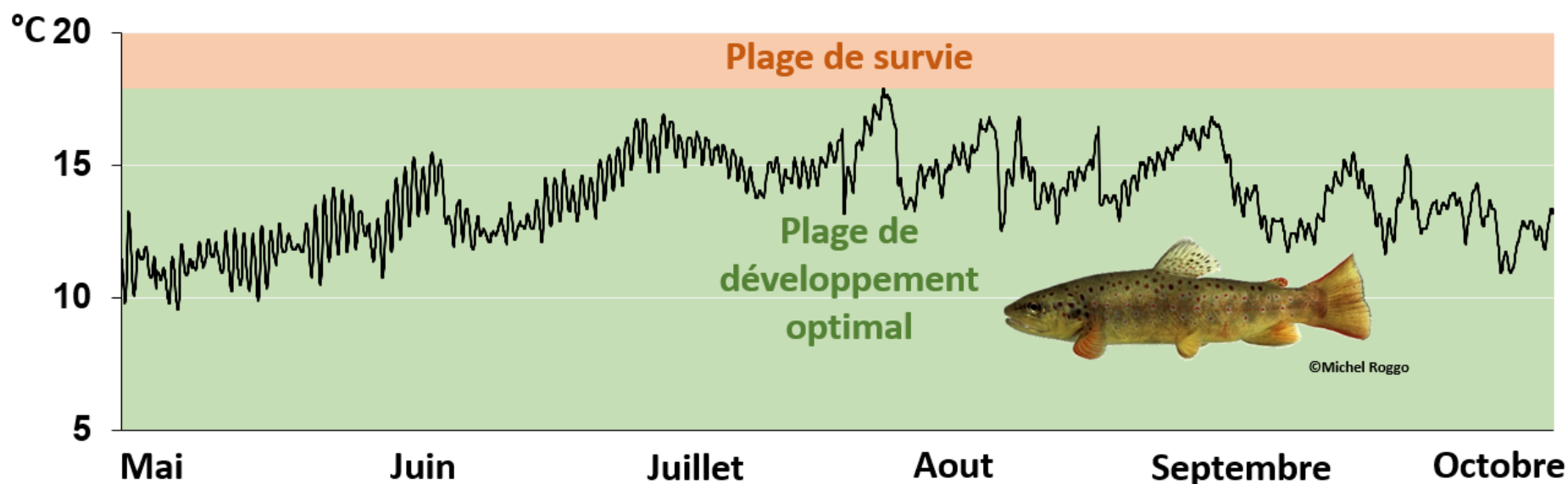


Figure 11 : Suivi thermique de Mai à Octobre 2019 sur la station d’inventaire piscicole centrale (Données Fédération de Pêche du Doubs) confrontée aux plages de survie et de développement optimal de la truite commune (Elliott, 1976)

4.2 Une qualité d’eau déficitaire

En 2008, une campagne d’analyses physico-chimiques a révélé une pollution importante par les composés phosphorés et azotés selon les normes en vigueur (Ministère de l’Environnement, 2016), et ce, des sources jusqu’à la confluence (Figure 12). En effet, les concentrations moyennes en nitrates sont de l’ordre de 20 mg/l soit 10 fois la valeur normale pour un tel ruisseau selon Nisbet and Verneaux (1970). Toujours selon ces mêmes auteurs, les concentrations en phosphates atteignent les seuils des cours d’eau nettement pollués.

Par ailleurs, des concentrations non négligeables en pesticides de synthèses (Lindane) et en métaux lourds (Arsenic, Cuivre, Nickel, Plomb) ont été mesurées dans les sédiments du cours d’eau (Ott, 2008). Or ces composés peuvent avoir des effets délétères pour toute forme de vie aquatique à des concentrations déjà infimes. De plus, lorsque comme ici, ces résidus se trouvent sous forme de cocktail, leurs propriétés biocides sont amplifiées.

Néanmoins, si cette mauvaise qualité d’eau éclaircit l’absence des taxons les plus sensibles comme les plécoptères, l’écrevisse pieds-blancs ou la lamproie de Planer, elle ne suffit pas à expliquer à elle-seule les déficits observés pour les autres espèces comme la truite ou le vairon.

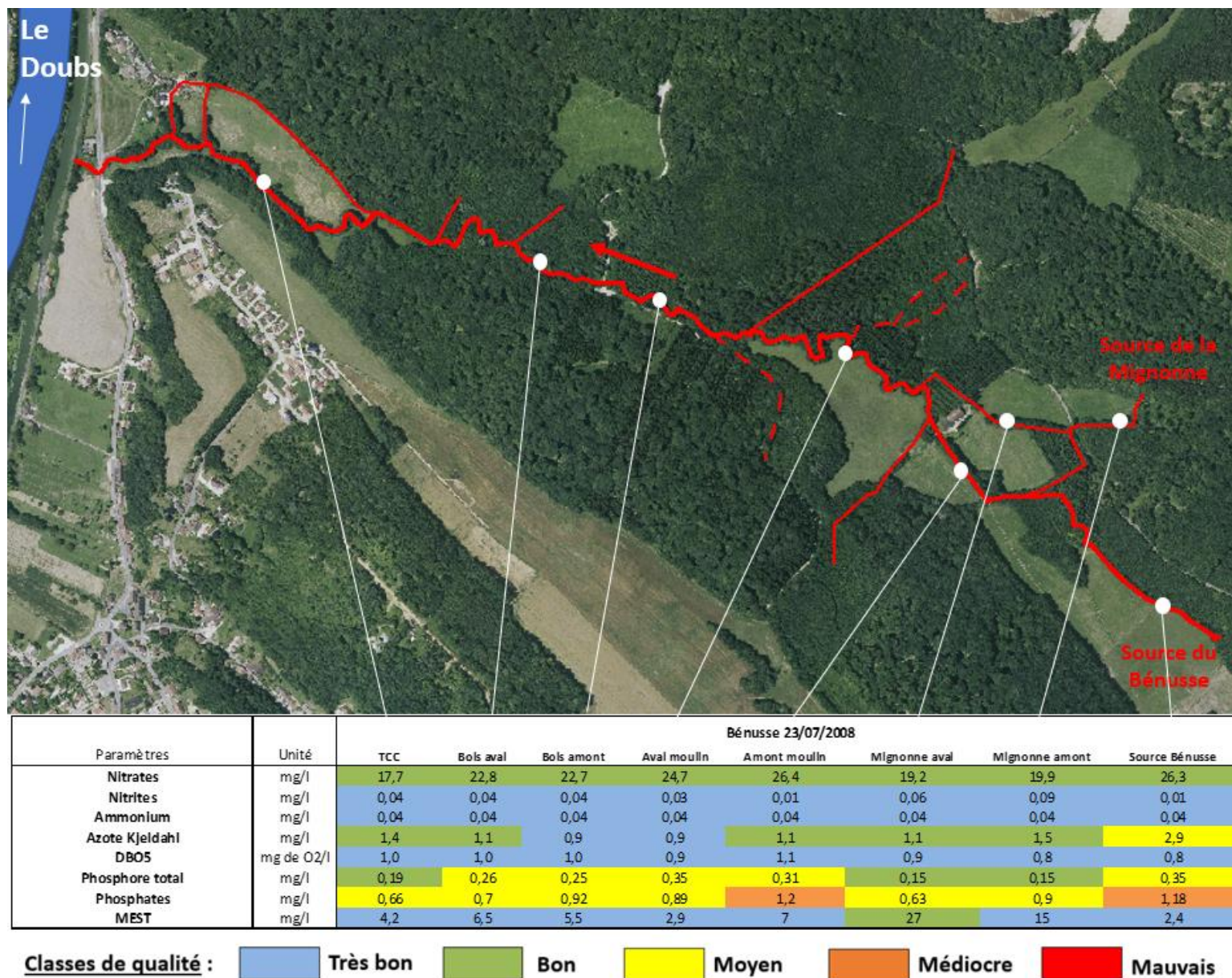


Figure 12 : Résultats des analyses physico-chimiques de 2008 confrontés aux classes de qualité de la norme en vigueur (Ministère de l'Environnement, 2016)

4.3 Des perturbations hydromorphologiques marquées

Le réseau hydrographique souffre d’importants dysfonctionnements hydromorphologiques.

Dans le détail, les berges, qui devraient être peu prononcées, sont systématiquement marquées et abruptes, dépassant systématiquement 1,0 m de hauteur (Figure 13).

Les réseaux racinaires des arbres de bordure sont donc régulièrement déconnectés du cours d’eau et ne ménagent que très rarement des caches pour la faune aquatique.

En outre, le lit mouillé est invariablement surélargi. Cet évasement provoque un étalement de la lame d’eau à l’étiage. Les vitesses de courant ainsi que les profondeurs demeurent alors faibles et homogènes.

Sur l’essentiel du linéaire, les fonds ne possèdent plus de granulométrie grossière intéressante. Les blocs sont absents et les galets/graviers sont quasi-systématiquement recouverts par une couche de particules fines, colmatant les anfractuosités indispensables au développement de la faune benthique et de petits poissons comme le chabot.



Hauteur de berges :
> 1,0 m



Largeur du lit mineur :
6 à 7 m



Attractivité :
Très faible

Figure 13 : Déconnexion des berges, surlargeurs des lits et attractivité très faibles symptomatiques de l'état actuel du réseau

En outre, plusieurs chutes jalonnent le réseau. Celles-ci interrompent la continuité écologique et génèrent des retenues d’eau en amont, transformant près de 1,2 km d’eau courantes en eaux stagnantes, soit 25% du linéaire étudié (Figure 14).

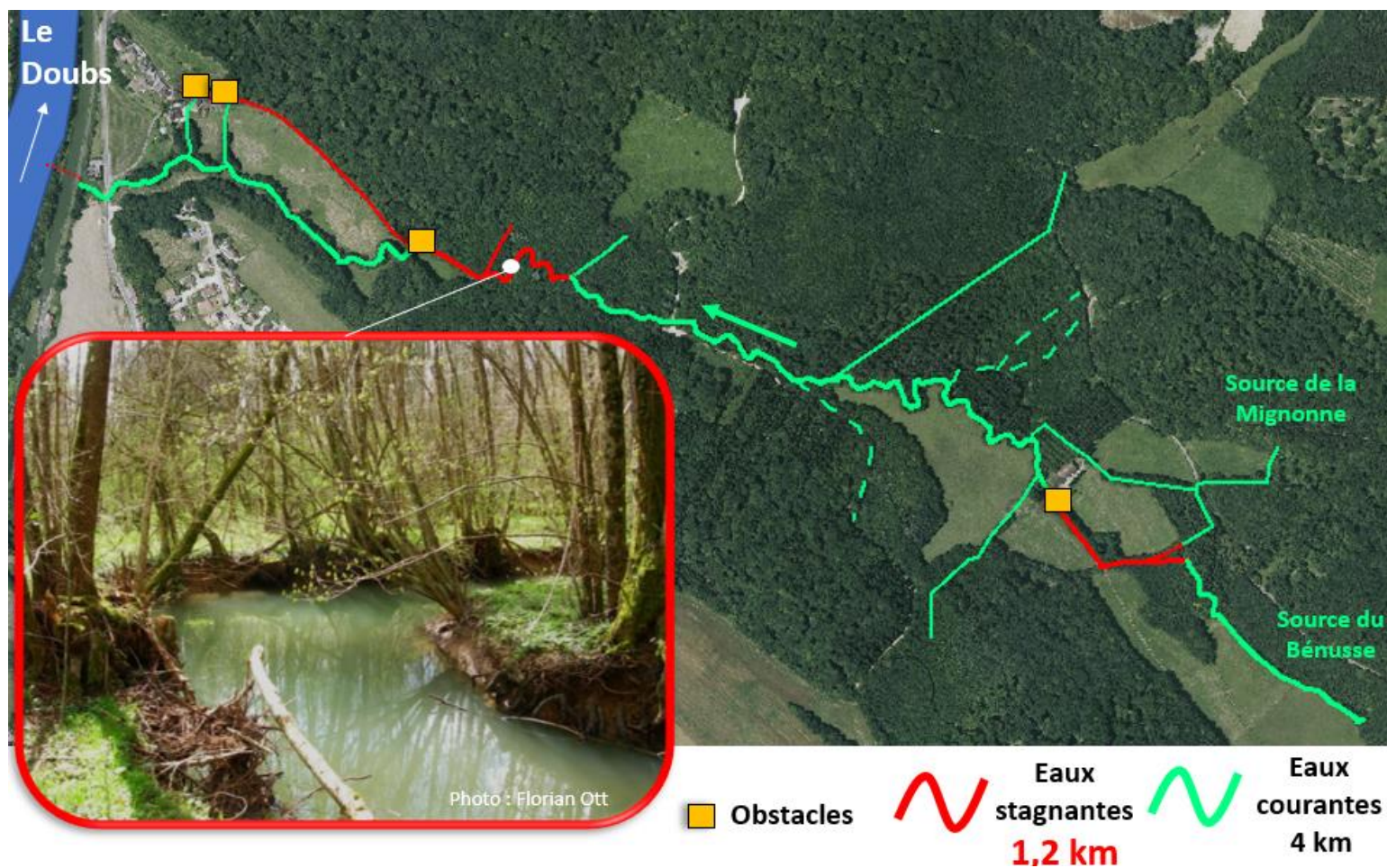
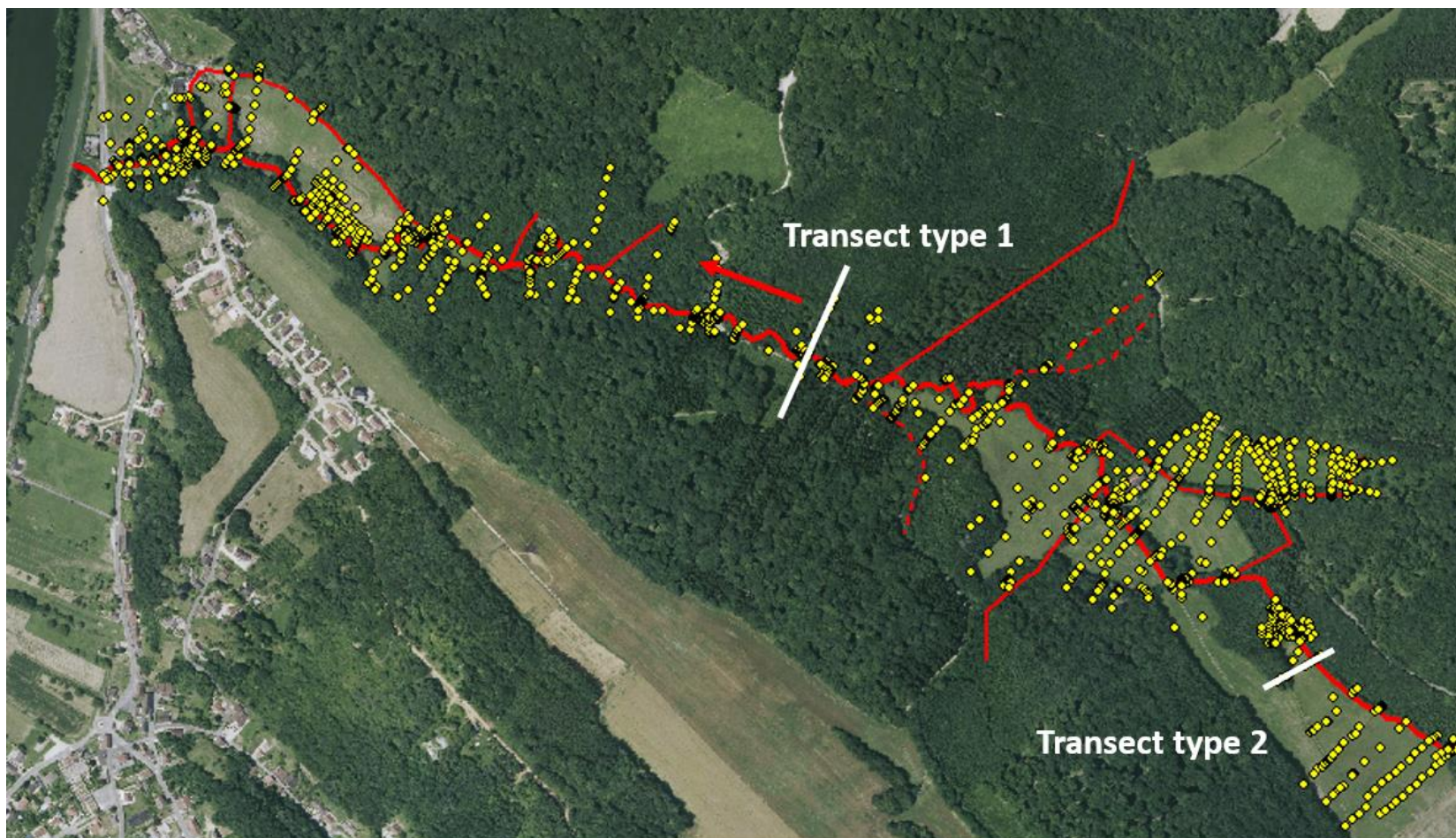


Figure 14 : Position des obstacles et linéaires d'eaux stagnantes générés

Par ailleurs, la topographie effectuée (Figure 15) met en évidence que sur de nombreux secteurs, le cours d’eau se trouve totalement perché sur le côté, bien loin de son thalweg naturel (Figure 16) et que le chenal n’est pas toujours unique.



● Point topographique

Figure 15 : Position des levés topographiques et de deux profils en travers types

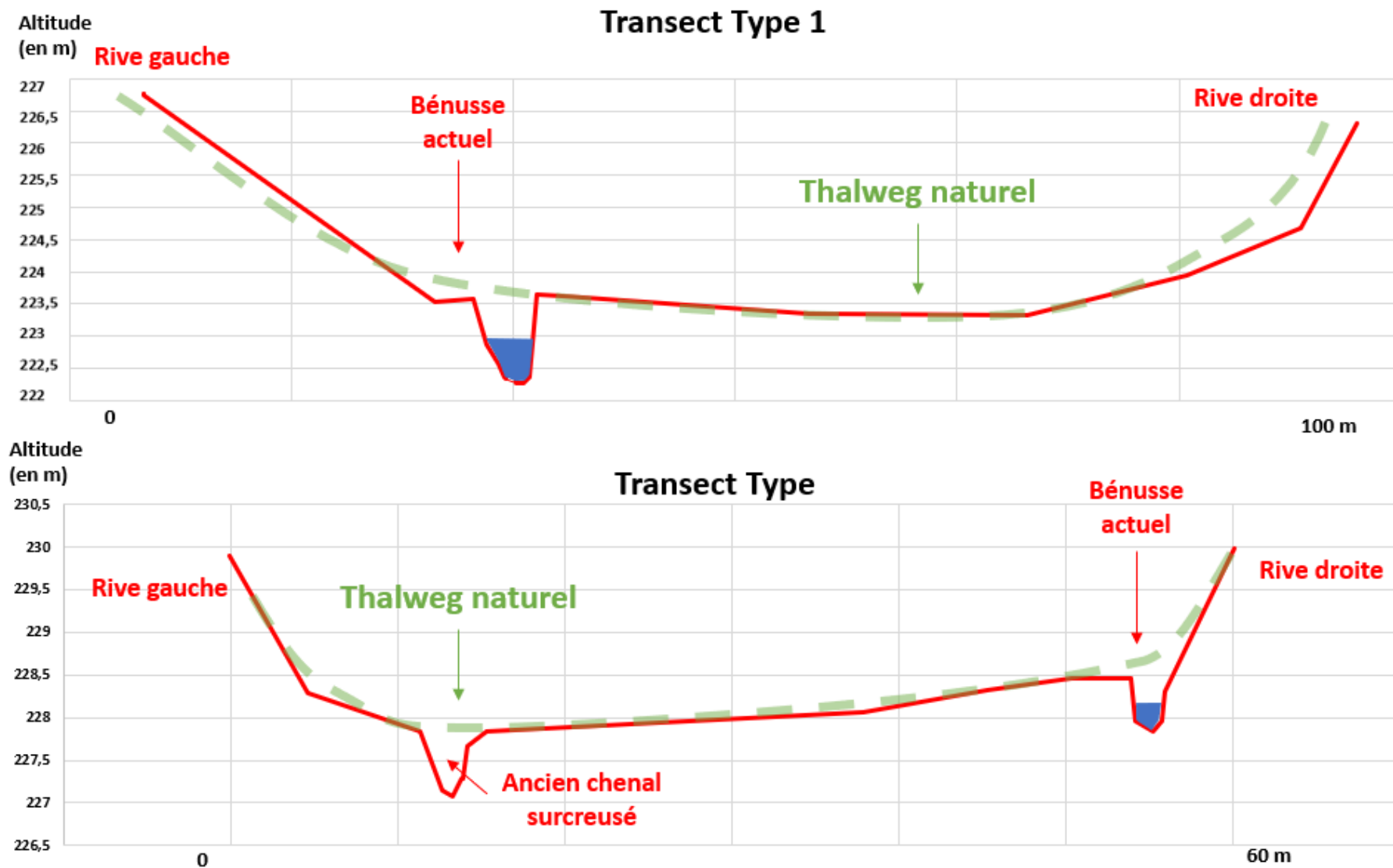


Figure 16 : Détails des deux profils en travers types

5 Origine des dysfonctionnements physiques constatés

Les dysfonctionnements morphologiques constatés aujourd’hui sont la conséquence de nombreuses et profondes modifications apportées par l’Homme au ruisseau de Bénusse au cours du temps.

5.1 Création de plans d’eau

La topographie a mis en évidence la présence de deux digues partiellement échancrées à l’aval (Figure 17) et à l’amont du ruisseau. La consultation du cadastre napoléonien montre qu’en amont de ces digues, les prés étaient respectivement nommés « Prés de l’Etang » et « Prés du Grand Etang » (Figure 18).

Comme aucune autre trace de l’édification de ces étangs n’a pu être retrouvée dans les archives consultées, il est fort probable que cette transformation des eaux courantes naturelles en eaux stagnantes remonte à une époque très lointaine.



Figure 17 : Photographie et contour de la digue présente en aval du ruisseau

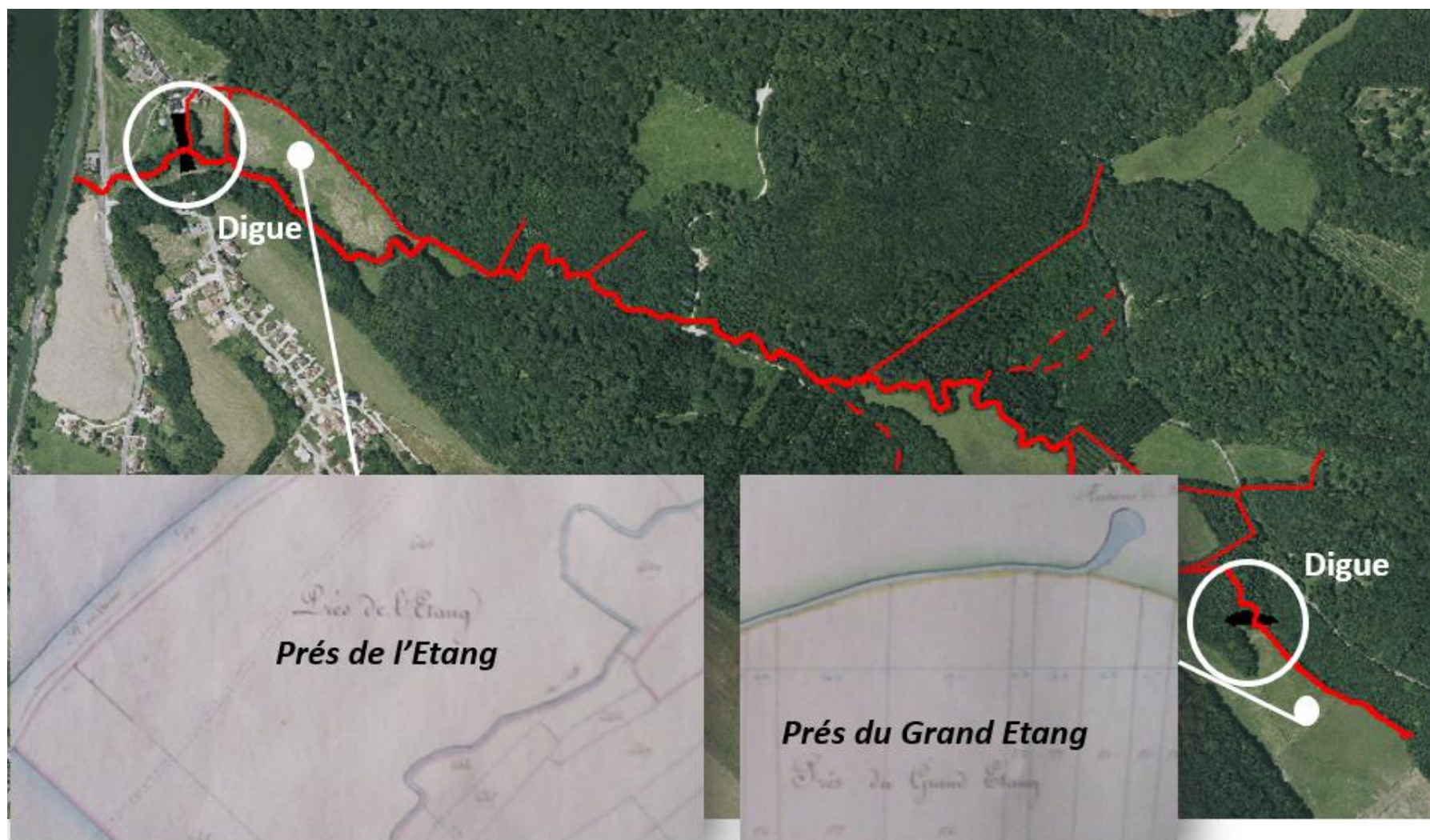


Figure 18 : Localisation des digues et dénomination des parcelles amont par le cadastre napoléonien

5.2 Dérivation des cours d’eau pour les moulins

Depuis au moins le XVIII^{ème} siècle, deux moulins sont implantés sur le secteur d’étude. Ainsi, les bras secondaires répertoriés sont en fait des canaux de dérivations qui ont été volontairement perchés pour augmenter la production d’énergie (Figure 19). De fait, divers seuils artificiels ont été érigés pour l’usage de ces moulins et constituent toujours à l’heure actuelle des chutes problématiques à la continuité écologique. Pour l’heure, les droits n’ont pas été retrouvés aux archives départementales du Doubs.

