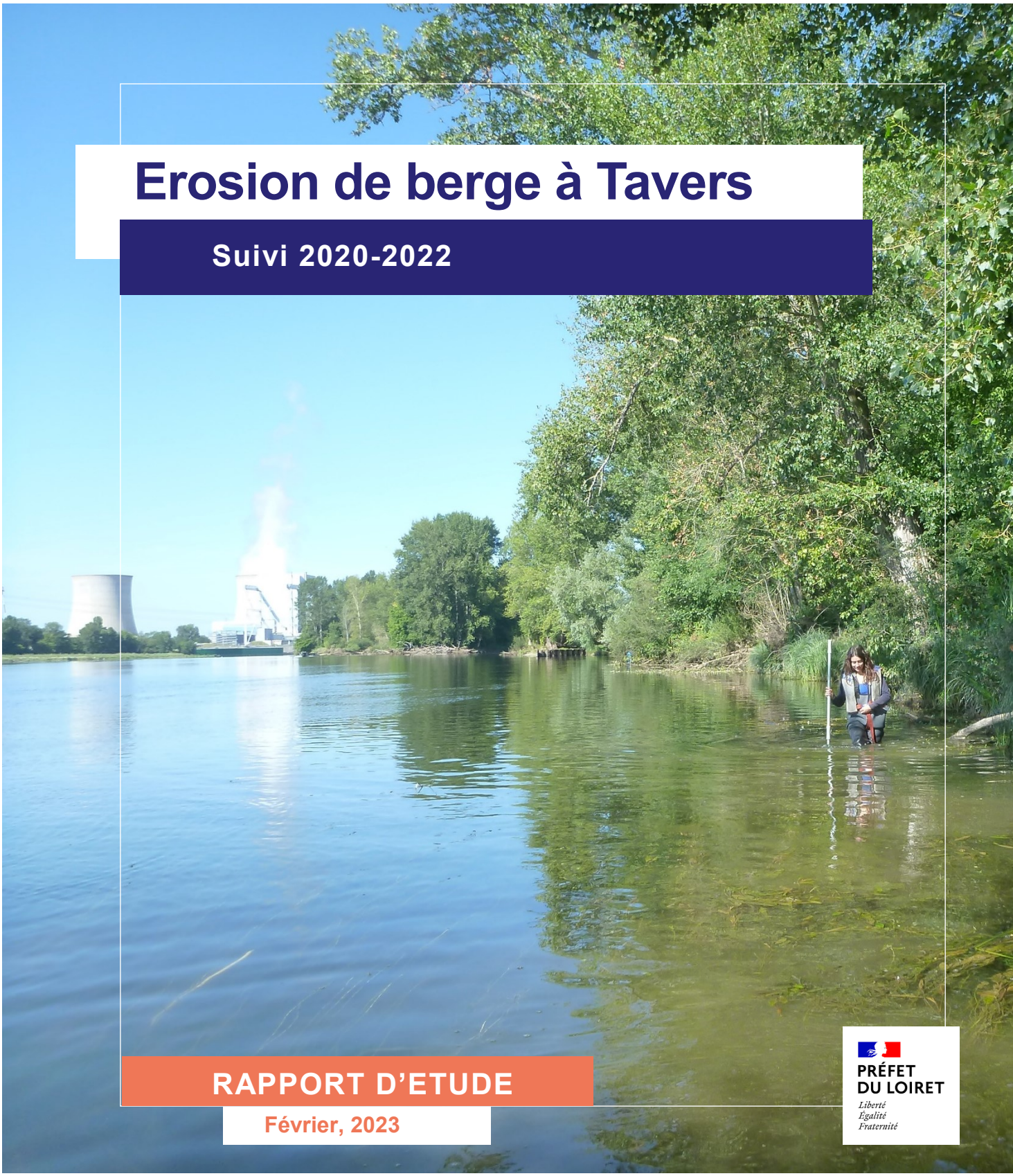
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Cerema
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN



Erosion de berge à Tavers

Suivi 2020-2022

RAPPORT D'ETUDE

Février, 2023

PRÉFET DU LOIRET
Liberté
Égalité
Fraternité

Produit conçu avec le système de management de la qualité certifié AFAQ ISO 9001

Le Cerema est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique, présent partout en métropole et dans les Outre-mer grâce à ses 26 implantations et ses 2 400 agents. Détenteur d'une expertise nationale mutualisée, le Cerema accompagne l'État et les collectivités territoriales pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires par l'élaboration coopérative, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport. Doté d'un fort potentiel d'innovation et de recherche incarné notamment par son institut Carnot Clim'adapt, le Cerema agit dans **6 domaines d'activités** : **Expertise & ingénierie territoriale**, **Bâtiment**, **Mobilités**, **Infrastructures de transport**, **Environnement & Risques**, **Mer & Littoral**.