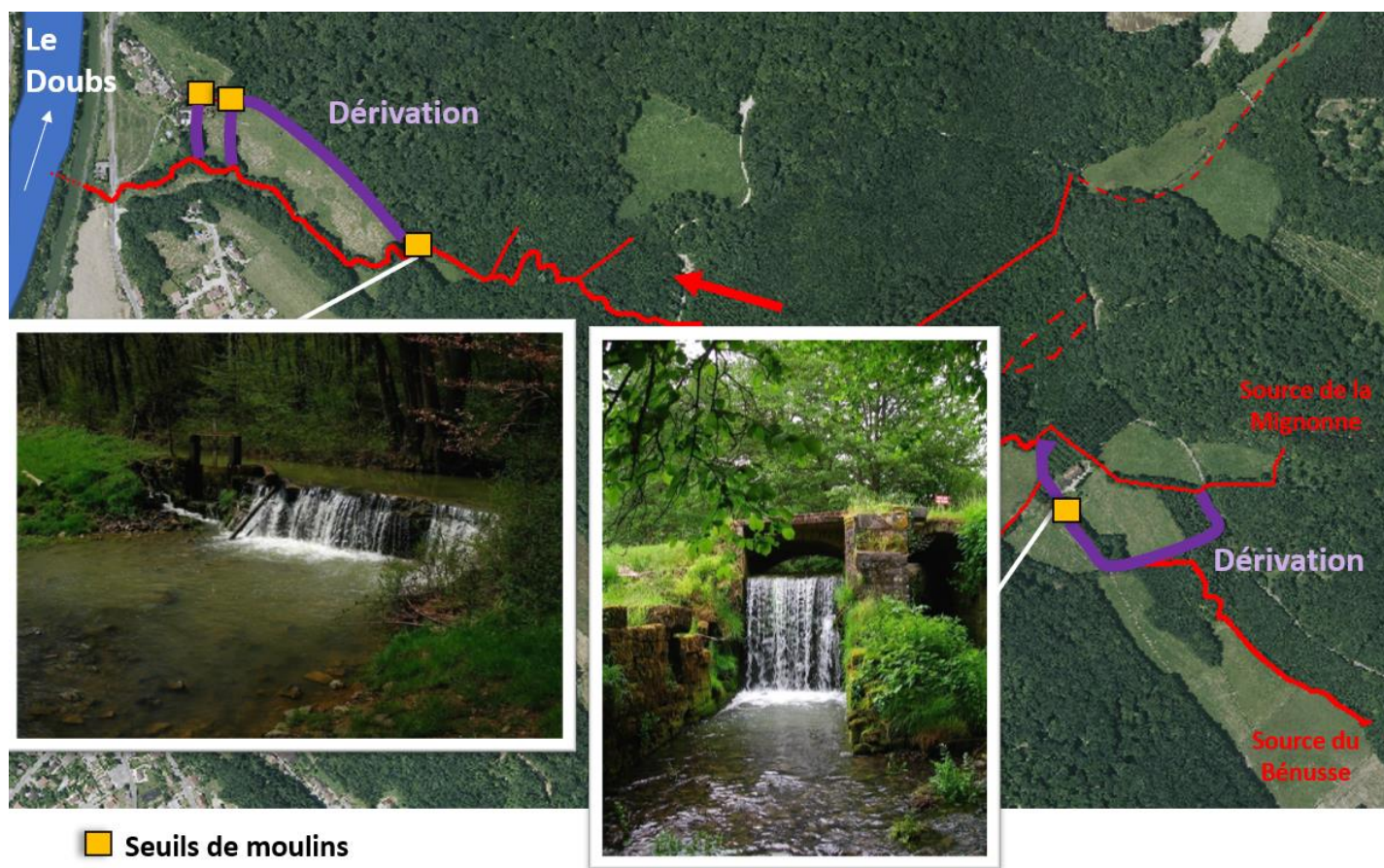


Figure 19 : Bilan des dérivations et des seuils artificiels sur le réseau

5.3 Curages

En 1863, le ruisseau a subi un curage généralisé sur la quasi-totalité de son linéaire. Sur plus de 1,2km, un gabarit systématiquement surcalibré et homogène a été imposé au cours d’eau dans le but d’augmenter la vitesse d’évacuation des crues (Figure 20).

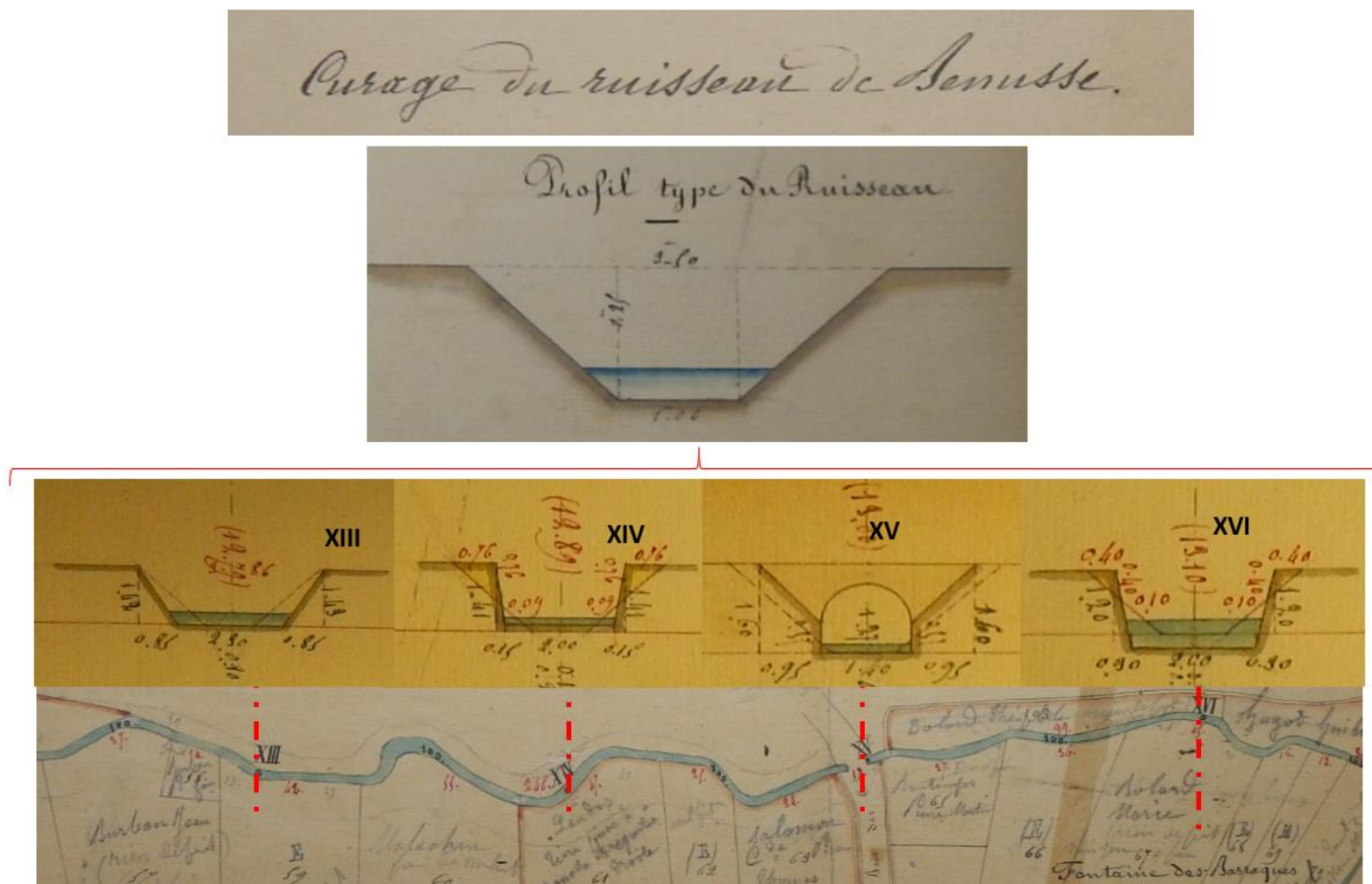


Figure 20 : Exemple de quelque profils types de curage appliqués sur le Bénusse en 1863.

5.4 Rectifications

Enfin, la superposition du cadastre napoléonien avec le tracé actuel met en évidence des changements importants dans le tracé en plan du Bénusse. En amont et en aval, des rectifications et des déviations ont été pratiquées depuis 1862 (Figure 21).

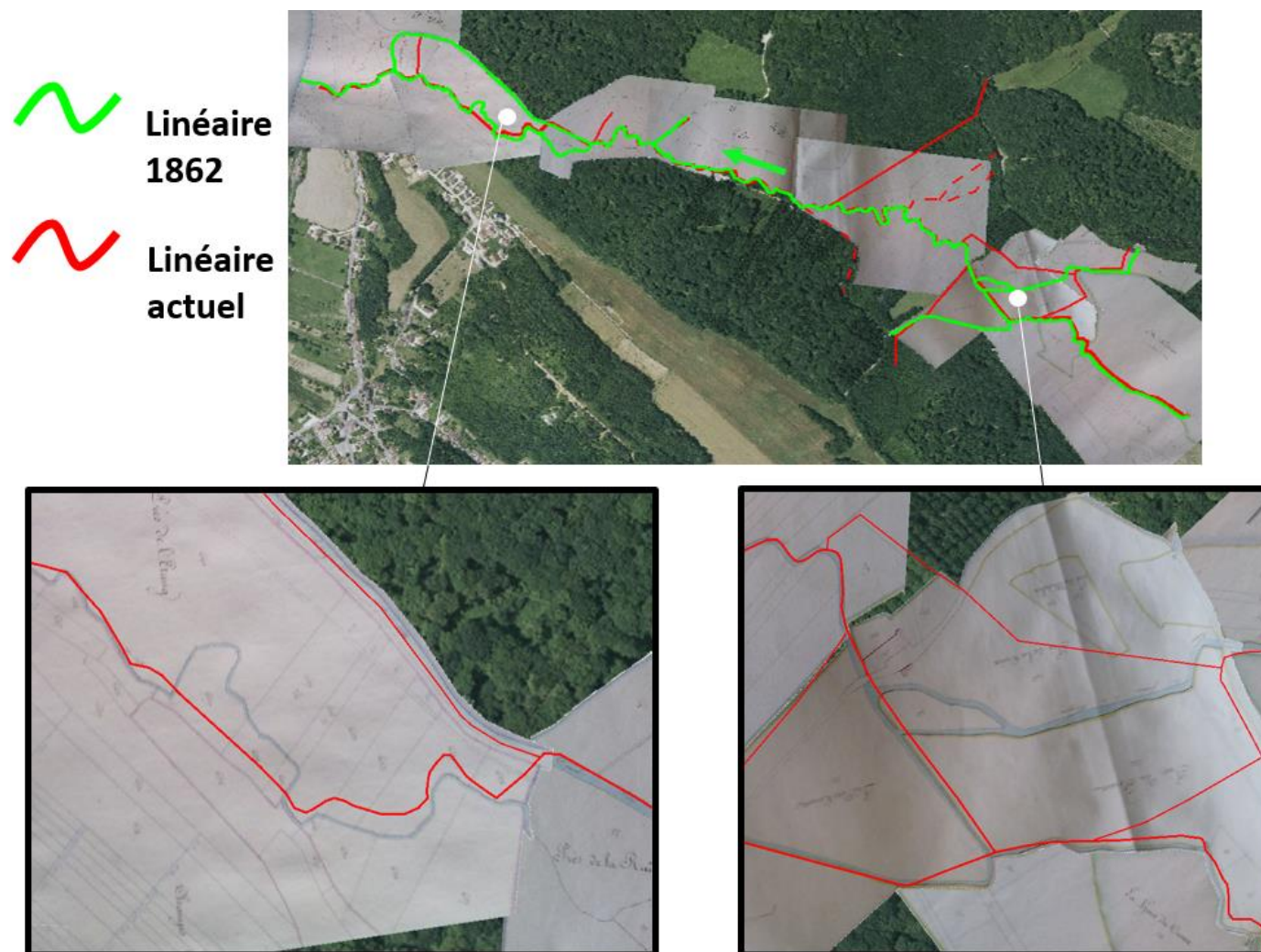


Figure 21 : Superposition des linéaires actuel et du tracé de 1862 du cadastre napoléonien.

6 Conséquences actuelles

Ces modifications historiques ont des conséquences encore très marquées actuellement. En plus de l’homogénéisation des conditions de vie pour la faune aquatique, les atteintes physiques ont altéré le fonctionnement alluvial naturel de la vallée.

En aval, dès la crue biennale des débordements se font vers le point bas de la vallée, depuis les canaux de sortie du moulin ainsi que depuis le canal d’amenée perché. De plus, en crue centennale, la digue génère un remous hydraulique en amont (Figure 22). Il est important de souligner que les débordements générés par une crue simultanée du Doubs à ce niveau n’ont pas été modélisés pour cette étude.

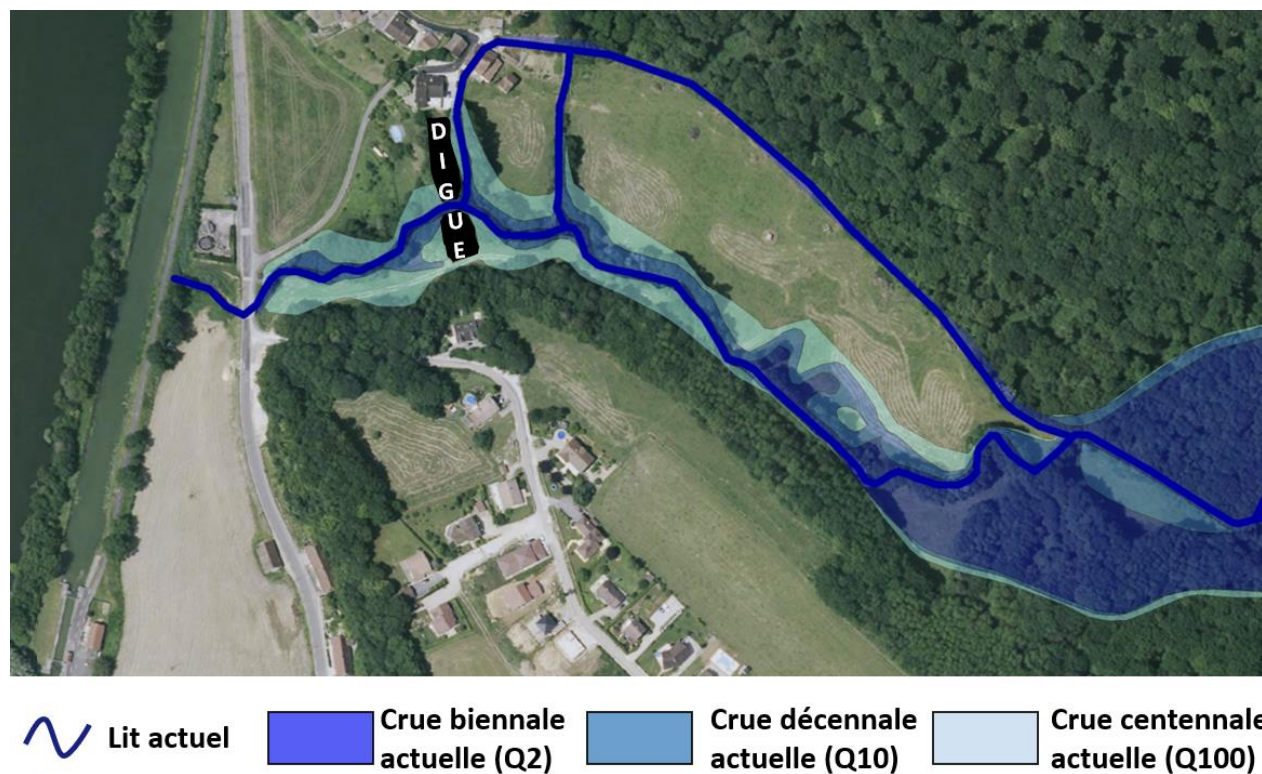


Figure 22 : Emprises actuelles des crues biennale, décennale et centennale sur la partie aval du secteur d’études

Dans la partie médiane, dès la crue biennale, les écoulements se font à la fois dans le lit perché contre le coteau et dans le fond de vallée central. La vallée étant large et peu pentu, l’emprise des crues est très étendue (Figure 23).

En amont de la forêt, le gabarit est tellement surélargi que le cours d’eau ne sort de son lit qu’à partir de la crue décennale.

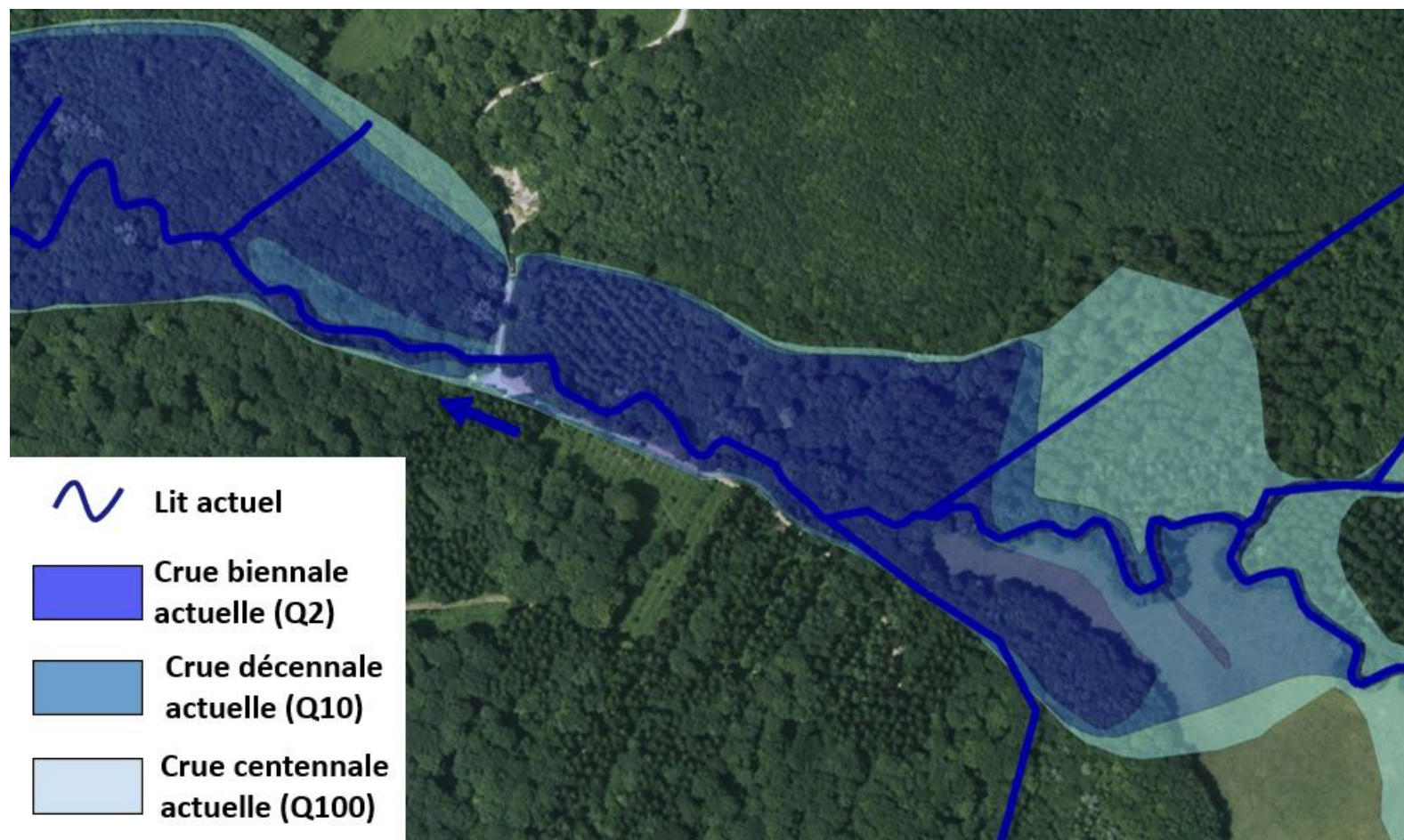


Figure 23 : Emprises des crues biennale, décennale et centennale sur la partie aval du secteur d'études

L’amont du bassin versant est marqué par un fonctionnement hydraulique complexe. Les crues passant à la fois dans les différents chenaux artificiellement perchés ainsi que dans le fond de vallée naturel (Figure 24).

A noter que le moulin Bénusse est actuellement en partie touché par la crue décennale par le bras rive droite et se voit totalement inondé en crue centennale.

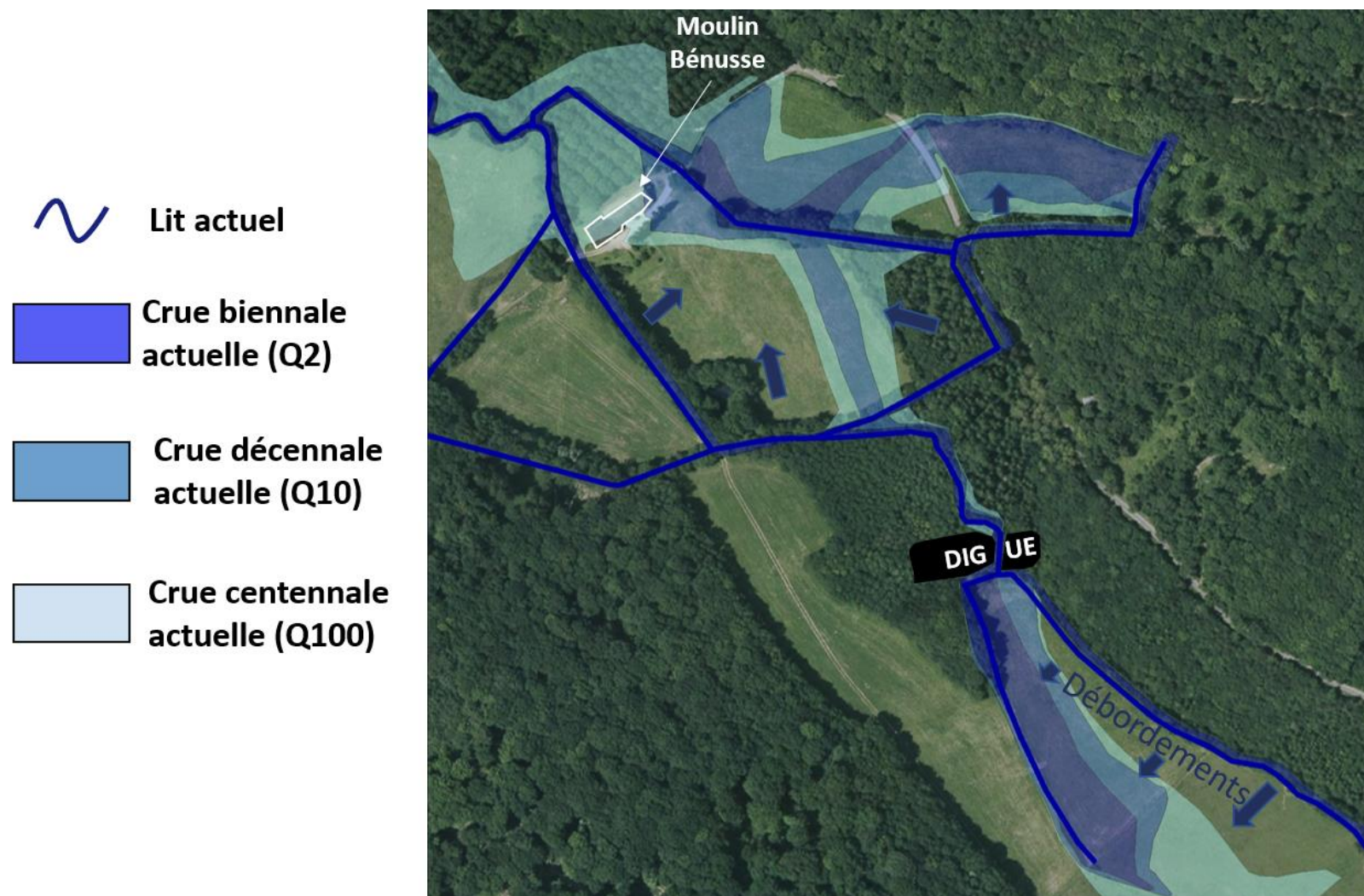


Figure 24 : Emprises des crues biennale, décennale et centennale sur la partie amont du secteur d'études

7 Bilan

Historiquement ressource en eau d’importance et réservoir biologique, le Bénusse connaît actuellement une situation écologique catastrophique.

En effet, les édifices biologiques qu’il abrite (poissons et macrobenthos) sont pauvres et totalement déséquilibrés. L’écrevisse pieds-blancs, la lamproie de Planer et l’ordre entier des Plécoptères n’ont pas été retrouvés dans les derniers inventaires et la truite commune n’est présente que de façon sporadique.

Les causes mises en évidence sont une qualité d’eau déficitaire et des altérations morphologiques marquées sanctionnant à la fois l’autoépuration et la capacité d’accueil du ruisseau, et ce, des sources jusqu’à la confluence.

Le dépouillement des archives et l’analyse des cartes anciennes révèlent que cette homogénéité des conditions de vie n’est pas naturelle. En construisant des digues, des moulins, des dérivations ainsi qu’en rectifiant et curant le ruisseau pour gagner des terres agricoles et/ou lutter contre les inondations, l’Homme a drastiquement simplifié les conditions de vie de cet hydrosystème.

Par ailleurs, même si ces actions ont été effectuées dans le passé, leurs effets se poursuivent encore (disparition de zones humides, dysfonctionnement alluvial, etc.).

Si rien n’est entrepris, la situation ne pourra pas s’améliorer car la faible énergie du cours d’eau (puissance spécifique $< 35\text{W/m}^2$) ne permet aucunement son réajustement naturel.

Ainsi, un projet ambitieux de restauration écologique se justifie pleinement pour enrayer les atteintes constatées et permettre à une faune typique et abondante de recoloniser ce chevelu hydrographique à pression foncière faible.

8 Une restauration écologique nécessaire

8.1 Objectifs de la restauration

Le lit mineur des cours d’eau doit être retravaillé de telle sorte qu’il retrouve un fonctionnement naturel ainsi qu’une diversité des écoulements, profondeurs et substrats maximale. Cette hétérogénéité des conditions de vie favorisera la quantité et la qualité des habitats aquatiques pour la faune présente (Figure 25).

En outre, pour améliorer la capacité d’autoépuration de la rivière et augmenter la capacité de stockage des champs d’expansion de crues ainsi que regagner des zones humides, les lits mineur et majeur de la rivière doivent être totalement reconnectés entre eux.

Enfin, la restauration écologique devra nécessairement entraîner une remontée de la nappe d’accompagnement qui augmentera le volume d’eau disponible sur le bassin versant et apportera un soutien précieux au débit de la rivière en période d’étiage.

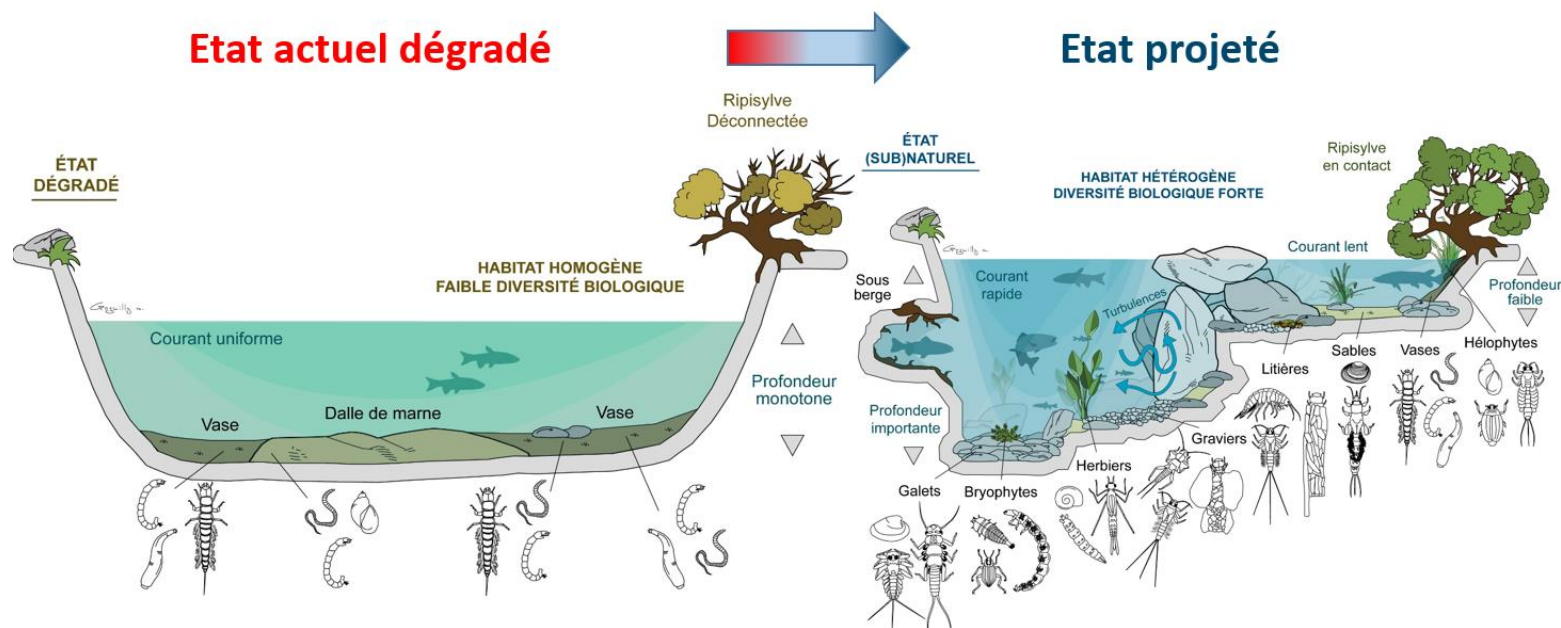


Figure 25 : Schémas présentant l'objectif écologique à atteindre après restauration

8.2 Principe de restauration

Pour retrouver à la fois des conditions de vie optimales pour la faune/flore aquatique et remonter la nappe d’accompagnement, un seul principe d’aménagement prévaut : le reméandrement des cours d’eau avec oblitération totale du chenal actuel, surélargi et rectiligne (Figure 26).

En effet, le lit projeté doit être resserré et sa cote de fond, autant que faire se peut, rehaussée, de telle sorte que la dissipation latérale de l’énergie des crues ainsi que l’altitude originelle de la nappe soient à nouveau cohérentes. L’envolement historique des sols sera de ce fait reconstitué.

Ce principe d’aménagement consiste à redonner au cours d’eau la faculté de recréer par lui-même, crue après crue, des habitats d’eau courante fonctionnels et dynamiques et de maintenir la nappe à une altitude proche du terrain naturel. Pour que cet auto-ajustement progressif du cours d’eau fonctionne il est indispensable que l’ensemble de la plaine alluviale historique soit remis à la disposition du cours d’eau, afin que l’énergie des crues se dissipe latéralement et que le lit d’étiage se déploie d’une manière sinueuse et connective.

Cette technique garantit, en outre et selon notre expérience, le meilleur rapport gain écologique / coût d’intervention.

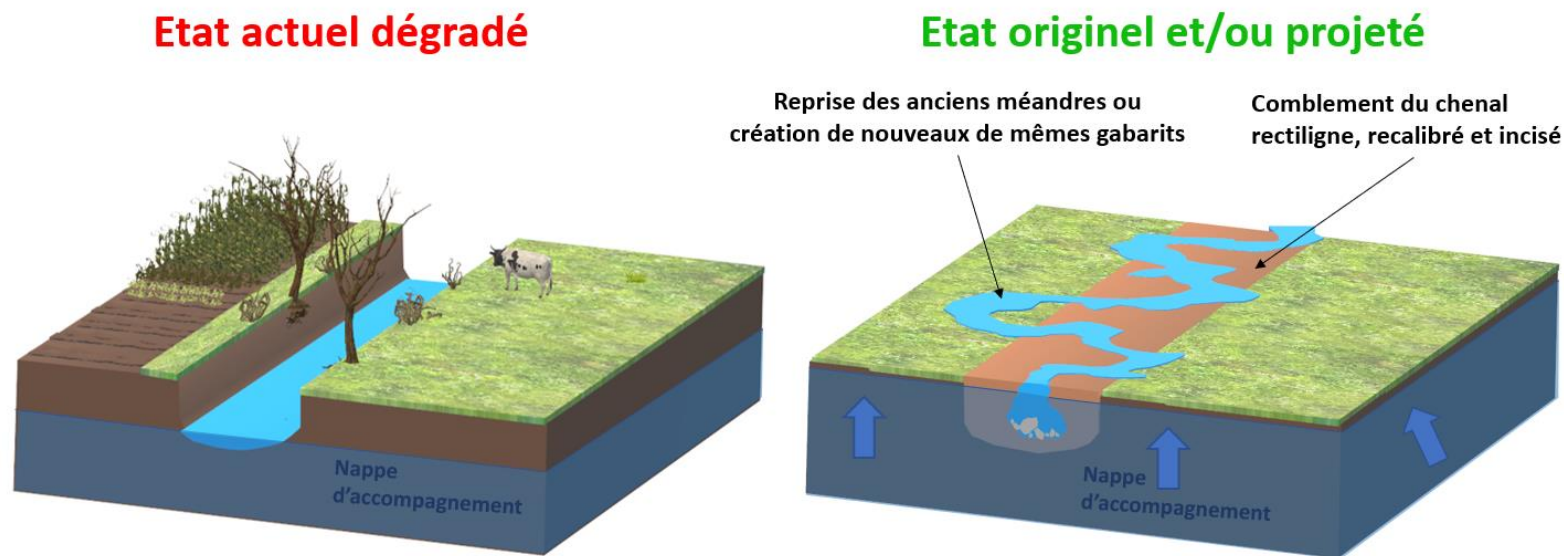


Figure 26 : Schéma du principe de restauration à réaliser.

De plus, le reprofilage du fond de vallée et la remontée de la nappe assureront à termes la recolonisation progressive et naturelle d’une végétation alluviale dynamique et d’une faune typique de corridors fluviaux (Figure 27).

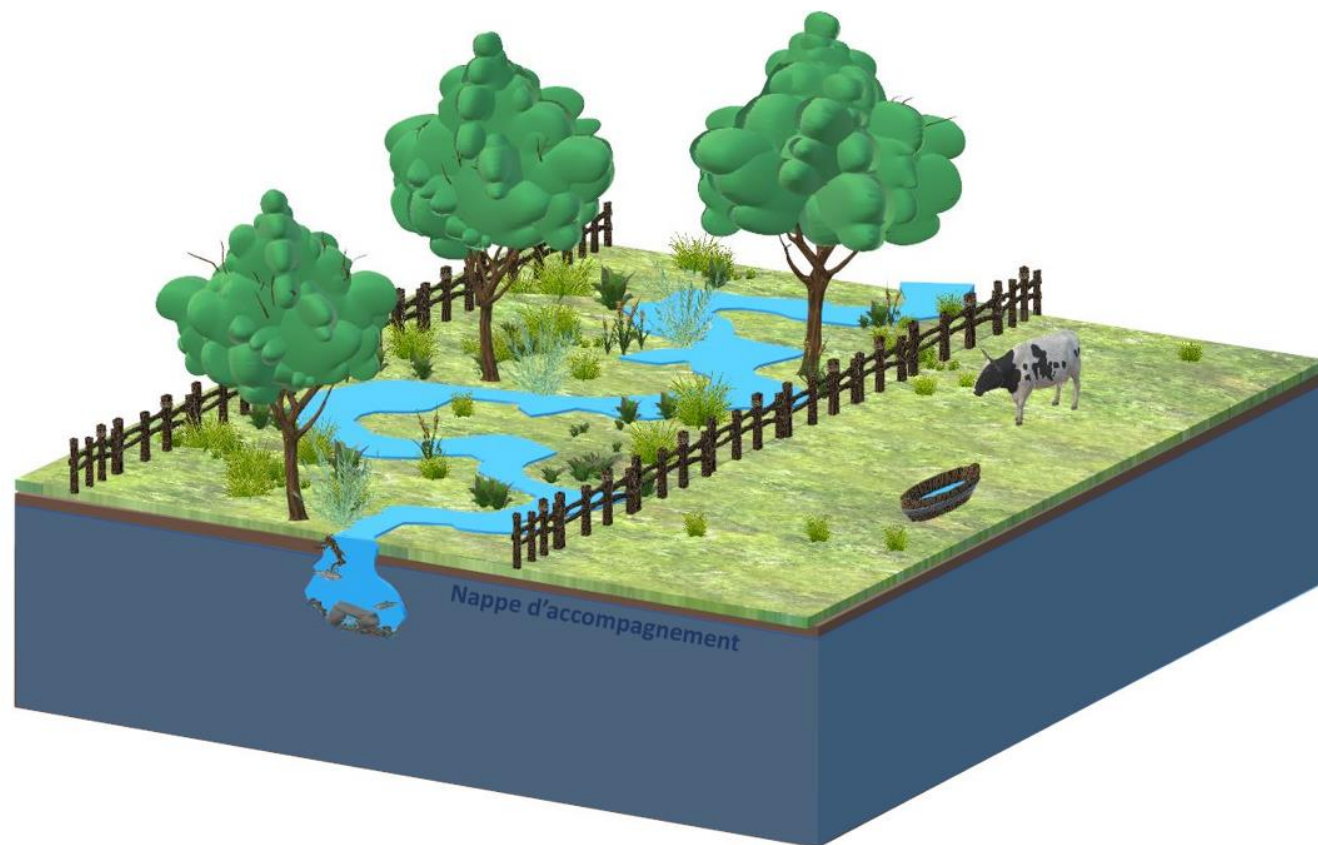


Figure 27 : Schéma synthétique de l'état projeté plusieurs années après reméandrement

La reconstitution d'un matelas alluvial dans le nouveau lit ainsi que la mise en place de bouchons étanches aux jonctions avec l'ancien assureront la pérennité des aménagements en bloquant respectivement tout risque d'incision et de drainage par l'ancien lit rectifié.

8.3 Exemples de restauration similaires

Des exemples concrets de cas alliant avec succès restaurations écologiques et maintien de pratiques agricoles et sylvicoles respectueuses existent depuis plusieurs années à travers la région Franche-Comté, notamment, sur le Dugeon dans le Doubs (25), la Clauge en forêt de Chaux (39), sur le Merlue dans le Jura (39) ou encore sur la Vendeline dans le Territoire de Belfort (90) (Figure 28).



Figure 28 : Exemple de la restauration de la Vendeline dans le Territoire de Belfort (90) avant restauration (à gauche) et après restauration (à droite) autour de laquelle une exploitation pastorale et une fauche compatible avec l’ennoisement des sols persiste dur

9 Détails des aménagements

Sur l’intégralité du linéaire, le lit actuel sera totalement oblitéré et un lit projeté méandriforme serait tracé dans le fond de vallée comblé jusqu’au niveau du terrain naturel (Figure 29).

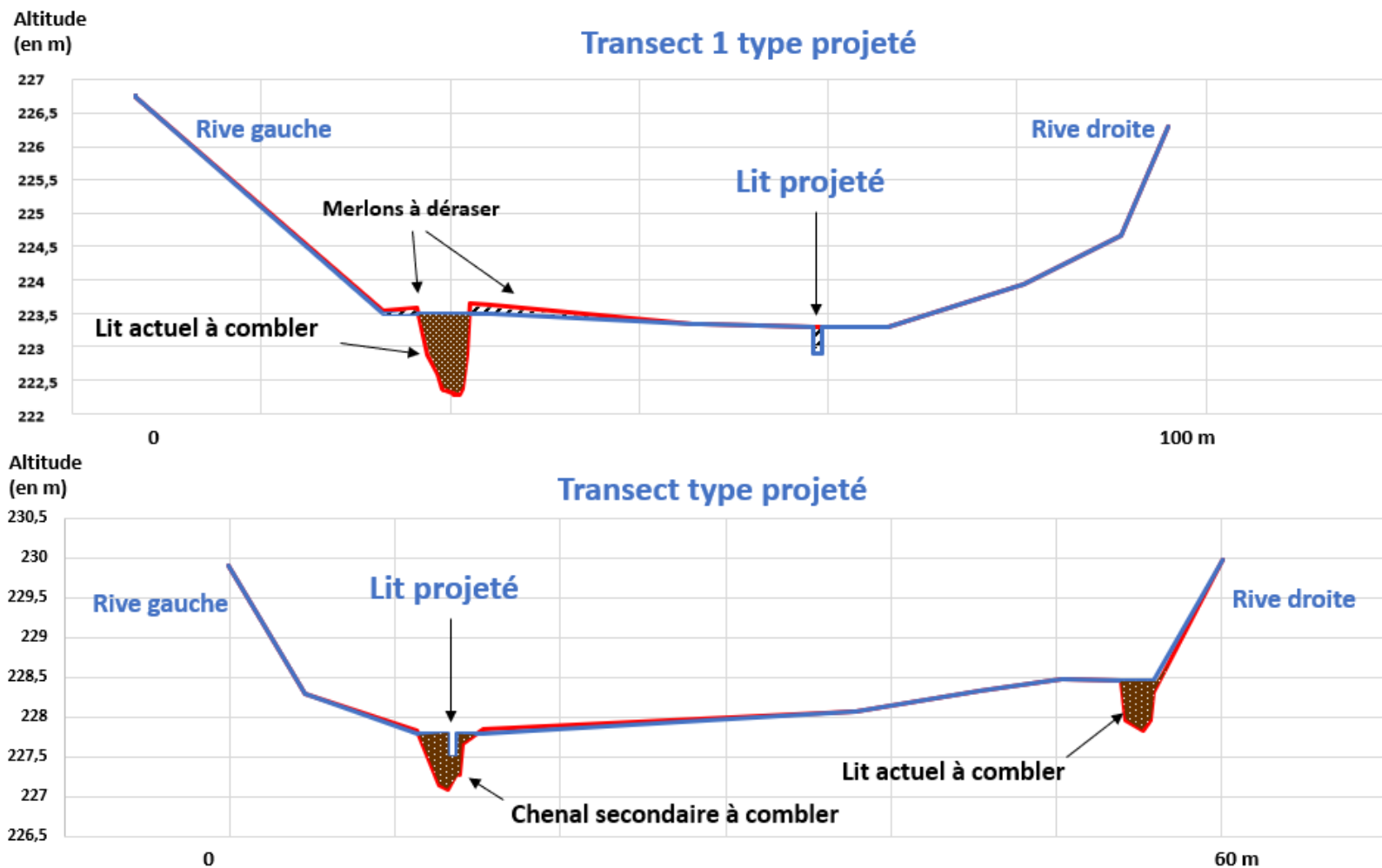


Figure 29 : Description des aménagements sur deux profils en travers types

Afin d’optimiser les coûts liés aux travaux, les digues seraient partiellement voire totalement arasées et leurs matériaux constitutifs pourraient être employés pour reboucher les chenaux à oblitérer.

En définitive, ce projet permettrait de transformer les 2,6 km dysfonctionnels qui composent le cours principal du Bénusse en plus de 3,5 km parfaitement fonctionnels (Figure 30).

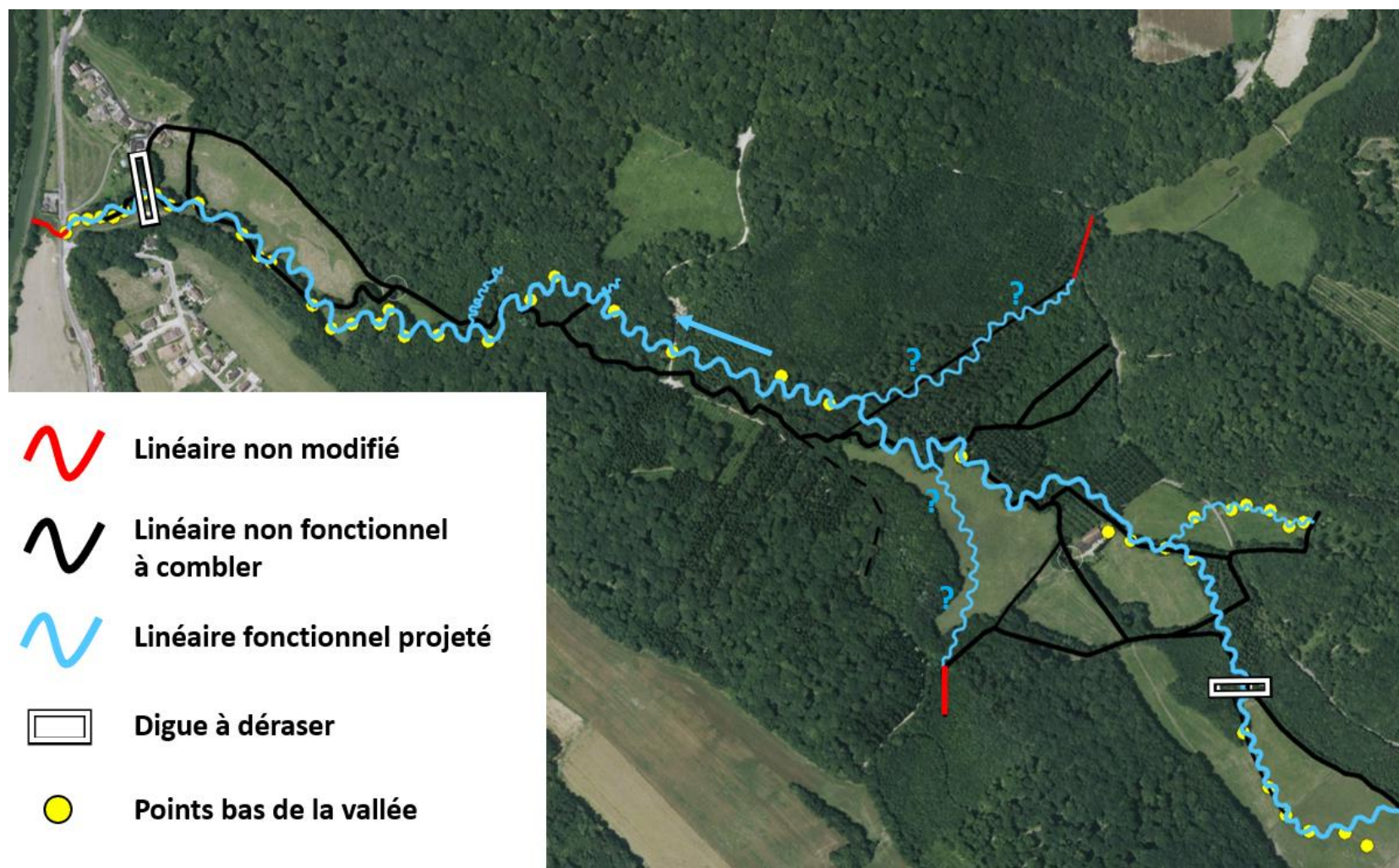


Figure 30 : Plan de masse des aménagements à effectuer

Pour effectuer ces travaux, la végétation devra être enlevée sur toute l’emprise nécessaire aux travaux soit 20 Ha (Figure 31), qui représentent 5% des bois alentours. Principalement, les coupes nécessaires se centralisent sur la partie médiane, peu exploitée et principalement composée d’aulnes.

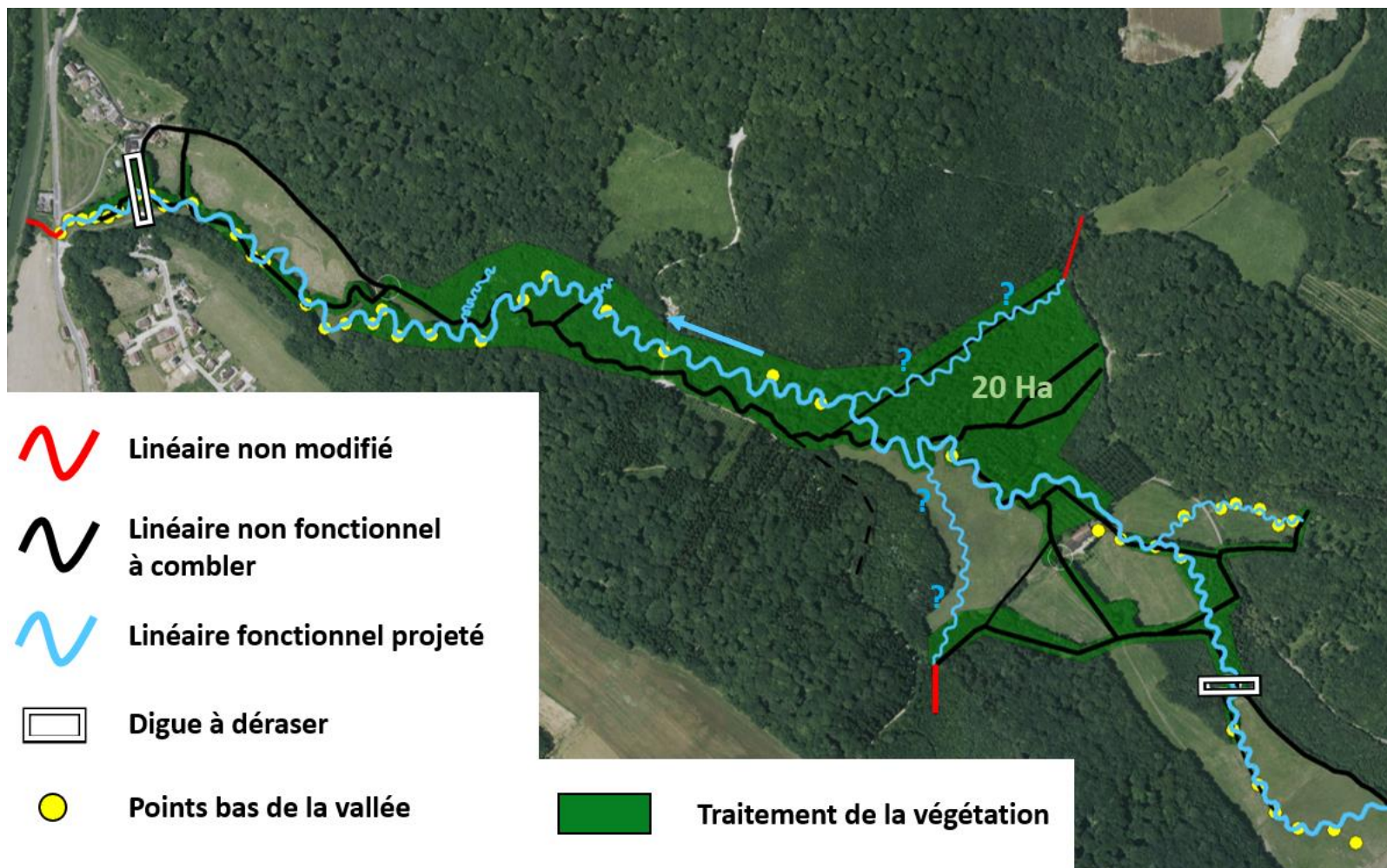


Figure 31 : Traitement de la végétation nécessaire à la réalisation du projet

Etant donné l’important linéaire concerné, le reméandrement du chevelu hydrographique pourrait être décomposé en 4 projets potentiellement indépendants les uns des autres, délimité en fonction des différences au niveau des pentes de la vallée (Figure 32 et Figure 33).

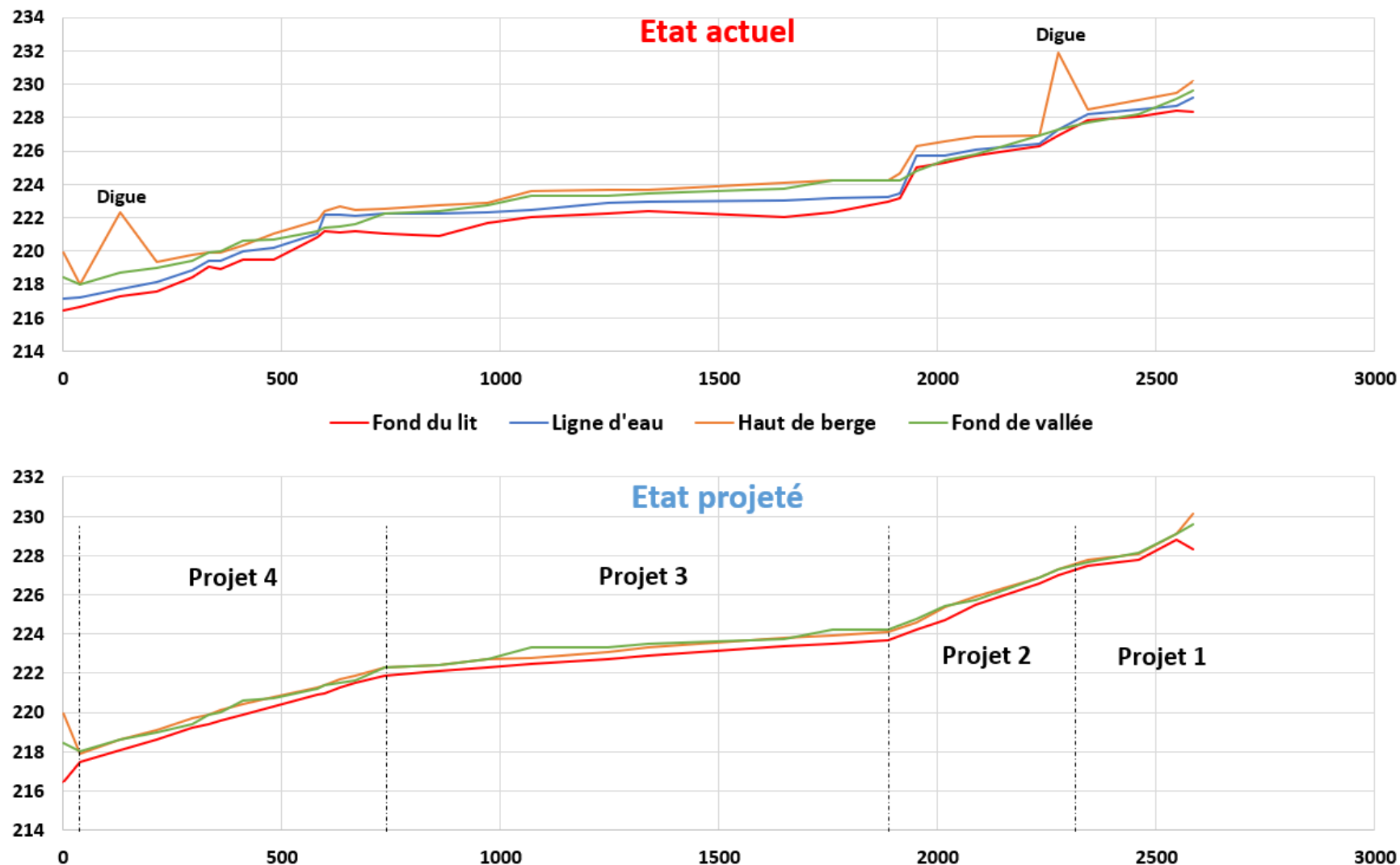


Figure 32 : Profils en long actuel et projeté avec délimitation des projets en fonction des ruptures de pente naturelles de la vallée

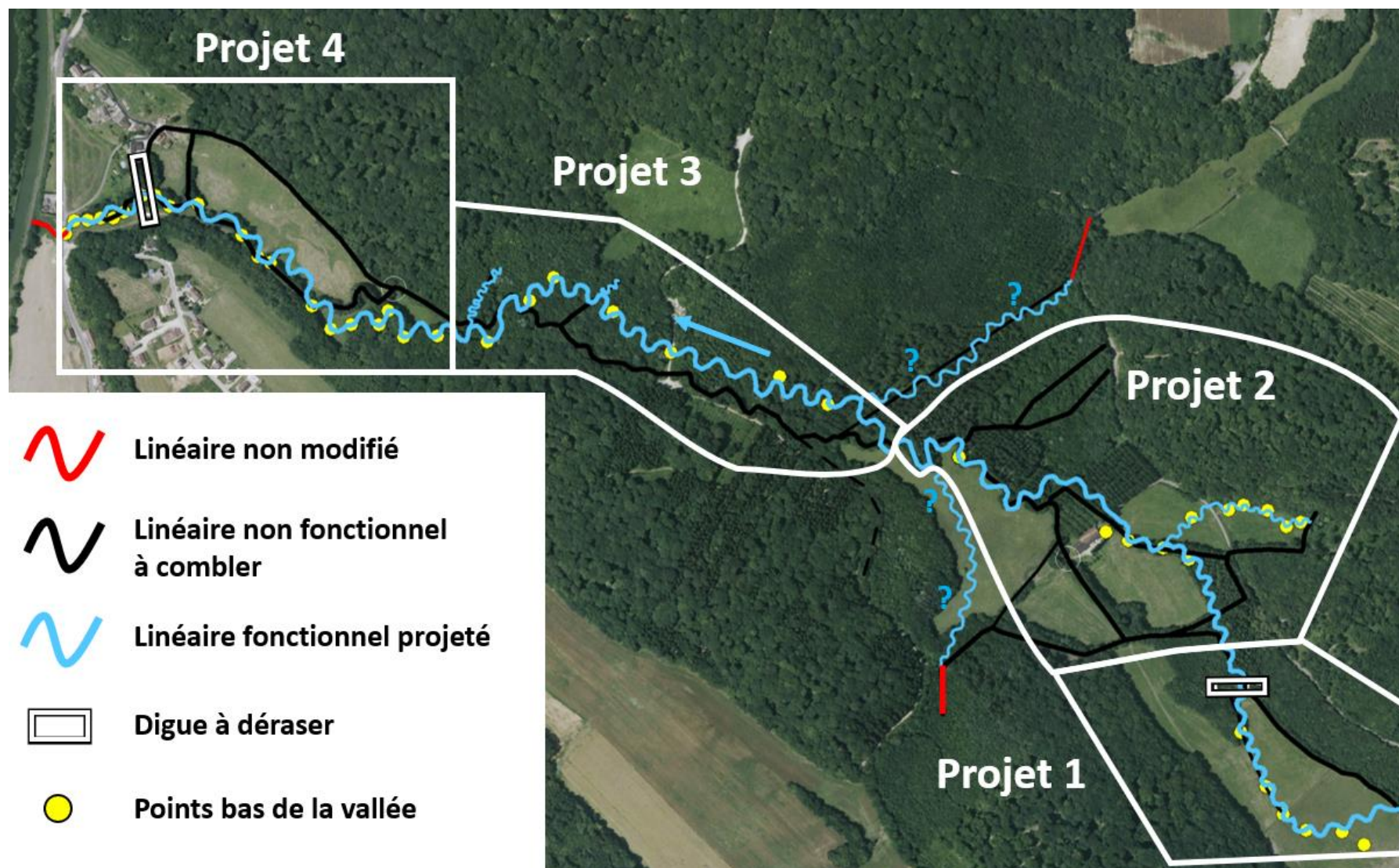


Figure 33 : Décomposition des aménagements en 4 projets distincts

9.1.1 Projet 1 : Source du Bénusse

9.1.1.1 Situation actuelle

De la source du Bénusse à l’aval de l’ancienne digue boisée, le ruisseau est invariablement rectiligne (Figure 34 et Figure 35).

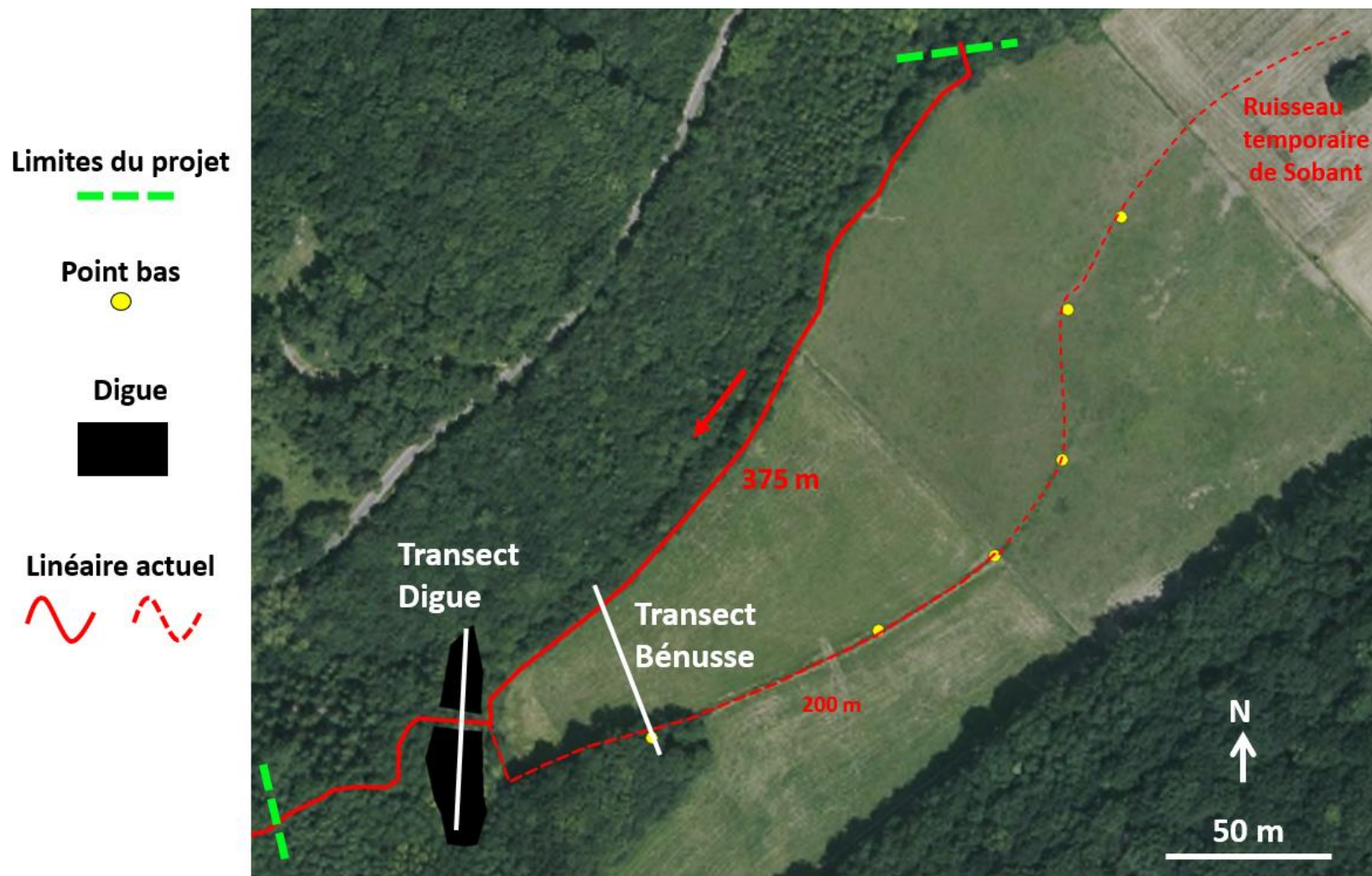


Figure 34 : Plan de masse de la situation actuelle au niveau du projet de la source du Bénusse

Perché sur le côté de la vallée, il possède également un gabarit surdimensionné le rendant homogène, déconnecté de ses berges et donc très peu attractif pour la faune pisciaire et macrobenthique. Au niveau de la digue, les chenaux se rejoignent pour s’écouler à travers cet étranglement artificiel.

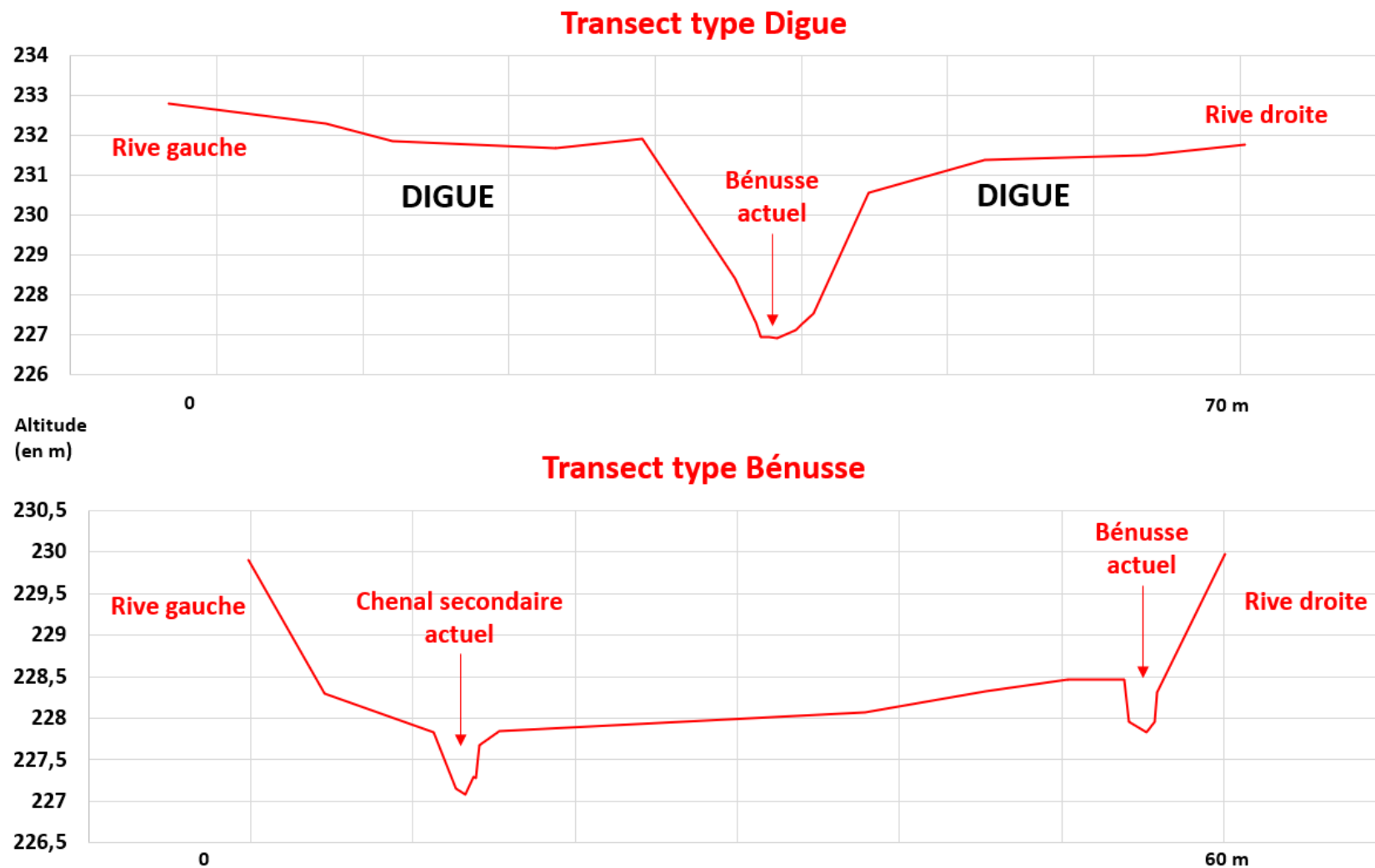


Figure 35 : Transect type actuel au niveau du projet de la source du Bénusse

9.1.1.2 Détails des aménagements

Sur ce secteur, le reméandrement du ruisseau dans son thalweg permettrait de regagner près de 600m de cours d’eau connectif et fonctionnel (Figure 36). Un lit projeté méandrique rejoindrait les points bas de la vallée.

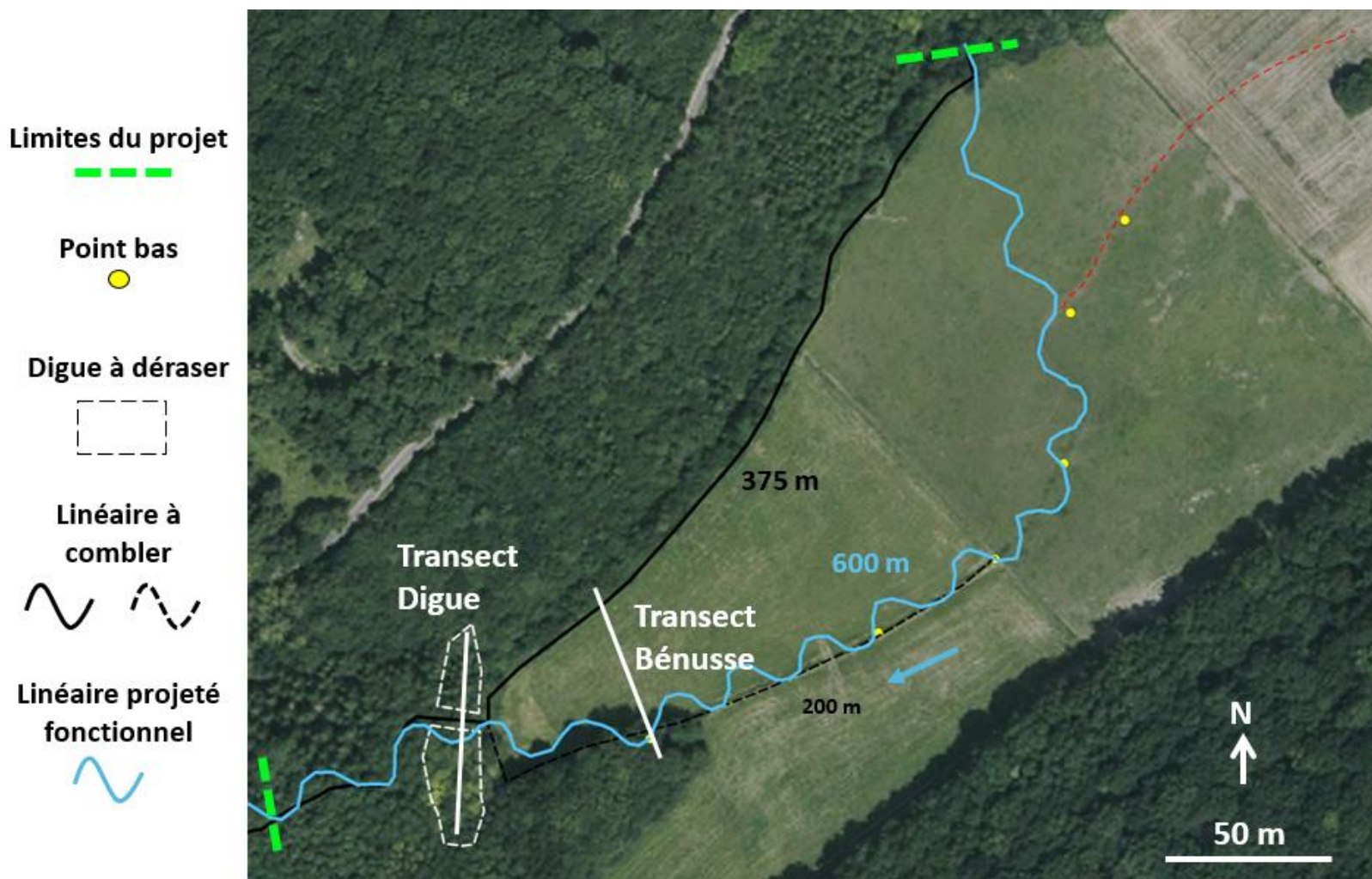


Figure 36 : Plan de masse du projet de restauration de la source du Bénusse

La digue serait arasée et ses matériaux constitutifs (jusqu’à 2500 m³) pourraient être utilement employés pour reboucher les chenaux actuels surdimensionnés (Figure 37).

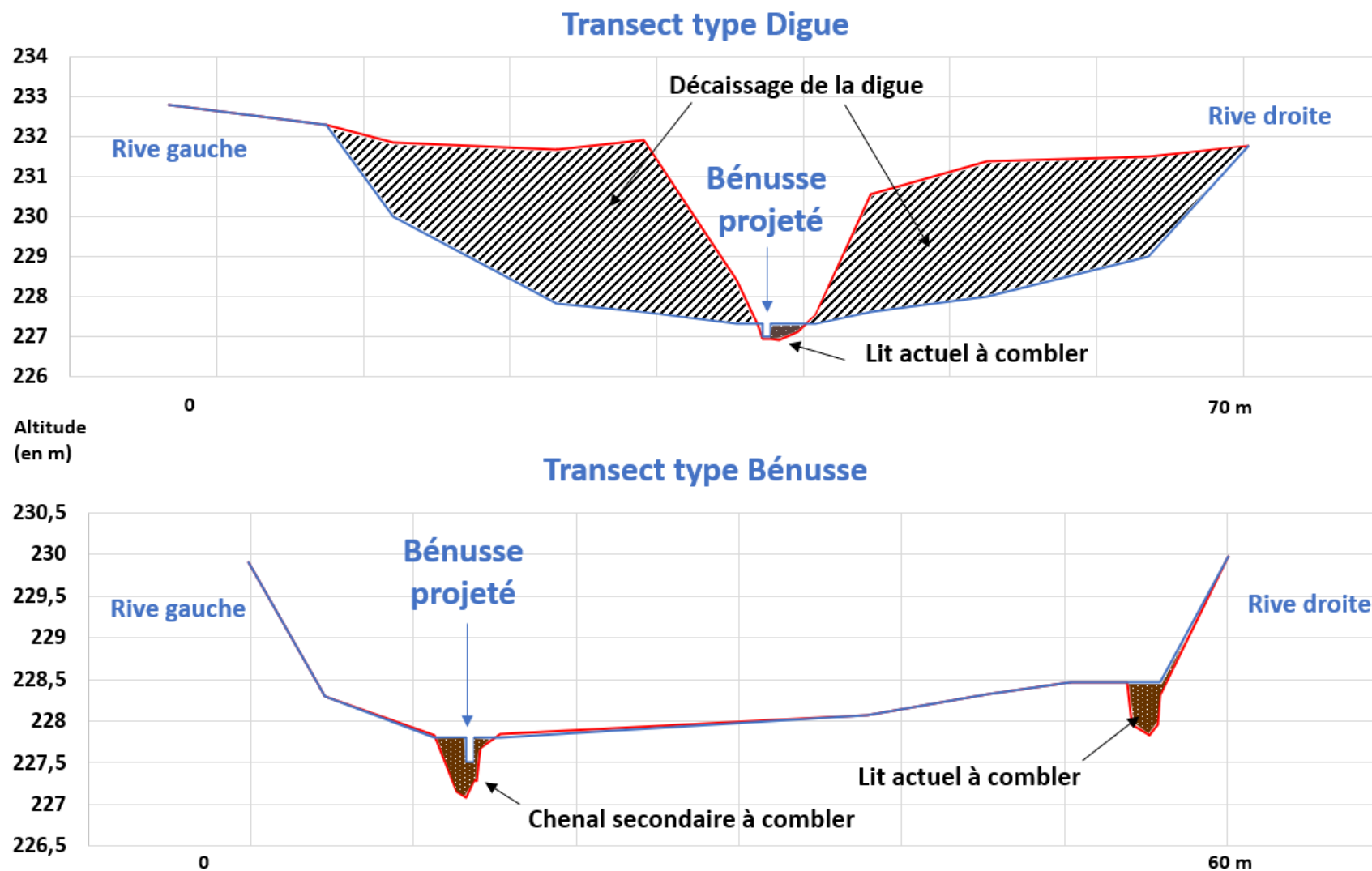


Figure 37 : Transect type futur du projet de la source du Bénusse

9.1.1.3 Emprise foncière

Ce projet concerne en grande majorité des parcelles publiques (Conseil Départemental du Doubs). 5 parcelles sont touchées impliquant 7 propriétaires (Figure 38).

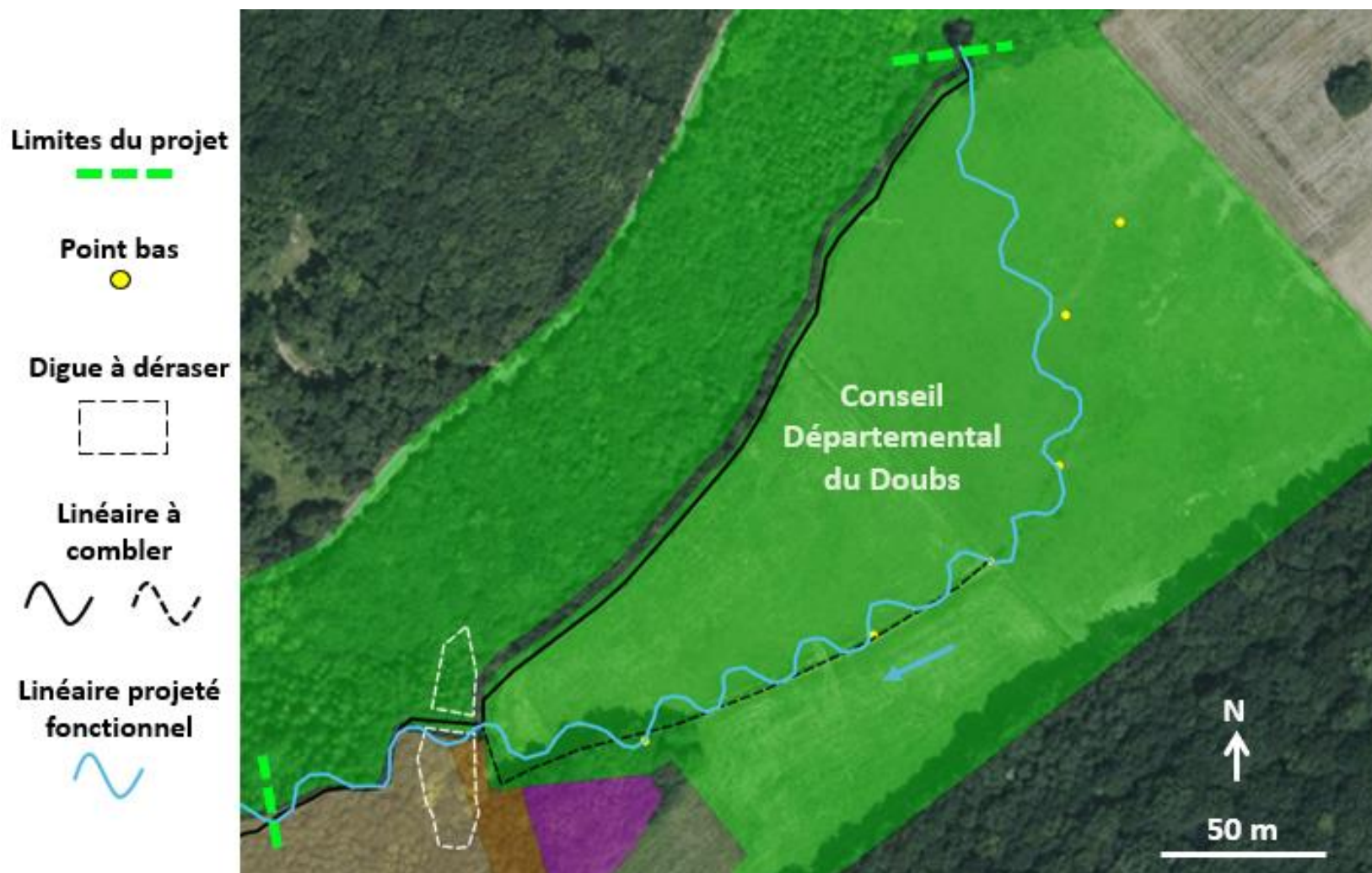


Figure 38 : Emprise foncière du projet de restauration de la source du Bénusse

9.1.1.4 Impact hydraulique

Après travaux, l’emprise des crues les plus fréquentes sera donc naturellement un peu plus grande. L’ancien lit perché sera toutefois totalement hors d’eau et exploitable à des fins agricoles ou sylvicoles (Figure 39).

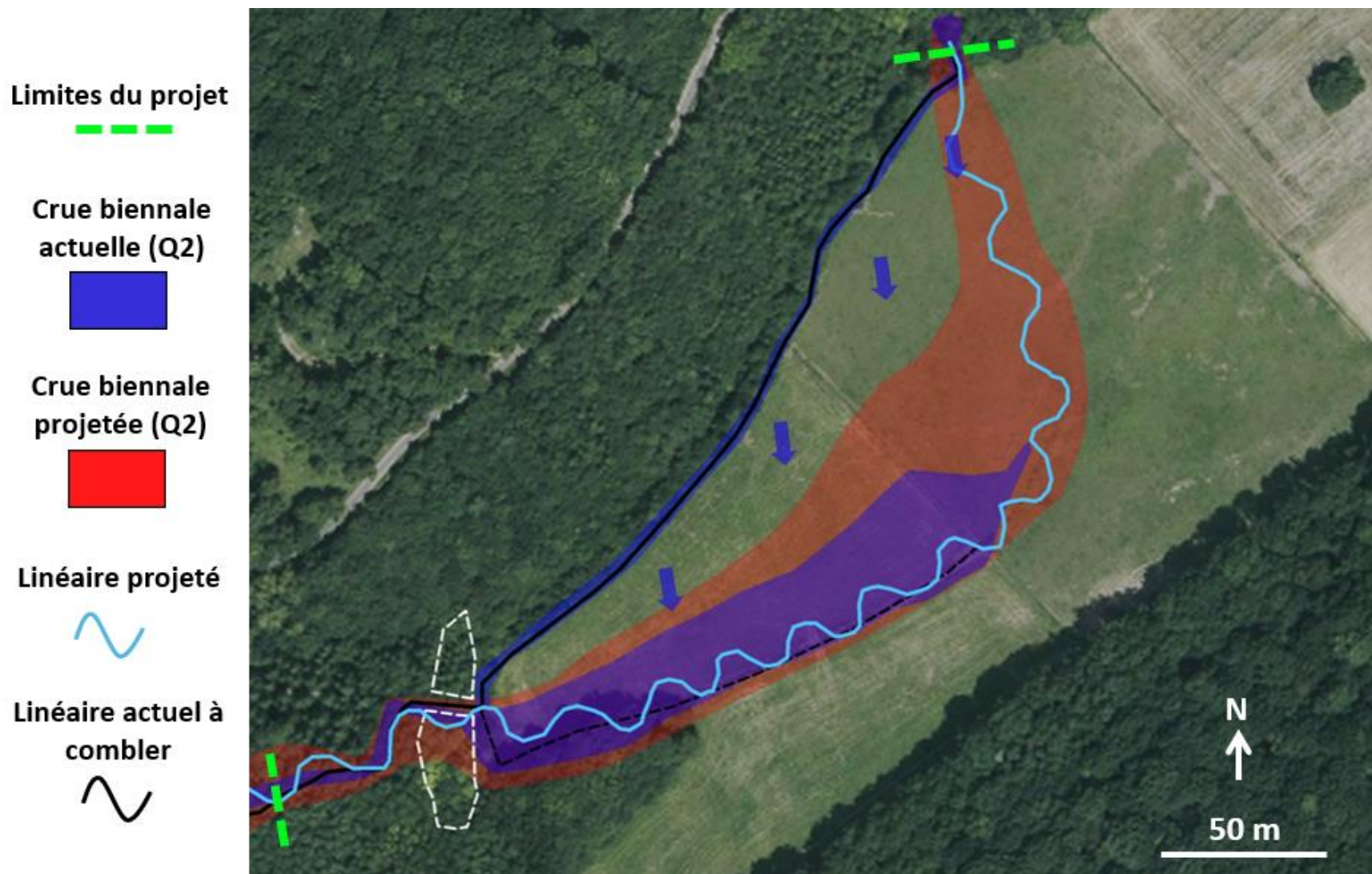


Figure 39 : Emprise actuelle et projetée de la crue biennale (Q2) au niveau de la source du Bénusse

En crue décennale, la suppression de la digue annule le remous généré en amont (Figure 40).

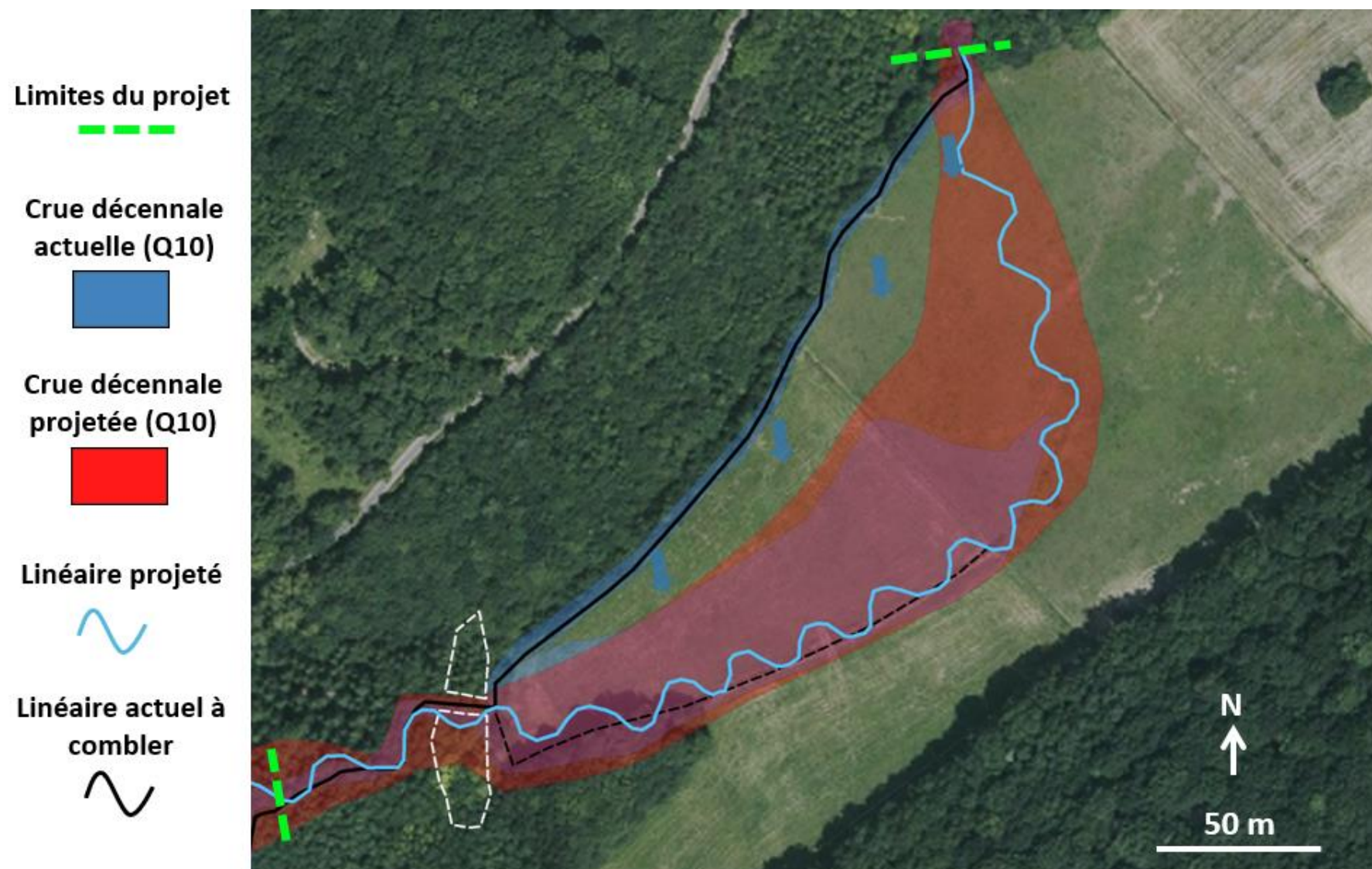


Figure 40 : Emprise actuelle et projetée de la crue décennale (Q10) au niveau de la source du Bénusse

En crue centennale, les différences entre les emprises actuelles et projetées sont encore moins marquées (Figure 41).

Limites du projet



Crue centennale
actuelle (Q100)



Crue centennale
projetée (Q100)



Linéaire projeté



Linéaire actuel à
combler

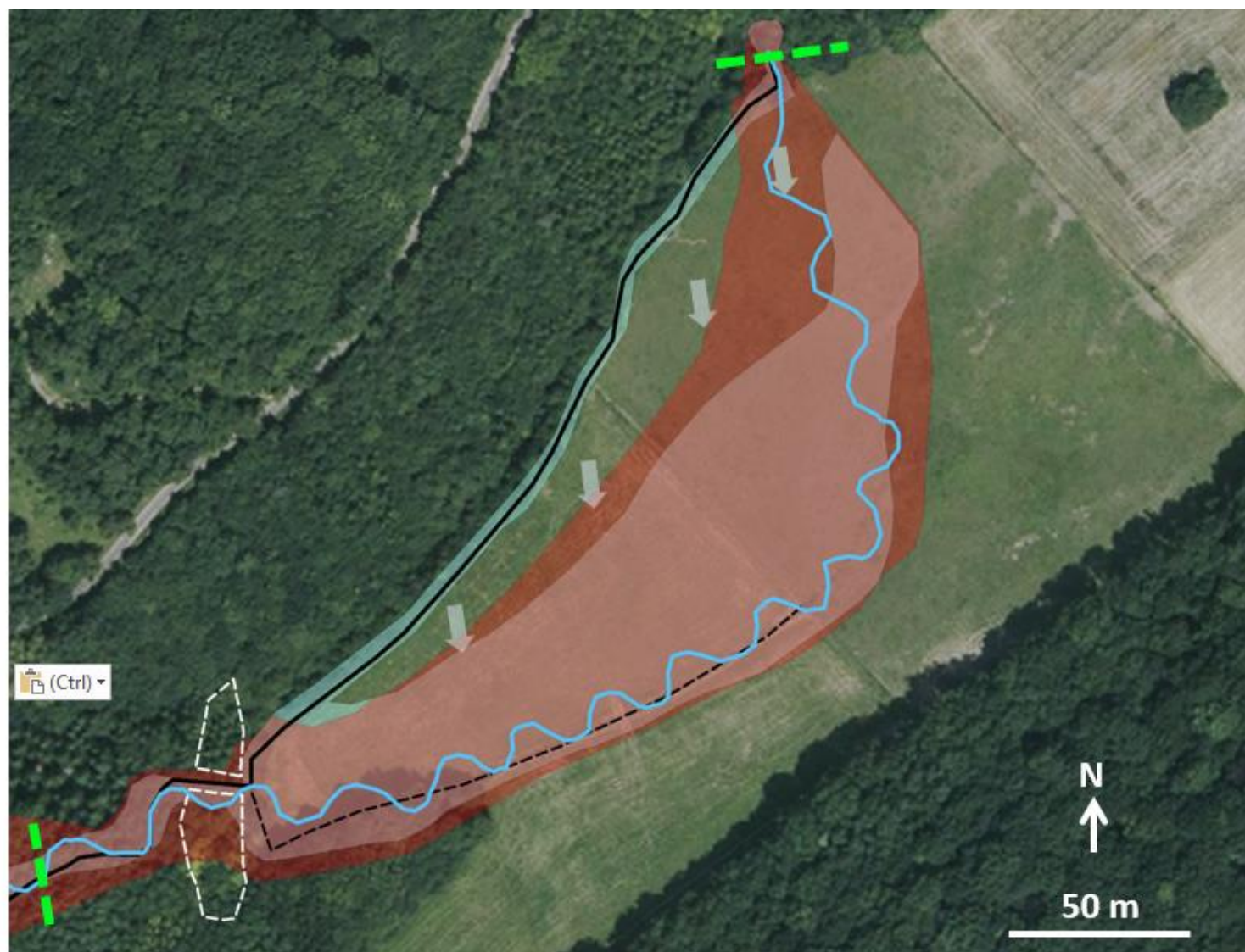


Figure 41 : Emprise actuelle et projetée de la crue centennale (Q100) au niveau de la source du Bénusse

9.1.1.5 Volumes à mobiliser et couts

L’essentiel des couts serait lié au terrassement et à l’achat éventuel de matériaux meubles en cas de refus des propriétaires d’araser la digue qui ne joue aucun rôle dans la réduction de l’aléa d’inondation.

Une recharge sédimentaire devrait également être prévue au sein du lit guide projeté jusqu’à hauteur de 210 m³ de blocs/galets/graviers à répartir dans le lit guide. Une dizaine de bouchons étanches seraient à implanter aux jonctions entre lit projeté et lit actuel à reboucher pour éviter tout drainage hyporhéique.

En définitive le montant global de ce projet de reméandrement s’élèverait à près de 100 000 € HT (Tableau 1).

Tableau 1 : Synthèse des volumes et coûts généraux par opération

Opération	Nb/Linéaire/Surface/Volume	Total € HT
Mise en place chantier/remise en état/finition (forfait)	1	20 000
Traitement végétation (Ha)	0,5	4 000
Recharge sédimentaire en blocs/galets/graviers (m ³)	210	21 000
Bouchons étanches (unité)	10	5 000
Terrassement in situ (m ³)	2 500	12 500
Achat matériaux meubles éventuels (m ³)	1 500	22 500
Lit guide méandriforme (m)	600	6 000
Maitrise d’œuvre (10%)		9 000
TOTAL		100 000 € HT

9.1.2 Projet 2 : Source de la Mignonne et moulin Bénusse

9.1.2.1 Situation actuelle

De la source de la Mignonne jusqu’à l’aval du moulin de Bénusse, le cours d’eau est rectiligne et son débit se partage dans divers canaux d’alimentation alimentant la chute du moulin Bénusse et un plan d’eau (Figure 42).

Actuellement, la confluence effective entre la Mignonne et le Bénusse se fait en aval du moulin.

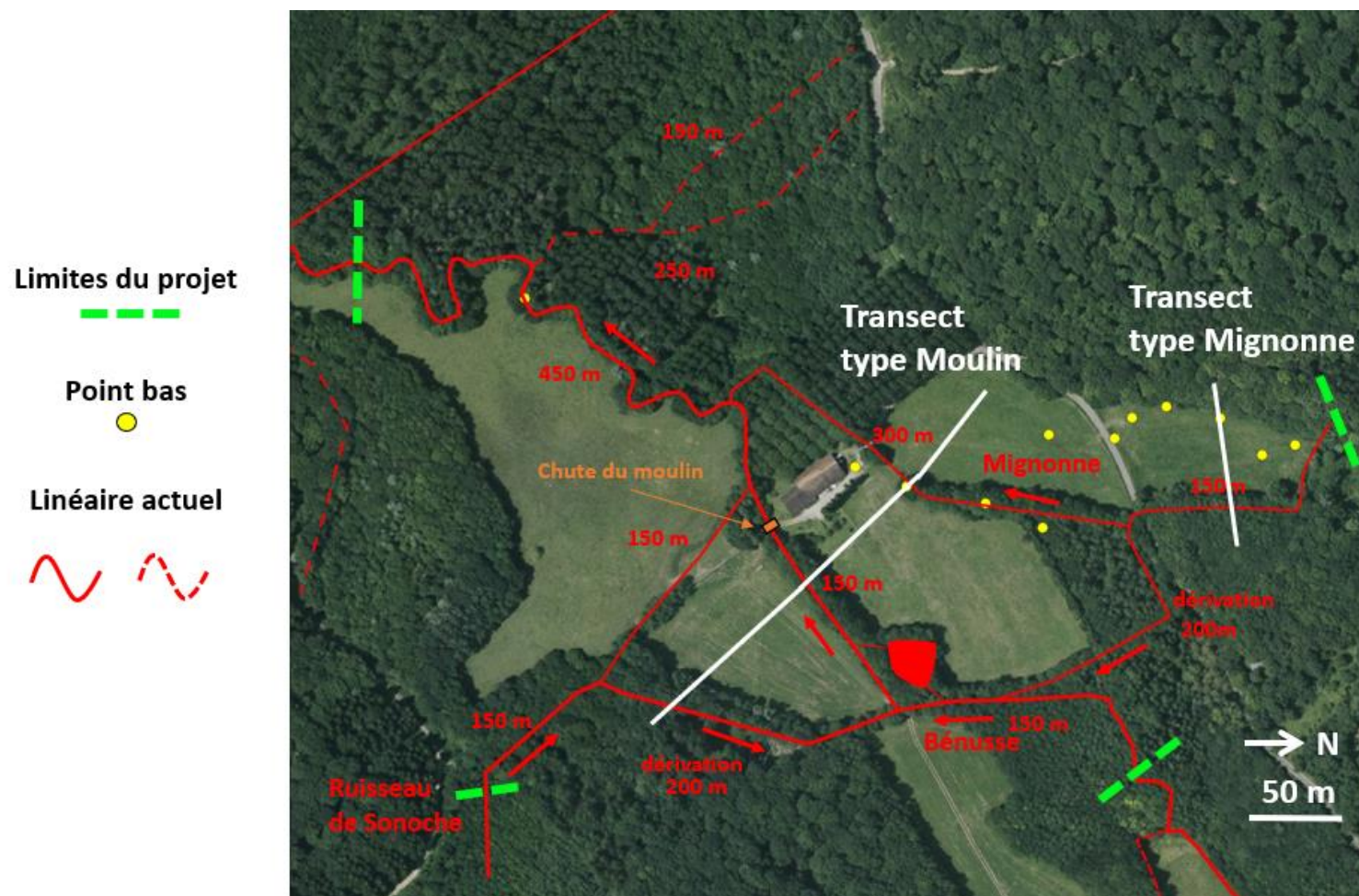


Figure 42 : Plan de masse de la situation actuelle de la source de la Mignonne et du moulin Bénusse

Sur ce secteur, le Bénusse et la partie amont de la Mignonne ont donc été volontairement perchés hors de leurs thalwegs respectifs. Un gabarit surdimensionné a également été imposé à ces cours d’eau de telle sorte qu’ils sont déconnectés de leurs lits majeurs (Figure 43).

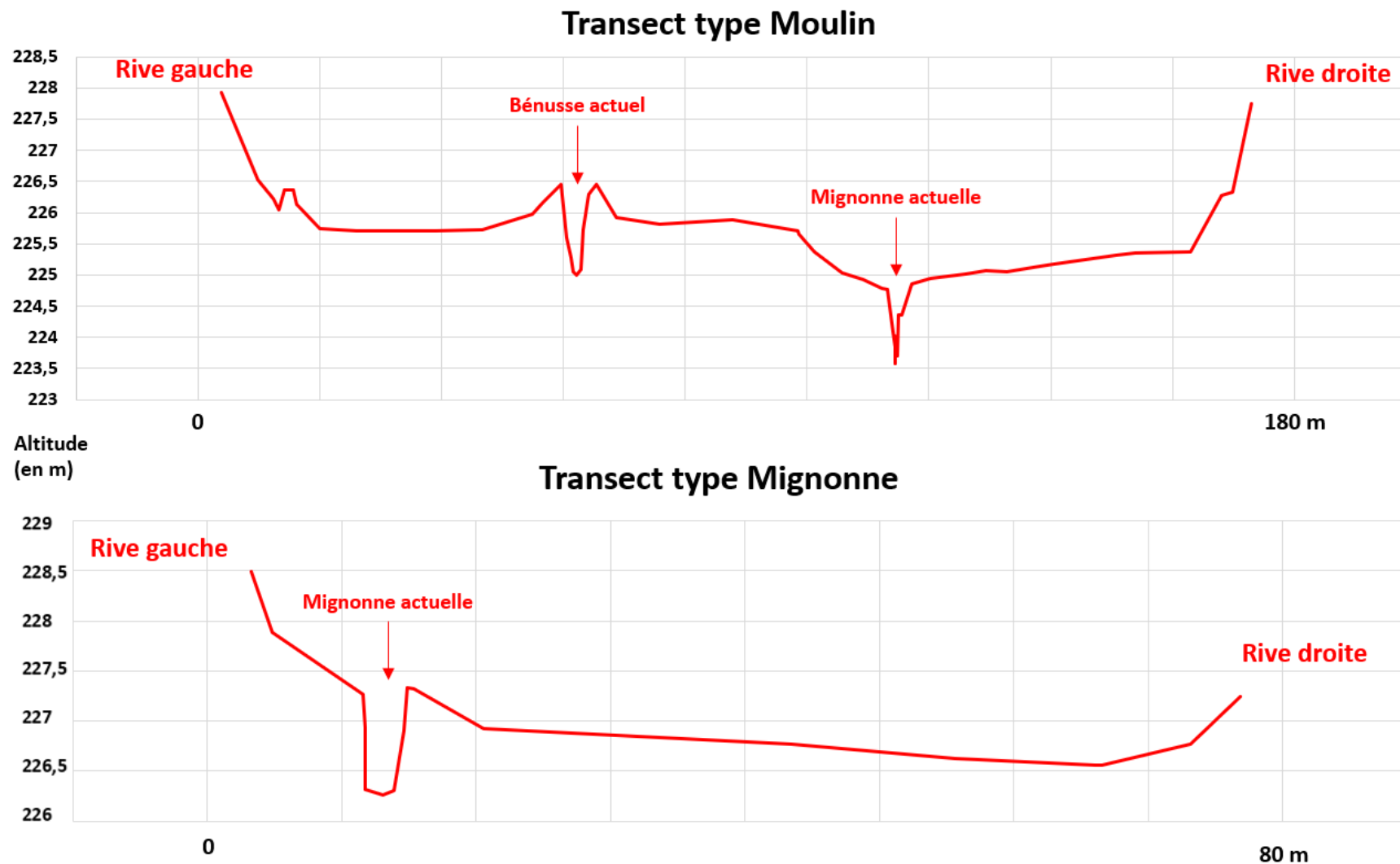


Figure 43 : Transects type actuels au niveau du projet de la source de la Mignonne et du Moulin Bénusse

9.1.2.2 Détails des aménagements

Les aménagements à prévoir consistent en l’oblitération totale de près de 2300m de drains et chenaux actuellement dysfonctionnels. Un lit méandriforme devrait être tracé au niveau des points bas de la vallée (Figure 44).

En amont et en aval du moulin de Bénusse, un décaissage du lit moyen est à prévoir sur ~30m de largeur pour réduire l’aléa d’inondation de l’habitation (cf rapport hydraulique joint).

Au niveau des chemins d’accès au moulin, des dalots seraient à mettre en place pour permettre la circulation à sec jusqu’à la crue décennale et plus (cf rapport hydraulique joint). Actuellement, ces voies d’accès sont submergées plus fréquemment.

En définitive, le projet conduirait à la recreation de 1300m (hors ruisseau de Sonoche) de cours d’eau à chenaux uniques, méandriformes, et parfaitement fonctionnels.

- Limites du projet

- Point bas

- Linéaire à combler

- Linéaire projeté fonctionnel

- Décaissage

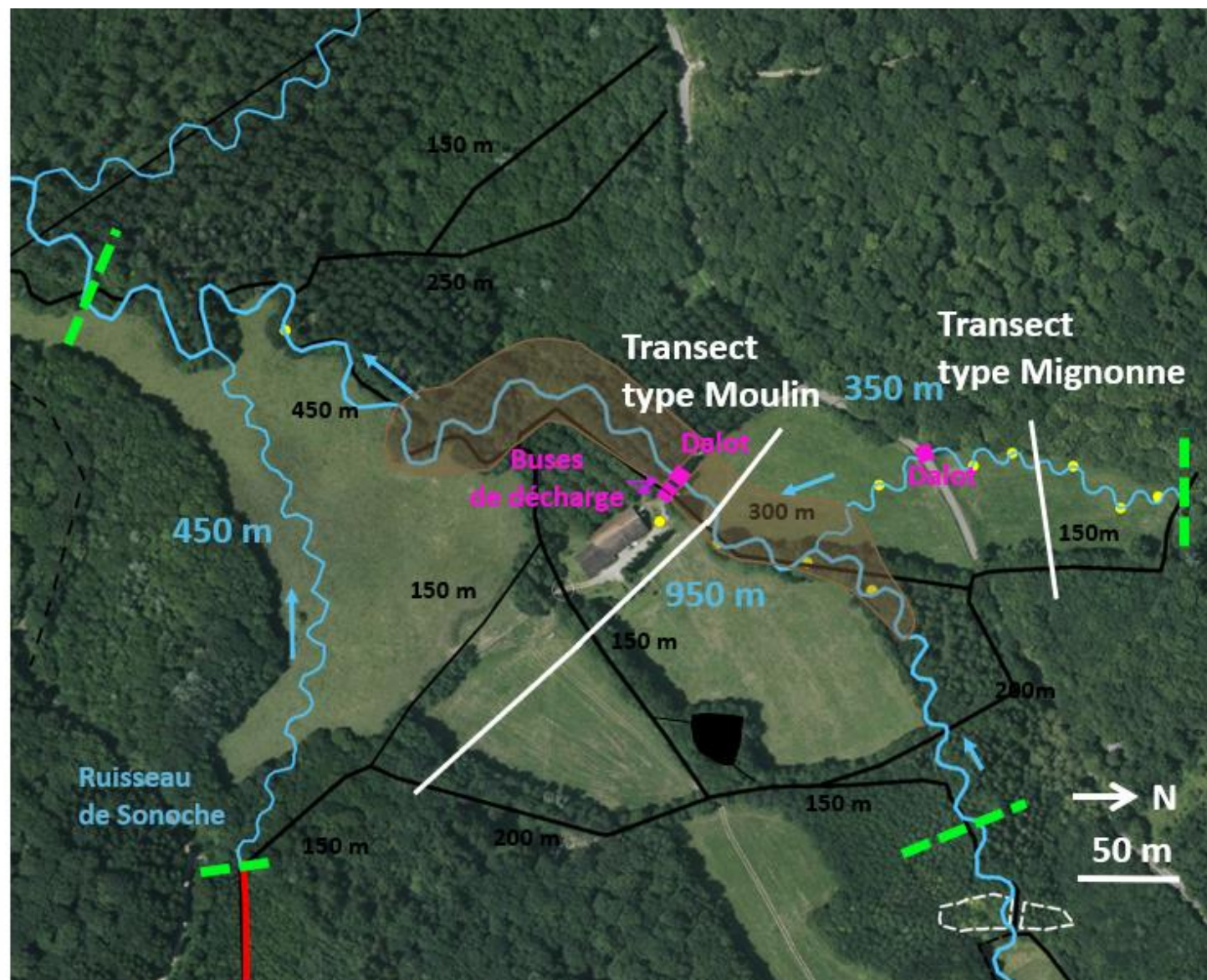



Figure 44 : Plan de masse du projet de restauration de la source de la Mignonne et du Moulin Bénusse

Un reprofilage des fonds de vallée devra être effectué pour araser les merlons et permettre aux cours d’eau de s’écouler dans leurs thalwegs respectifs (Figure 45) sans aggraver l’aléa d’inondation.

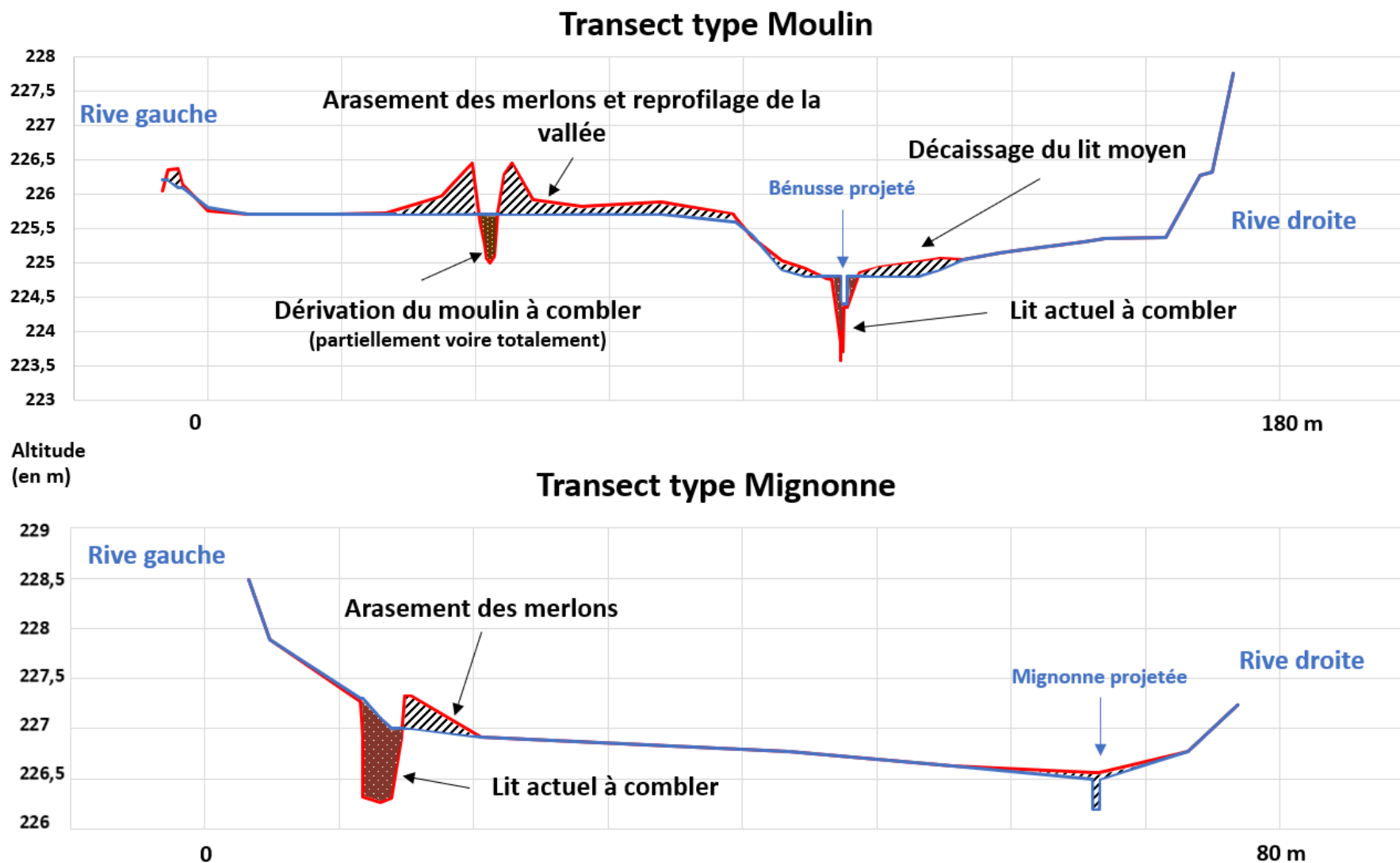


Figure 45 : Transects types futurs du projet de restauration de la source de la Mignonne et du Moulin Bénusse

9.1.2.3 Emprise foncière

Ce projet concerne à la fois des parcelles publiques (Conseil Départemental du Doubs) dans sa partie amont ainsi que des parcelles privées ; soit un total de 31 se partageant entre 11 propriétaires (Figure 46).

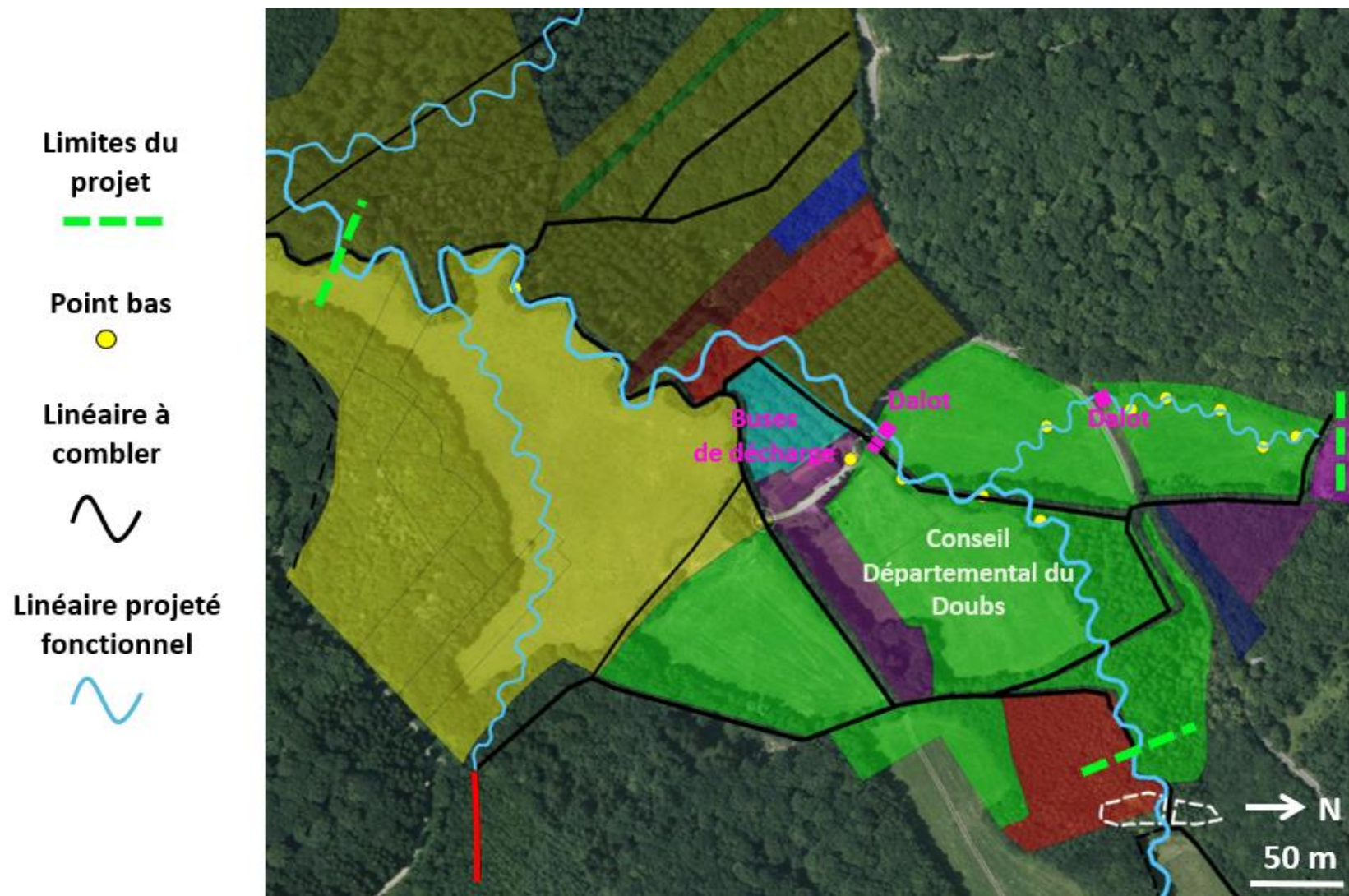


Figure 46 : Emprise foncière du projet de restauration de la source de la Mignonne et du Moulin Bénusse

9.1.2.4 Impact hydraulique

Comme escompté, les crues les plus fréquentes redeviendront débordantes sans que cela n’aggrave l’aléa d’inondation pour l’habitation et les chemins (Figure 47).

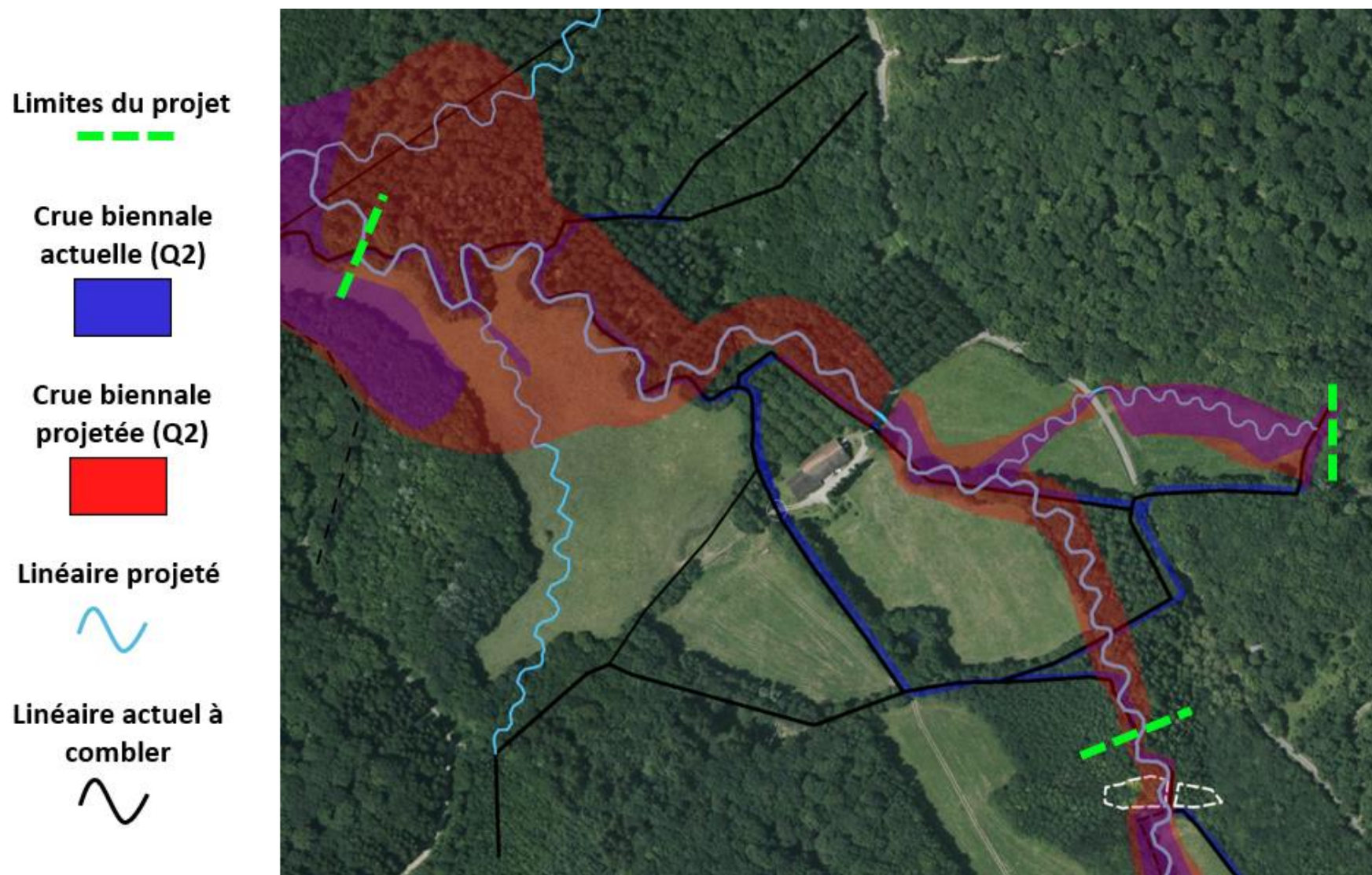


Figure 47 : Emprise actuelle et projetée de la crue biennale (Q2) au niveau de la source de la Mignone et du Moulin de Bénusse

Le décaissage et l’ajout d’ouvrages hydrauliques permettront au moulin de Bénusse et aux chemins de ne plus être inondés pour des crues de temps de retour 10 ans (Figure 48).

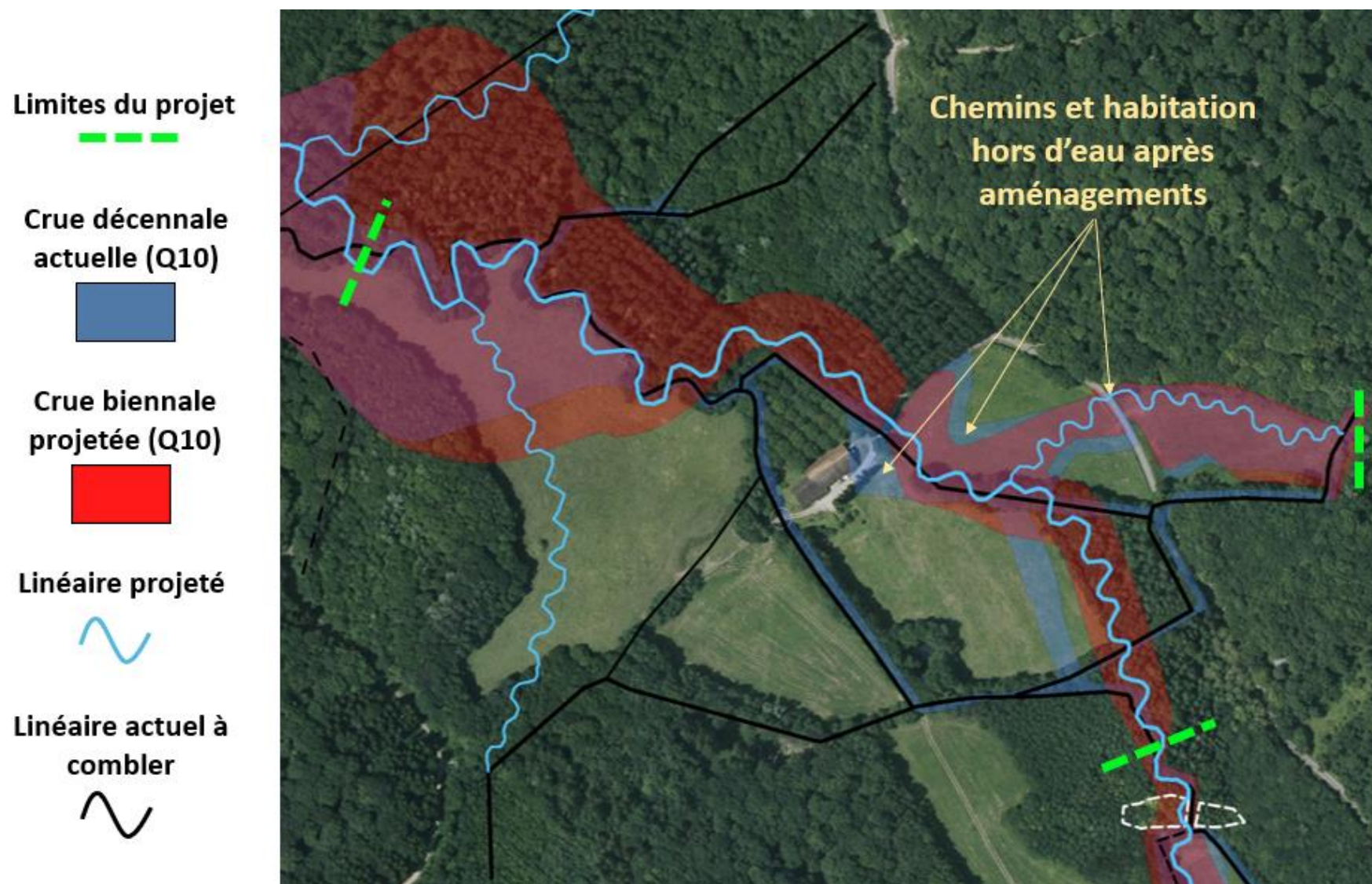


Figure 48 : Emprise actuelle et projetée de la cure décennale (Q10) au niveau de la source de la Mignonne et du moulin de Bénusse

En crue centennale, l’aléa d’inondation sera réduit de 26cm pour l’habitation, mais celle-ci, tous comme les chemins d’accès, restera en partie inondée (Figure 49).

Limites du projet



Crue centennale
actuelle (Q100)



Crue centennale
projetée (Q100)



Linéaire projeté



Linéaire actuel à
combler

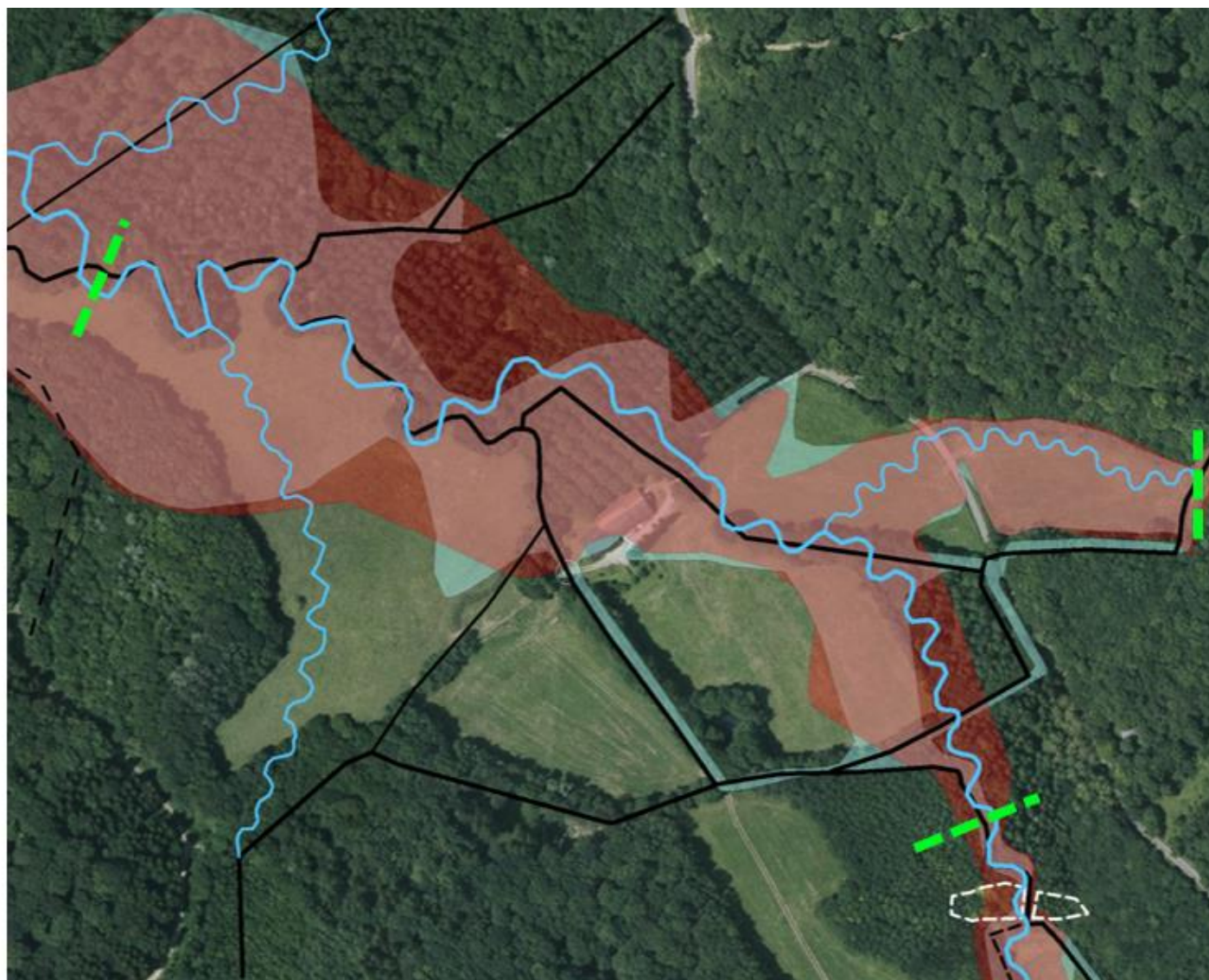


Figure 49 : Emprise actuelle et projetée de la crue centennale (Q100) au niveau de la source de la Mignonne et du moulin de Bénusse.

9.1.2.5 Volumes à mobiliser et couts

L’essentiel des volumes et couts à mobiliser pour ce projet de restauration sont liés au traitement de la végétation en place ainsi qu’au terrassement et à l’achat de matériaux meubles éventuels (Tableau 2).

Les totaux affichés n’incluent pas la restauration de la partie basale du ruisseau de Sonoche qui s’élèverait à 15 000 €.

En définitive, ce projet de restauration nécessiterait jusqu’à 260 000 € HT, maîtrise d’œuvre comprise.

Tableau 2 : Synthèse des volumes et couts généraux par opération

Opération	Nb/Linéaire/Surface/Volume	Total € HT
Mise en place chantier/remise en état/finition (forfait)	1	20 000
Traitement végétation (Ha)	5	40 000
Recharge sédimentaire en blocs/galets/graviers (m³)	318	31 800
Bouchons étanches (unité)	20	10 000
Terrassement in situ (m³)	7 495	37 475
Achat matériaux meubles éventuels (m³)	3000	45 000
Lit guide méandriforme (m)	1300	13 000
Dalots et buses		29 998
Maitrise d’œuvre (10%)		22 727
TOTAL		250 000 € HT

9.1.3 Projet 3 : Partie médiane et boisée

9.1.3.1 Situation actuelle

Dans sa partie médiane et boisée, le Bénusse est déporté contre le coteau rive gauche et possède un linéaire très peu sinueux. Il reçoit 3 affluents sur sa rive droite et un écoulement temporaire en rive gauche (Figure 50).

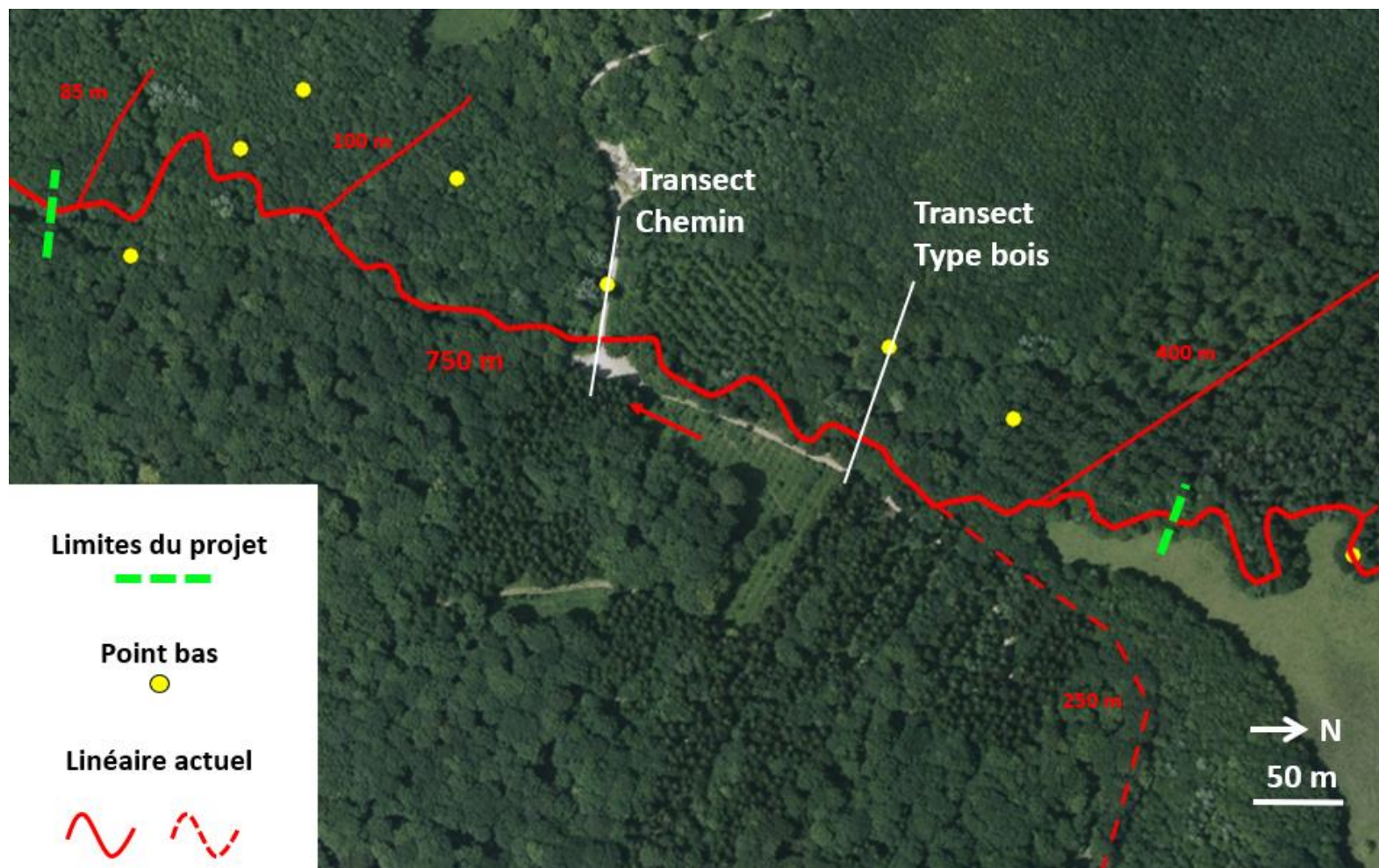


Figure 50 : Plan de masse de la situation actuelle du Bénusse dans sa partie médiane boisée

En plus de s’écouler hors de son thalweg, le cours d’eau voit son gabarit surdimensionné. Ses lits mineurs et majeurs sont déconnectés. Un unique chemin carrossable coupe le fond de vallée ; à ce niveau le cours d’eau est busé (Figure 51).

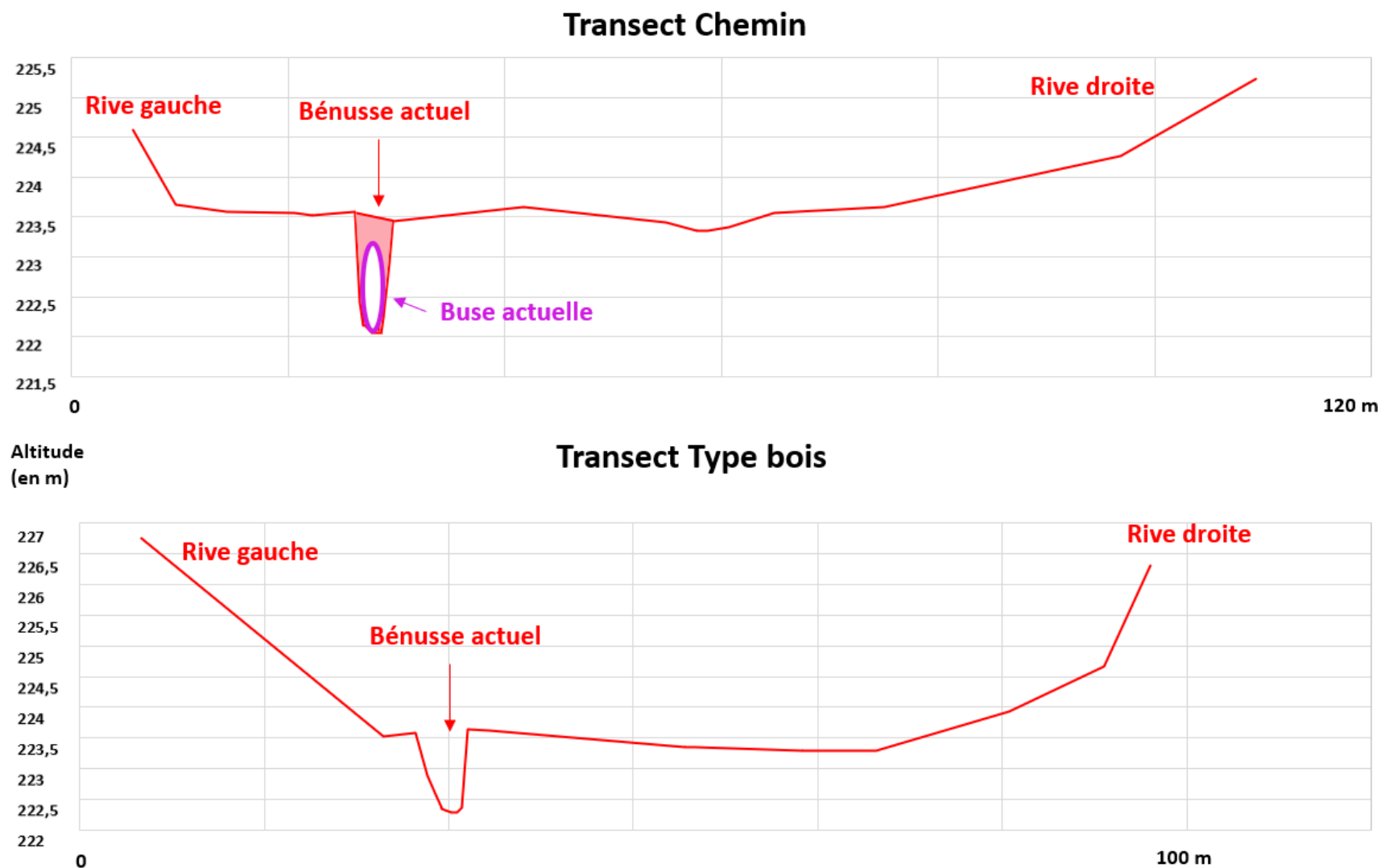


Figure 51 : Transects du chemin et type actuels au niveau du projet de la partie médiane et boisée

9.1.3.2 Détails des aménagements

La restauration de ce secteur consiste en l’oblitération totale des chenaux actuellement dysfonctionnels. Ensuite, un lit projeté méandriforme doit être tracé dans le fond de vallée afin de reconnecter le cours d’eau à son lit majeur (Figure 52).

Le chemin traversant la vallée serait pour permettre aux usagers de rejoindre les deux rives. Un dalot (2 x 1m) permettrait d’assurer le franchissement du cours d’eau par des véhicules lourds, nécessaires au débardage du bois, hors période de crue.

Les affluents pérennes en rive droite seront également restaurés et parfaitement reconnectés au lit principal. En revanche, le ruisseau du bois de l’Ange provenant de la zone industrielle de Saint-Vit, n’est pas inclus et pourrait faire l’objet d’un projet ultérieur avec des enjeux importants en termes de restauration de zones humides et de réserves en eau. Toutefois, sa confluence sera nécessairement retravaillée afin d’assurer une connexion parfaite avec le Bénusse.

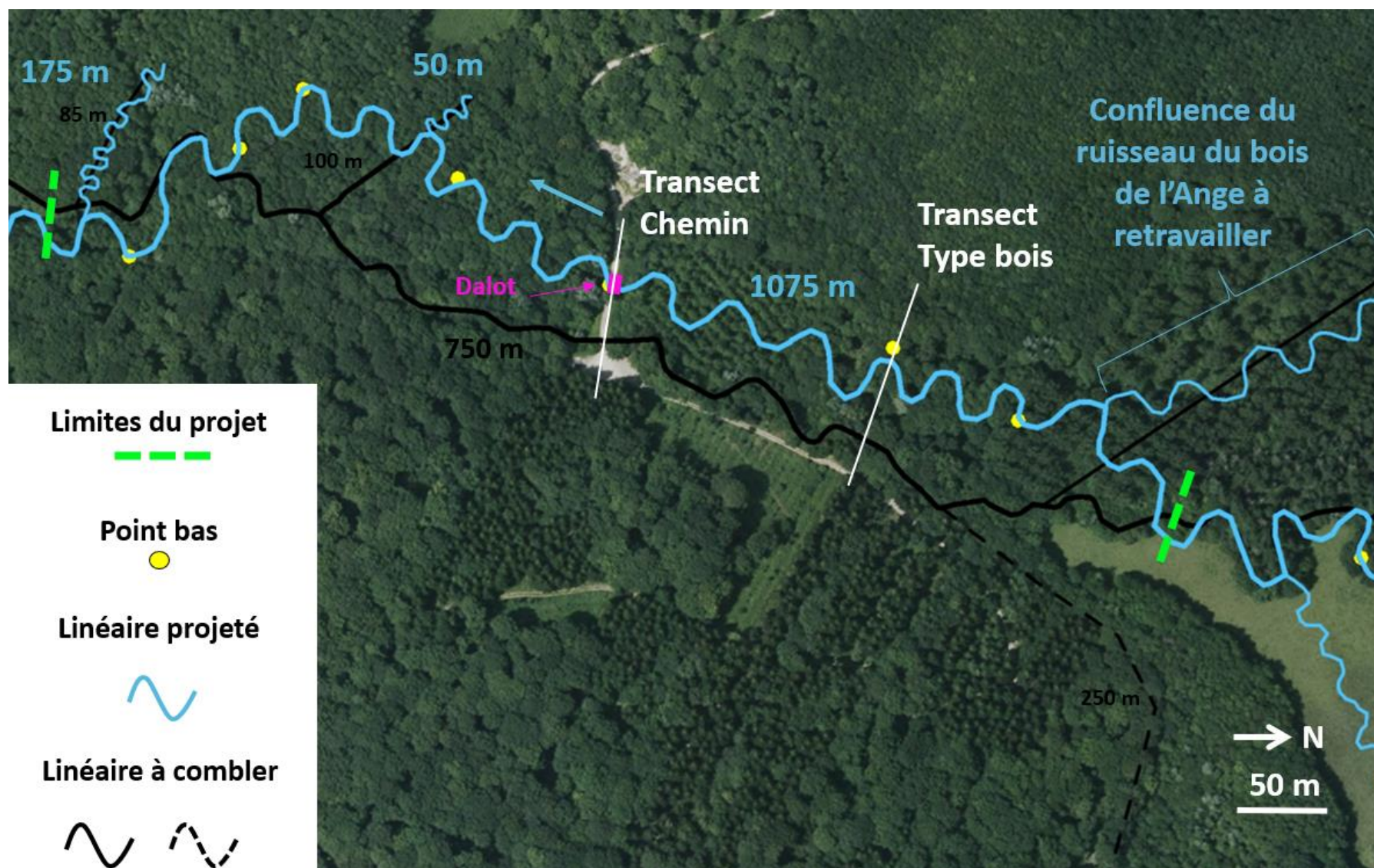


Figure 52 : Plan de masse du projet de restauration du Bénusse dans sa partie médiane boisée

Les merlons de curage encore présents seront dérasés et le fond de vallée reprofilé pour recentrer les écoulements dans le thalweg (Figure 53).

Le chemin actuel devrait être abaissé pour faciliter le passage des crues et un dalot serait à prévoir au niveau du lit projeté, afin d’assurer un passage à sec hors période de crues. Dans cette configuration le chemin serait inondé un peu plus fréquemment qu’actuellement (plus d’une fois tous les 2 ans, contre 1 fois par an actuellement cf rapport hydraulique joint). L’alternative consisterait à conserver le chemin en l’état et à implanter un dalot supplémentaire de décharge pour conserver l’inondabilité actuelle.

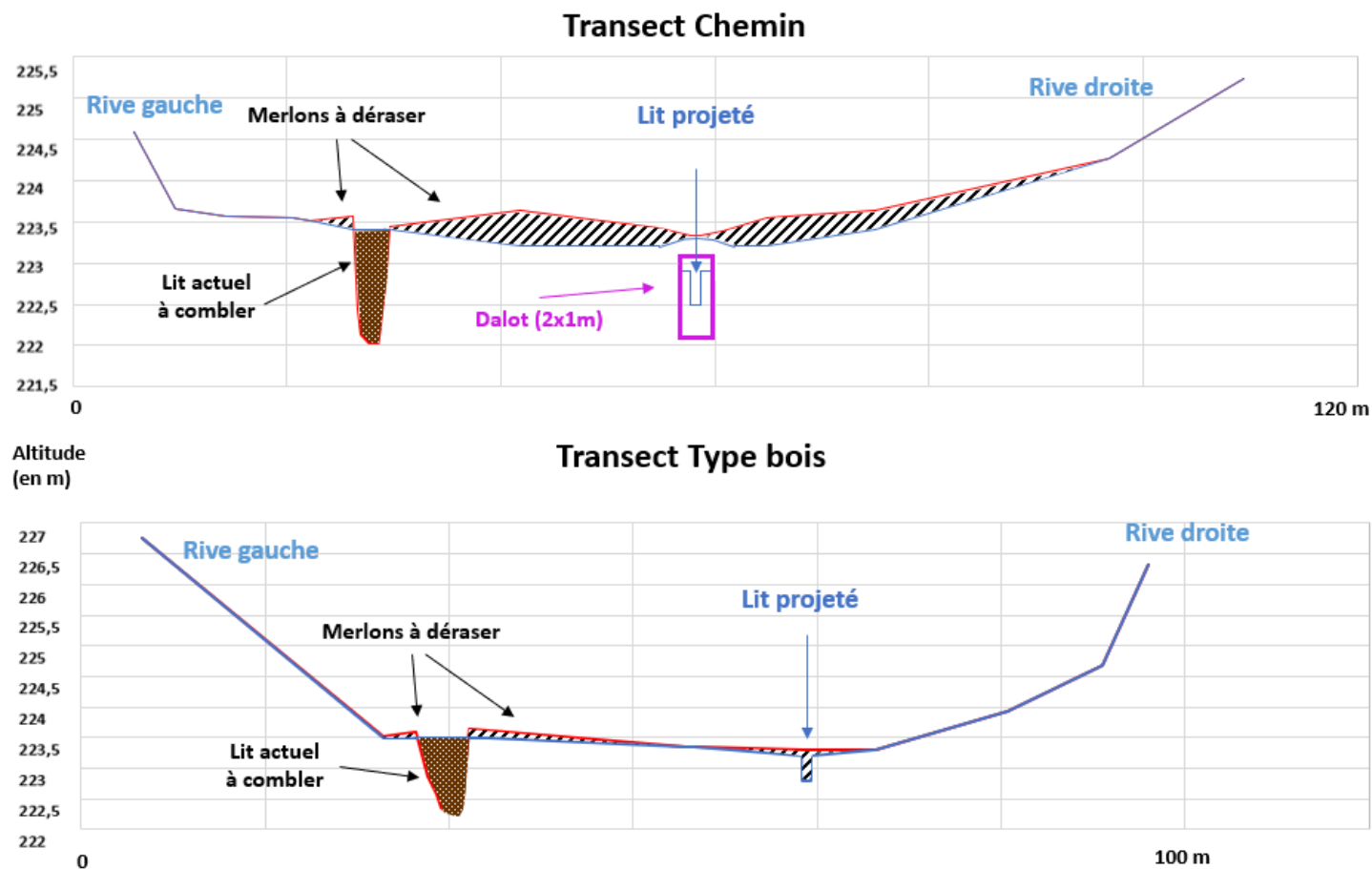


Figure 53 : Transects du chemin et type futurs du projet de restauration de la partie médiane boisée

9.1.3.3 Emprise foncière

Le projet de restauration du Bénusse sur ce secteur concerne essentiellement 35 parcelles, essentiellement privées, se partageant entre 51 propriétaires.

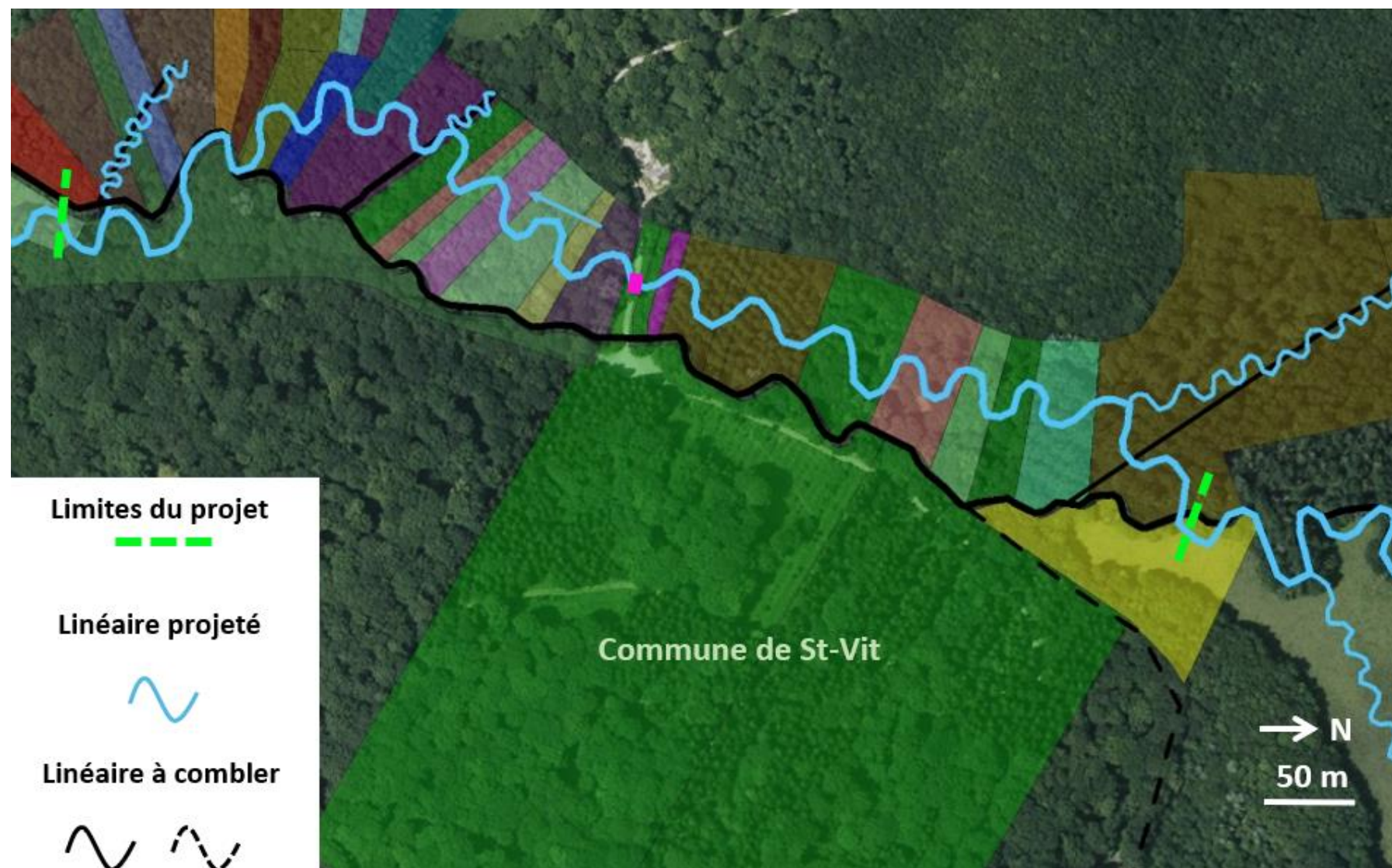
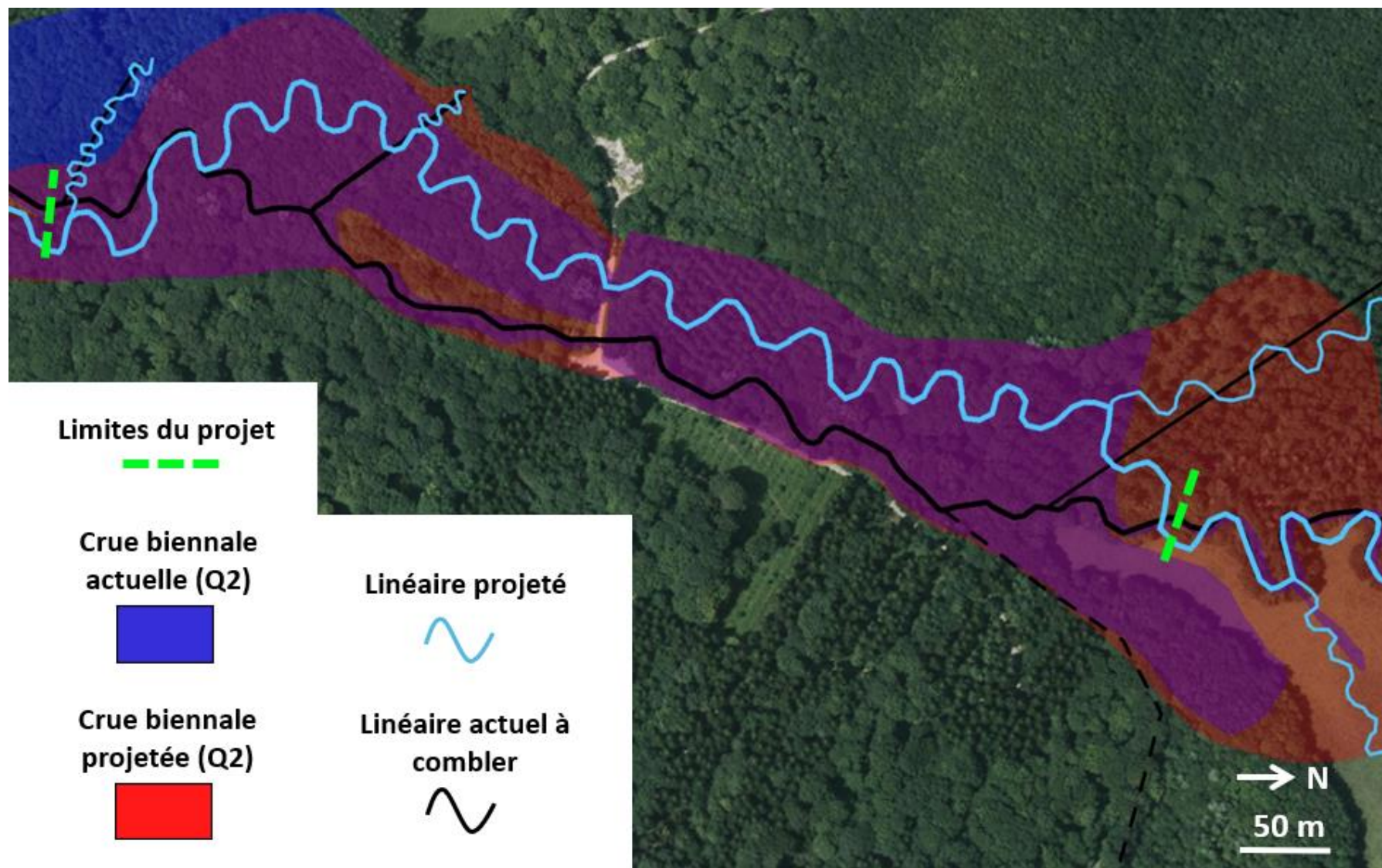


Figure 54 : Emprise foncière du projet de restauration du Bénusse dans sa partie médiane boisée

9.1.3.4 Impact hydraulique

Alors qu’actuellement la crue biennale se partage entre le lit perché et le thalweg, après travaux la totalité du fond de vallée sera inondée (Figure 55).



En crue décennale, le projet de restauration n’augmentera l’emprise d’inondation qu’à l’amont immédiat du secteur (Figure 56).

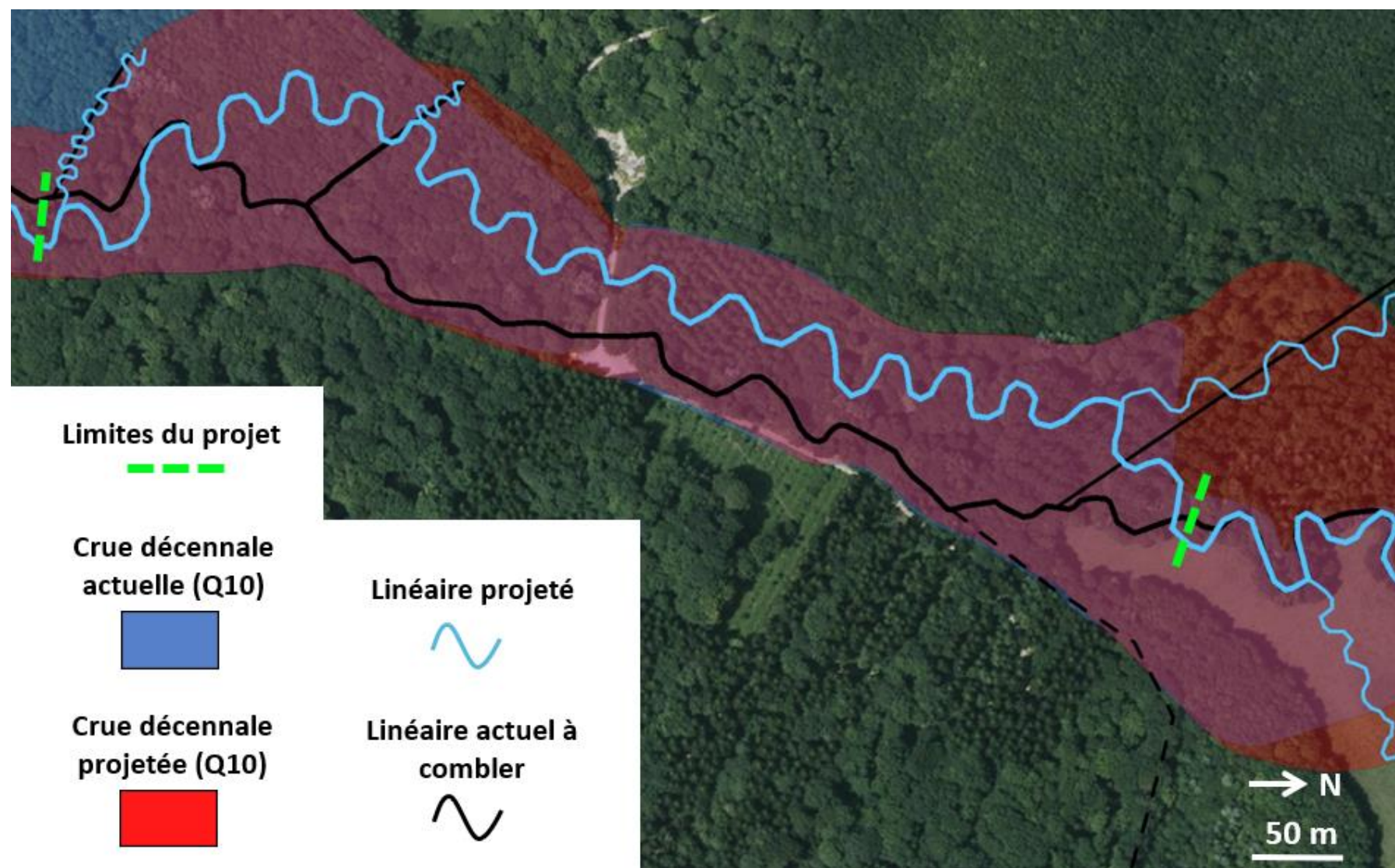


Figure 56 : Emprise actuelle et projetée de la crue décennale (Q10) dans la partie médiane boisée

En crue centennale, le projet n’entraînera aucune modification sensible sur l’emprise d’inondation qui touche déjà l’ensemble du fond de vallée (Figure 57).

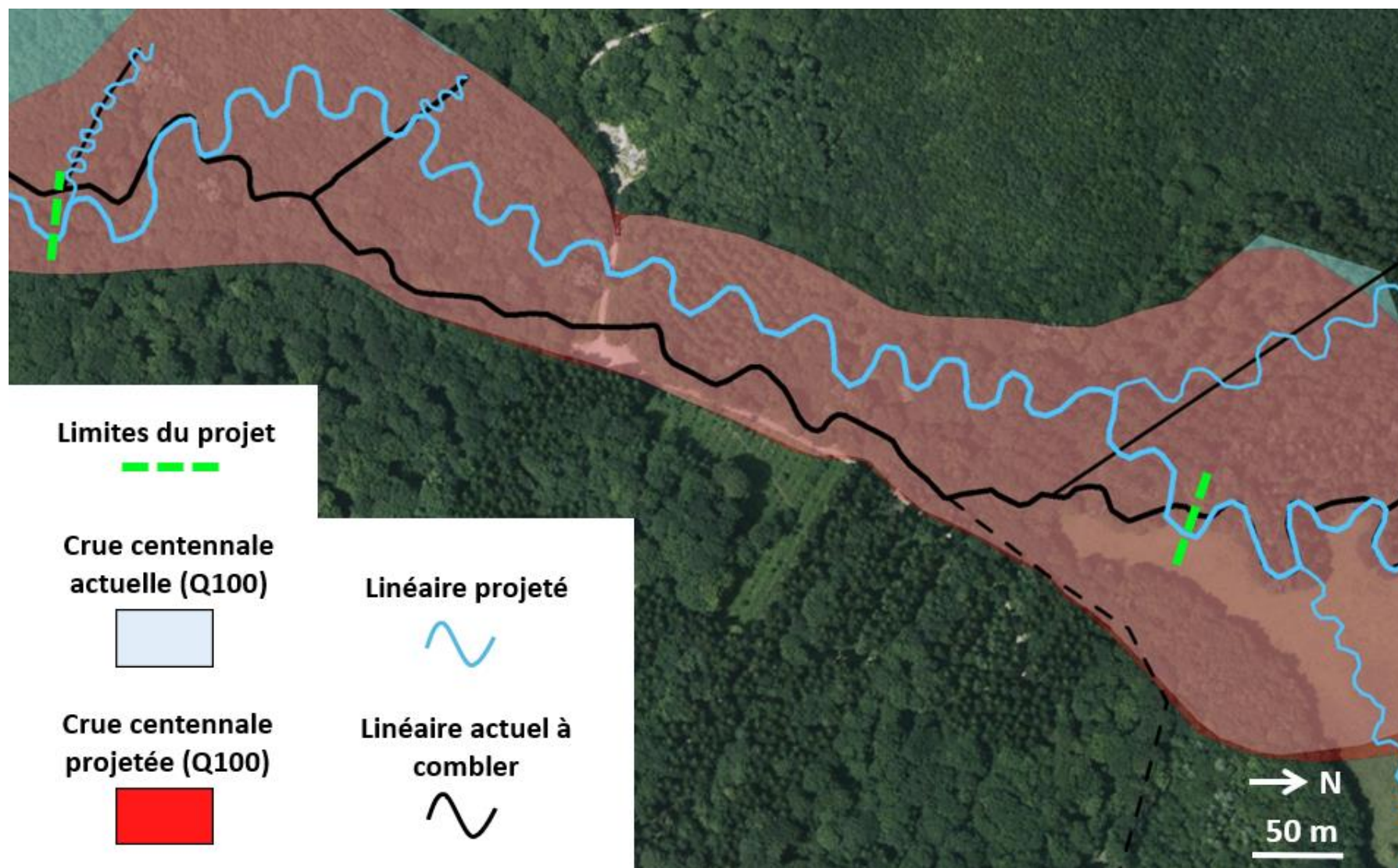


Figure 57 : Emprise actuelle et projetée de la crue centennale (Q100) dans la partie médiane boisée

9.1.3.5 Volumes à mobiliser et couts

L’essentiel des volumes et couts engendrés par un tel projet sont liés avant tout à l’achat de matériaux meubles nécessaires au comblement des chenaux surcreusés actuels (Tableau 3).

Une part non négligeable est également allouée au traitement de la végétation car près de 7Ha de bois doivent être abattus pour permettre le terrassement de la vallée.

En définitive, la restauration de la partie médiane du Bénusse s’élèverait à 319 000 € HT.

Tableau 3 : Synthèse des volumes et coûts généraux par opération

Opération	Nb/Linéaire/Surface/Volume	Total € HT
Mise en place chantier/remise en état/finition (forfait)	1	20 000
Traitement végétation (Ha)	6,5	52 000
Recharge sédimentaire en blocs/galets/graviers (m³)	250	25 000
Bouchons étanches (unité)	20	10 000
Terrassement in situ (m³)	7 500	37 500
Achat matériaux meubles éventuels (m³)	7 500	112 500
Lit guide méandriforme (m)	1 300	13 000
Dalot		20 000
Maitrise d’œuvre (10%)		29 000
TOTAL		319 000 € HT

9.1.4 Projet 4 : moulin Ringeard

9.1.4.1 Situation actuelle

A la sortie du bois, les débits du Bénusse se partagent entre une prise d’eau pour le moulin Ringeard et le chenal principal proche du thalweg. Une digue d’un ancien étang barre l’ensemble de la vallée au niveau de la restitution des canaux (Figure 58).

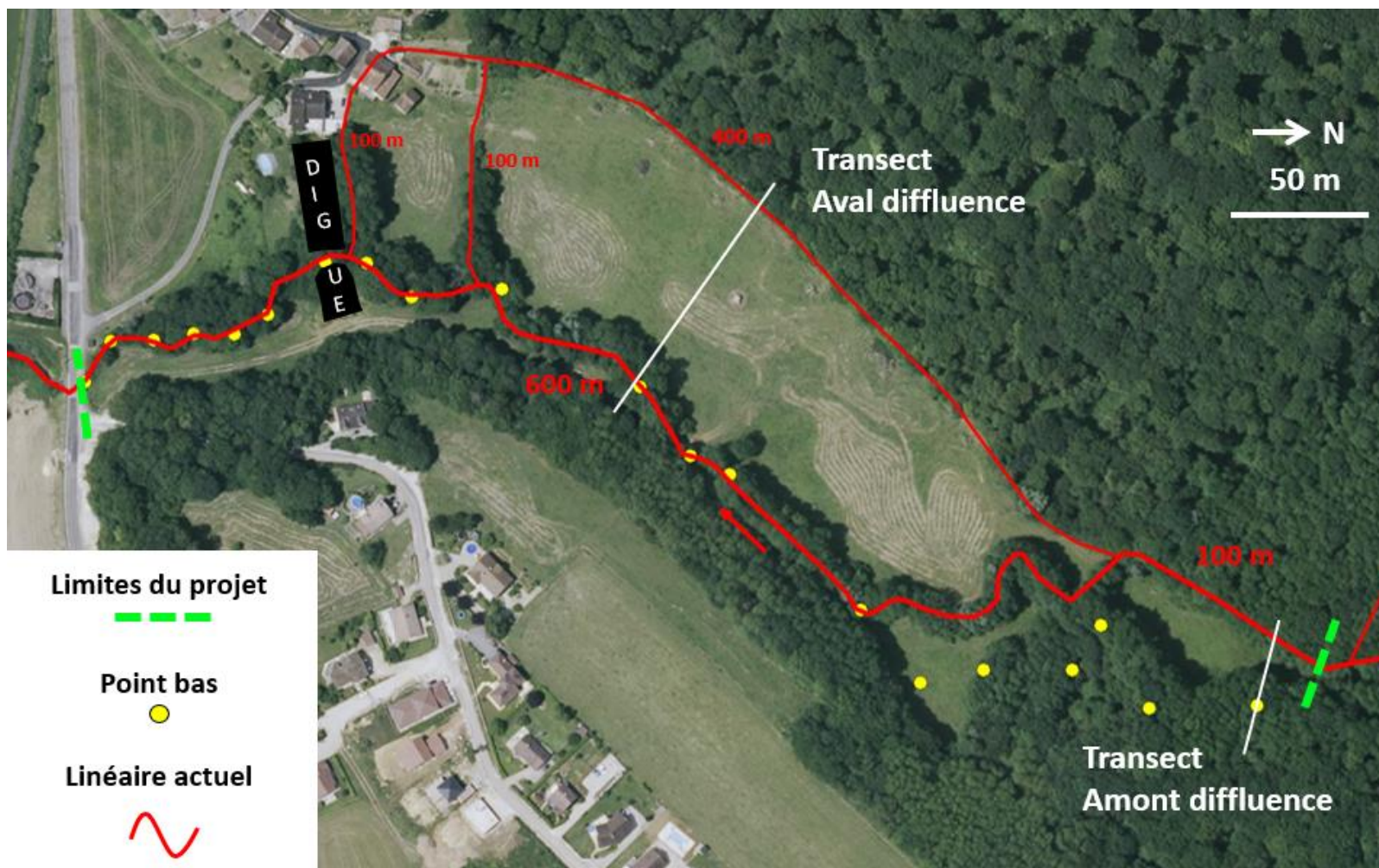


Figure 58 : Plan de masse de la situation actuelle du Bénusse au niveau du moulin Ringeard

Le canal actuel est perché et totalement homogène ; de la même manière, le Bénusse, incisé et surdimensionné, est dysfonctionnel. De plus, en amont de la diffluence, le Bénusse ne s’écoule pas dans son fond de vallée.

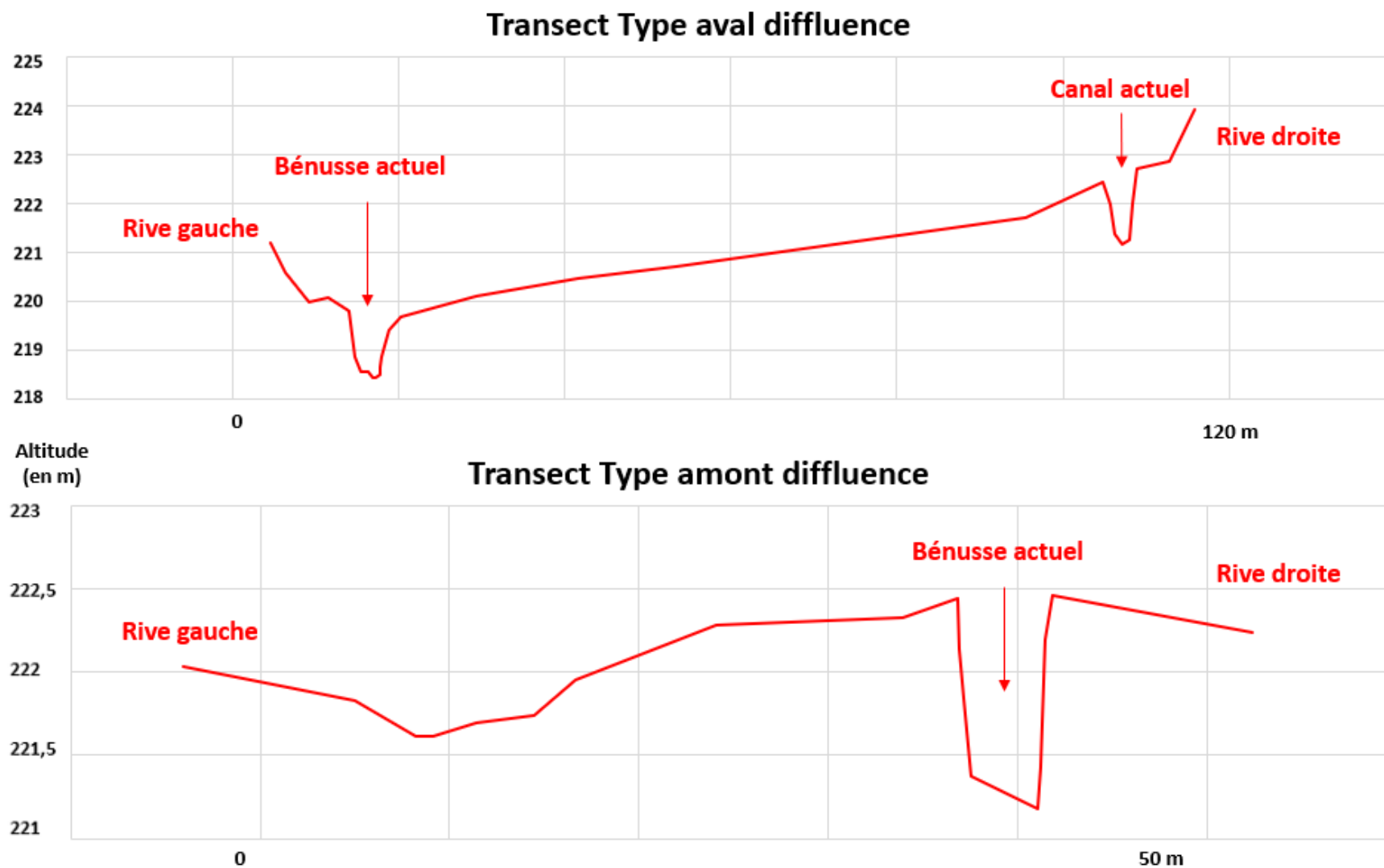


Figure 59 : Transects type actuels au niveau du projet au niveau du moulin Ringard

9.1.4.2 Détails des aménagements

Le projet à ce niveau consiste à supprimer au maximum le partage des débits afin de concentrer les écoulements dans un lit projeté méandrique s’écoulant dans le fond de vallée naturel (Figure 60). Sa réalisation permettrait de retrouver près de 1000 m de cours d’eau parfaitement fonctionnel.

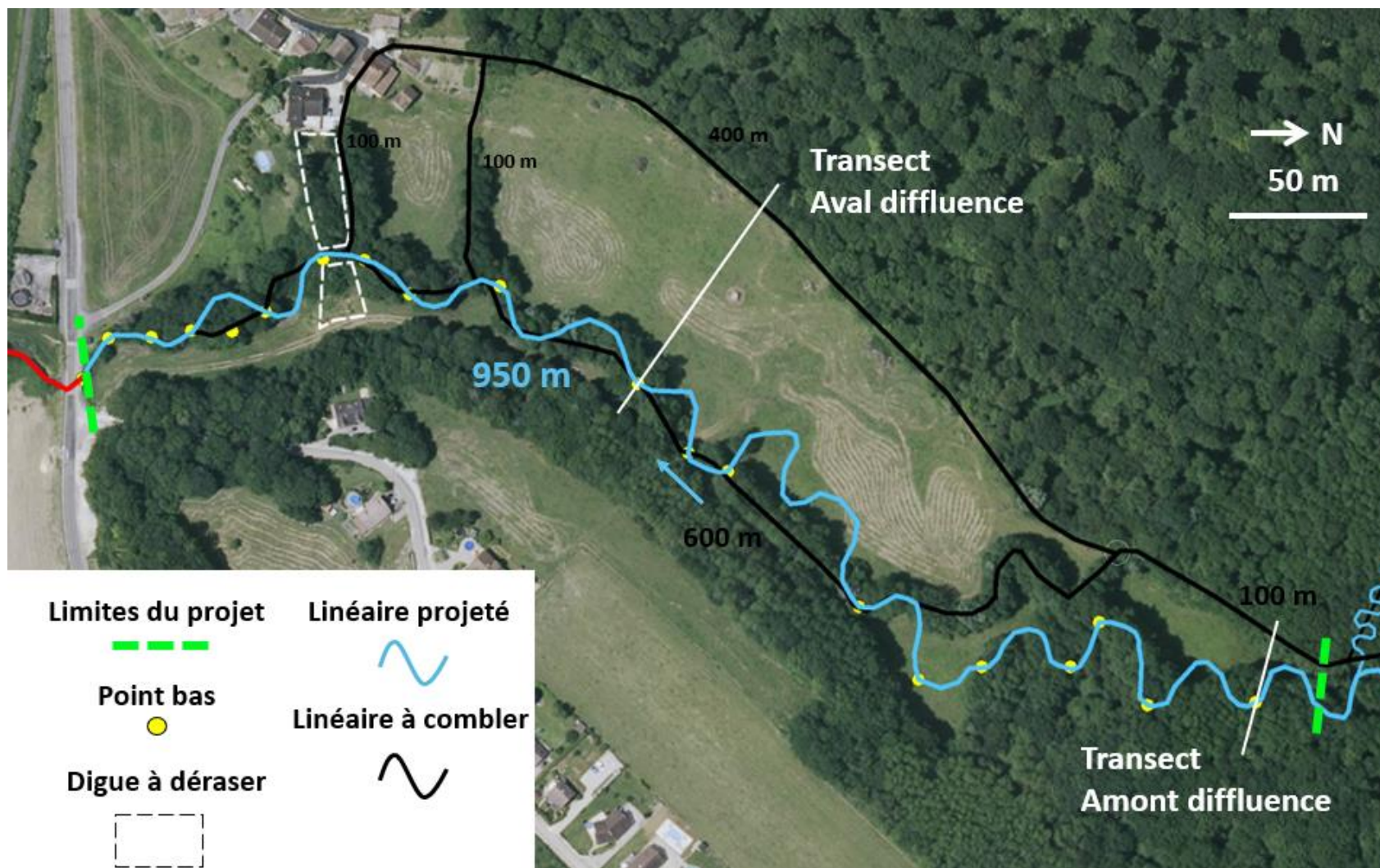
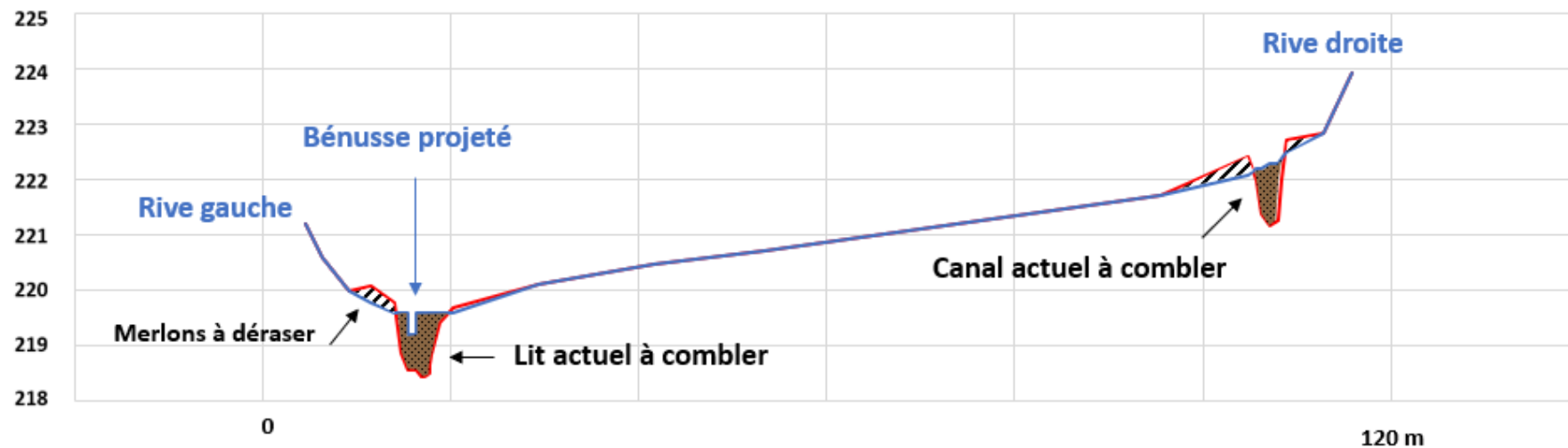


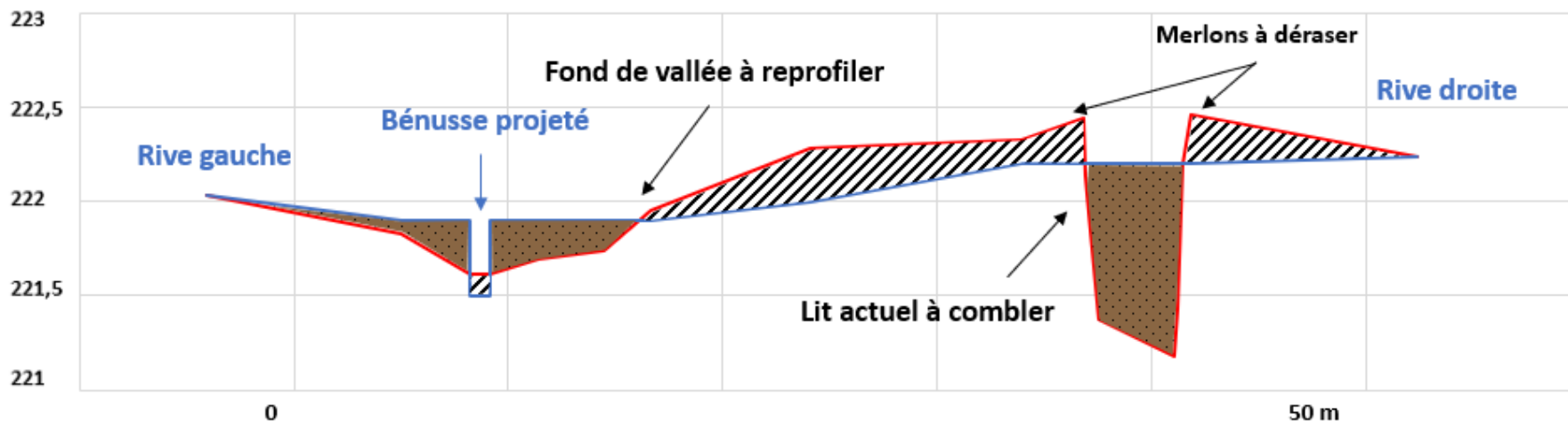
Figure 60 : Plan de masse du projet de restauration du Bénusse au niveau du moulin Ringeard

Pour ce faire, l’oblitération des chenaux actuellement dysfonctionnels doit être opérée (Figure 61). A l’amont de la diffluence, la vallée doit en outre être reprofilée pour assurer un profil en long cohérent avec le secteur médian boisé.

Transect Type aval diffluence



Transect Type amont diffluence



9.1.4.3 Emprise foncière

La réalisation des travaux liés à ce projet de restauration concerne 16 parcelles privées appartenant à 27 propriétaires.

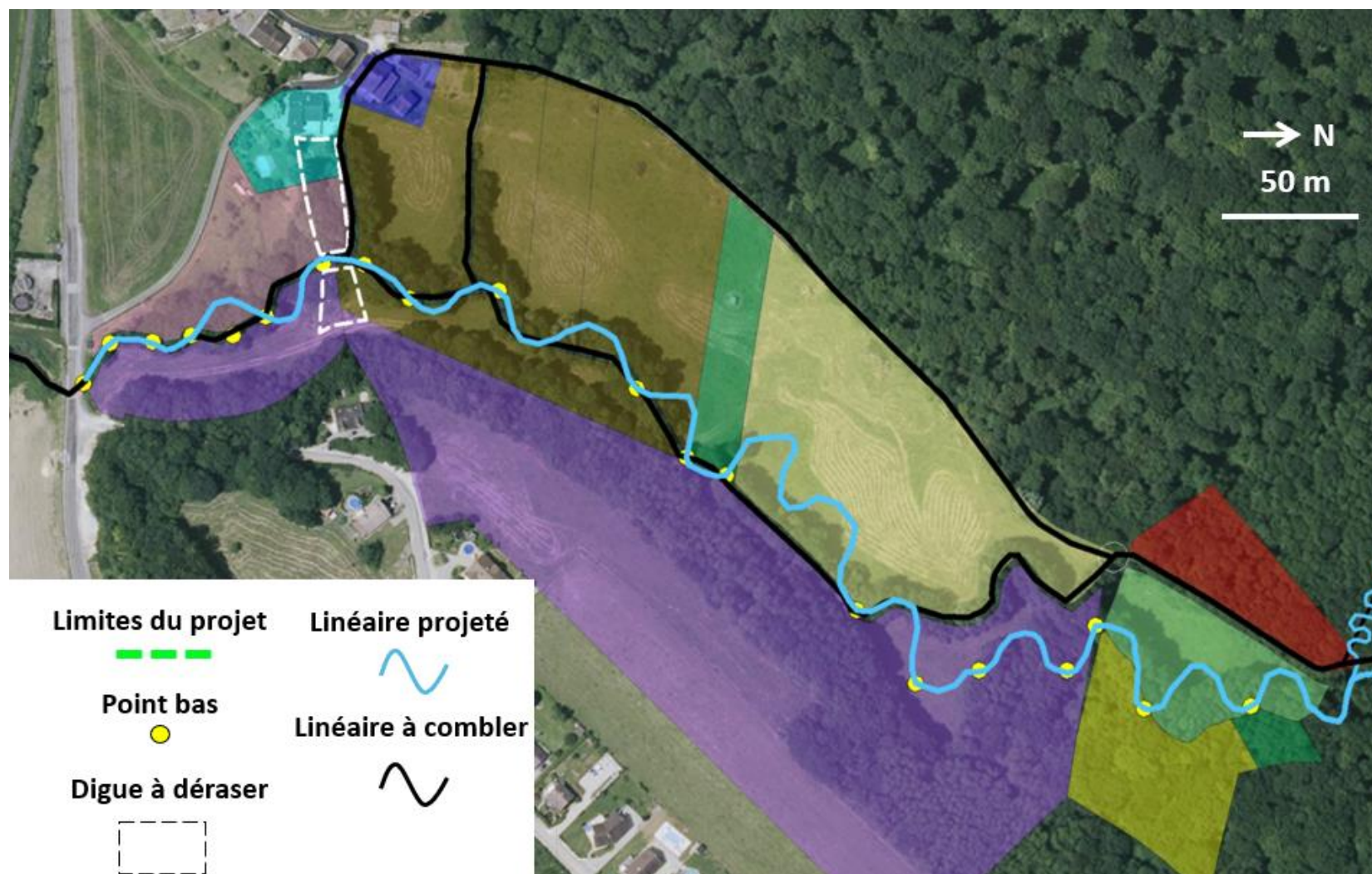


Figure 62 : Emprise foncière du projet de restauration du Bénusse au niveau du moulin Ringeard

9.1.4.4 Impact hydraulique

En crue biennale, les débordements auront une emprise plus importante du fait de la reconnexion du cours d’eau avec son lit majeur (Figure 63). Comme le canal actuel sera oblitéré, les parcelles sous-jacentes ne seront plus inondées par débordement. La suppression du déversoir partiellement délabré réduira l’emprise des crues en amont.

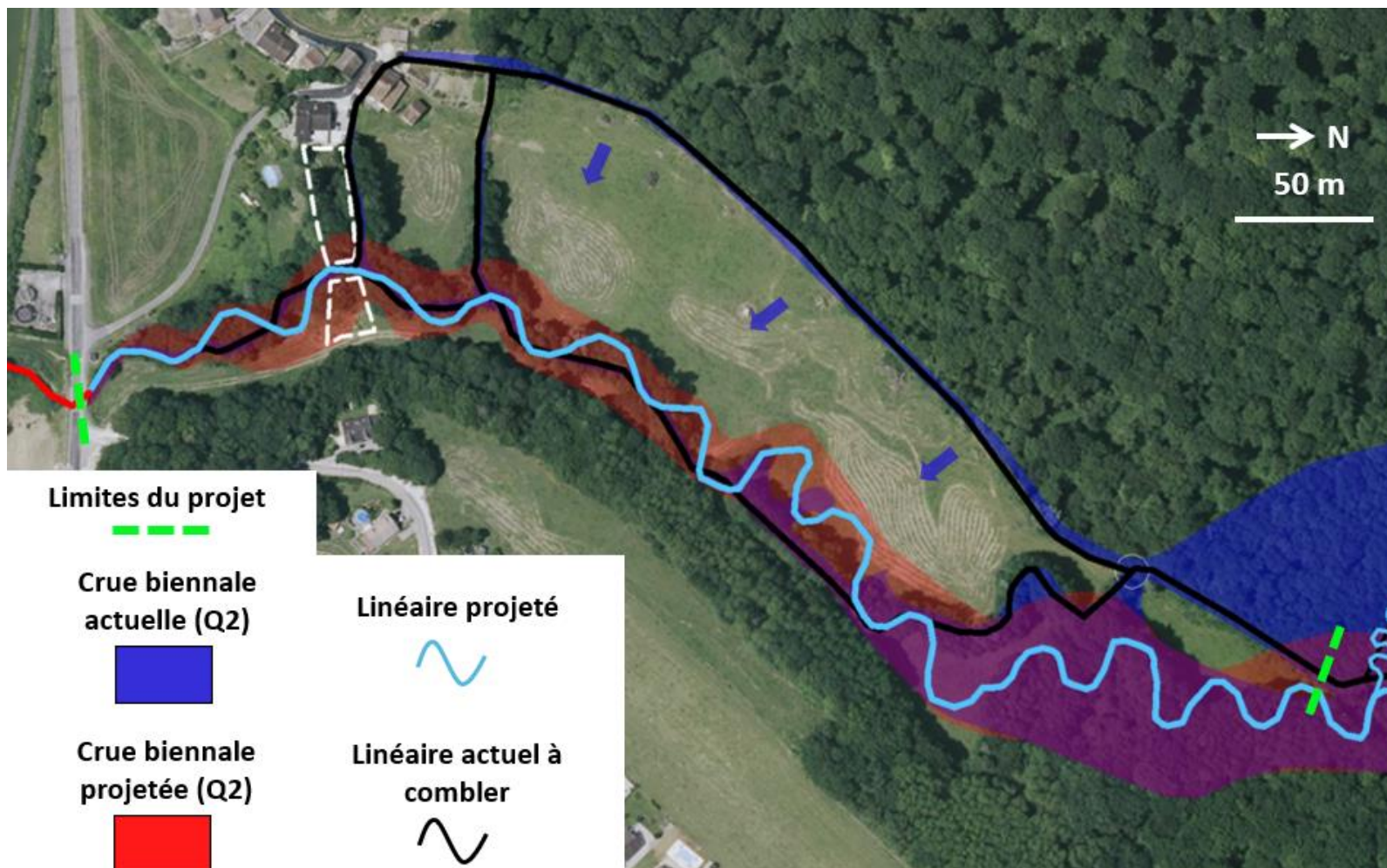


Figure 63 : Emprise actuelle et projetée de la crue biennale (Q2) au niveau du moulin Ringeard

De façon moins prononcée, l’emprise de la crue décennale sera également augmentée sans pour autant accroître l’aléa d’inondation pour les habitations proches (Figure 64).

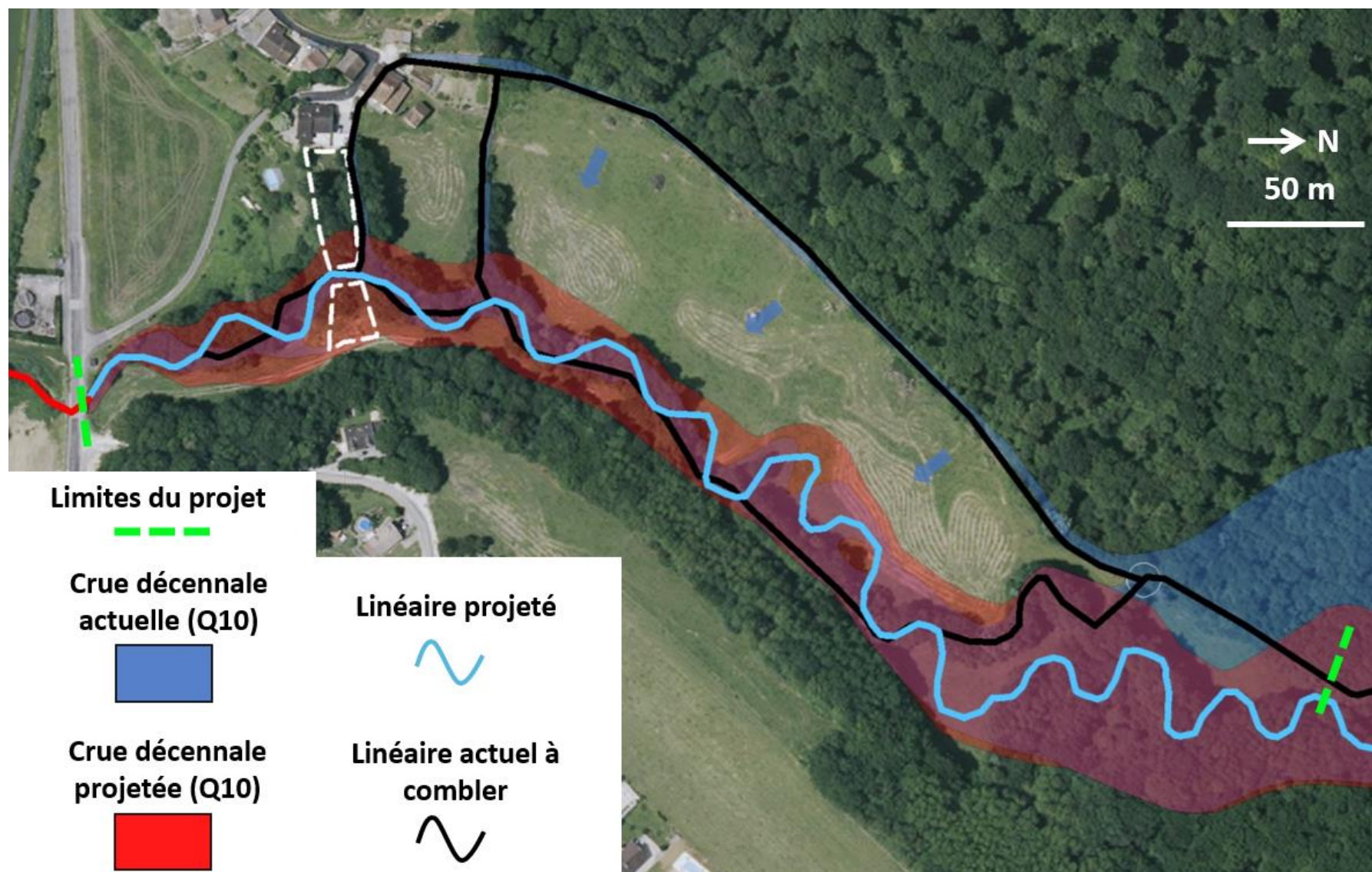


Figure 64 : Emprise actuelle et projetée de la crue décennale (Q10) au niveau du moulin Ringeard

En crue centennale, l’arasement de la digue entrainera la suppression du remous et de la surélévation des niveaux d’eau en amont (Figure 65).

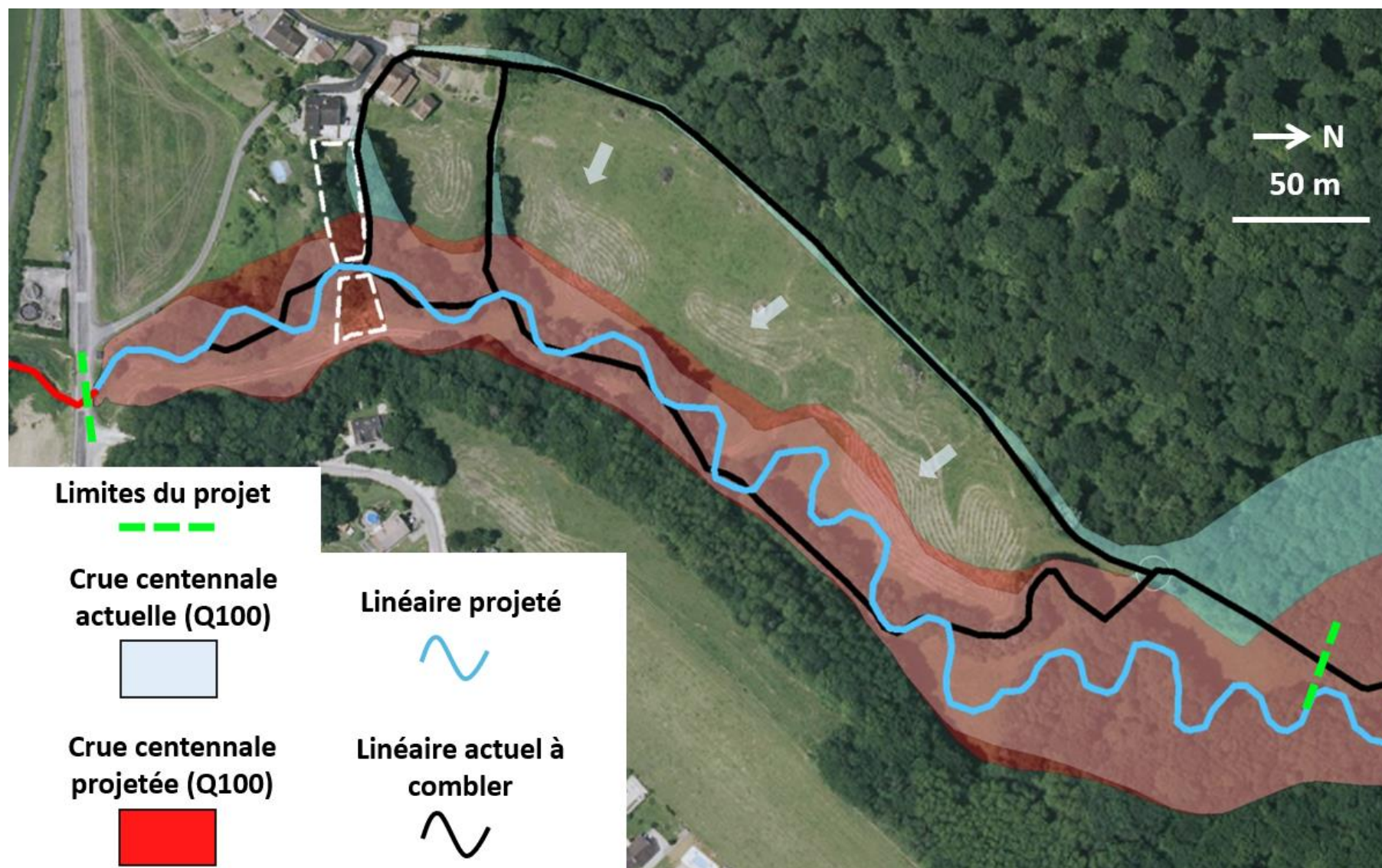


Figure 65 : Emprise actuelle et projetée de la crue centennale (Q100) au niveau du moulin Ringeard

9.1.4.5 Volumes à mobiliser et couts

L’essentiel des couts du projet est lié au terrassement et à l’achat de matériaux meubles éventuels (Tableau 4).

L’oblitération totale des canaux d’amenée et de fuite liés au moulin s’élèverait à près de 60 000 € en terrassement de matériaux meubles.

L’apport de ces matériaux pourrait entrainer un surcout de plus de 30 000 € en cas de refus des propriétaires d’araser la digue qui n’apporte, par ailleurs, aucune protection contre les inondations.

Tableau 4 : Synthèse des volumes et coûts généraux par opération

Opération	Nb/Linéaire/Surface/Volume	Total € HT
Mise en place chantier/remise en état/finition (forfait)	1	20 000
Traitement végétation (Ha)	2,5	20 000
Recharge sédimentaire en blocs/galets/graviers (m³)	270	27 000
Bouchons étanches (unité)	20	10 000
Terrassement in situ (m³)	8 000	40 000
Achat matériaux meubles éventuels (m³)	6 112	91 680
Lit guide méandrique (m)	950	9 500
Maitrise d’œuvre (10%)		21 815
TOTAL		240 000 € HT

10 Bibliographie

- Bravard, J. P., & Petit, F. (1997). Les cours d'eau - Dynamique du système fluvial. 222.
- Degiorgi, F., Raymond, J. C., Grandmottet, J. P., & Rivier, J. (2001). Echantillonnage de l'ichtyofaune lacustre : engin passifs et protocole de prospection. In INRA (Ed.), *Gerdeaux D., Gestion piscicole des grands plans d'eau* (pp. 151-182). Paris.
- Elliott, J.-M. (1976). The energetics of feeding, metabolism and growth of brown trout (*Salmo trutta* L.) in relation to body weight, water temperature and ration size. *Journal of Animal Ecology*, 45(3), 923-948.
- Lefort, P. (2018). *Morphodynamique fluviale - Approche théorique et expérimentale* (P. D. L. é. N. D. P. E. Chaussées Ed.).
- Malavoi, J.-R., & Bravard, J. P. (2010). *Elements d'hydromorphologie fluviale* (ONEMA Ed.).
- Ministère de l'Environnement. (2016). *Guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau)*.
- Nisbet, M., & Verneaux, J. (1970). Composantes chimiques des eaux courantes. Discussion et proposition de classes en tant que bases d'interprétation des analyses chimiques. *Annales de Limnologie*, 6(2), 161-190.
- Ott, F. (2008). Diagnose hydroécologique du ruisseau du Bénusse - Définition d'un état initial. 125.
- SIALIS. (2011). Observatoire de la qualité des eaux du Morvan - Suivi de l'impact des actions du contrat global "Cure-Yonne" (pp. 106).
- Teleos Suisse. (2010). Expertise de l'état des masses d'eau : cours d'eau du bassin Seine Amont (pp. 31p): Agence de l'Eau Seine Normandie.
- Verneaux, J. (1973). *Recherches écologiques sur le réseau hydrographique du Doubs : Essai de biotypologie*. (Doctor), Université de Besançon.