Site web : www.cerema.fr

Erosion de berge à Tavers

Suivi 2020-2022

Commanditaire : Direction Départementale des Territoires du Loiret (DDT 45)

Auteur : Coraline Wintenberger

Responsable du rapport

Coraline WINTENBERGEROM – Agence de Blois – Groupe Risques Inondations - Surveillance des Ouvrages et des Milieux (GRISOM)
Tél. : +33(0) 2 54 55 49 52 – Mob. : +33(0) 6 64 00 65 20
Courrier : coraline.wintenberger@cerema.fr
Direction Normandie-Centre – Agence de Blois – 11 rue Laplace / 41000 BLOIS

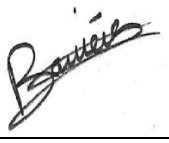
Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
V1	06/02/2023	Première version envoyée à la DDT45
V2	01/06/2023	Corrections de la DDT45

Références

N° d'affaire : 20-NC-0228

Partenaires : DDT 45

Nom	Service	Rôle	Date	Visa
Wintenberger	Responsable d'activité Surveillance des Ouvrages et des Milieux – GRISOM	**Auteur principal**	10/02/2023	
Garnier	Hydrographe – GRISOM	Contributeur		
Barrière	Cheffe de groupe – GRISOM	Relecteur	10/02/2023	

Résumé de l'étude

Un effondrement de berge de la Loire, survenue sur la commune de Tavers, menace l'Itinéraire Loire à vélo dont le CD 45 est gestionnaire. Cet effondrement se localise en rive droite et en amont immédiat de la prise d'eau du Centre Nucléaire de Production d'Electricité (CNPE) de Saint-Laurent-des-Eaux. Dans ce cadre, la Direction Départementale des Territoire du Loiret a sollicité le Cerema pour réaliser une étude de caractérisation de la morphodynamique de la Loire dans ce secteur.

La caractérisation de la morphodynamique s'est appuyée sur une actualisation de la connaissance de l'évolution morphologique de ce secteur de la Loire par rapport à 2008 et sur des mesures de bathymétrie, topographie et courantométrie effectuées pour différentes conditions de débit en février, juin et juillet 2020.

Les résultats montrent que l'effondrement de berges est lié à la configuration morphologique locale, notamment la spécificité de la connexion entre les chenaux principaux/secondaires et la morphologie des berges en rive droite. Les résultats montrent également que la végétation ligneuse sur la rive droite est un facteur aggravant le risque d'effondrement.

Mots-clés

Effondrement de berge
Loire
Mesures hydrographiques
Evolution morphologique
Végétation ligneuse

Statut de communication de l'étude

Les études réalisées par le Cerema sur sa subvention pour charge de service public sont par défaut indexées et accessibles sur le portail documentaire du Cerema. Toutefois, certaines études à caractère spécifique peuvent être en accès restreint ou confidentiel. Il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude.

☐ Accès libre : document accessible au public sur internet

☑ Accès restreint : document accessible uniquement aux agents du Cerema

☐ Accès confidentiel : document non accessible

Cette étude est capitalisée sur la plateforme documentaire CeremaDoc, via le dépôt de document : https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx

Cadre de référence des mesures hydrographiques

Les mesures réalisées par l'équipe de Surveillance des Ouvrages et des Milieux (SOM) du Cerema sont assurées par des hydrographes dont les compétences sont reconnues auprès de l'Association Francophone d'Hydrographie (AFHy). Les analyses sont assurées par la responsable de l'activité Surveillance des Ouvrages et des Milieux, docteure en morphodynamique fluviale.

Les levés bathymétriques respectent au minimum les recommandations de la classe de produit 1b de la Norme OHI (S-44), norme hydrographique de référence internationale qui décrit les exigences minimales en termes de qualité et d'incertitudes concernant les levés hydrographiques. L'équipe s'appuie à la fois sur le « Guide Du Shom Pour La Réalisation Des Levés Hydrographiques » (Service hydrographique et océanographique de la marine, 2019) pour la conduite des levés et sur les « Recommandations pour la conduite d'un levé bathymétrique réalisé dans le domaine portuaire, côtier ou fluvial » publiées et tenues à jour par l'AFHy (association pour la promotion de l'hydrographie) dont l'application dans l'ensemble des services doit permettre de donner le statut de règles de l'art à ces recommandations et d'unifier la profession dans ces pratiques. Notamment, les levés bathymétriques respectent, en plus de la classe 1b de la norme S-44, la classe de produit « évolution des fonds 1 » proposée dans les recommandations de l'AFHy, basée sur la Norme OHI (S-44).

Le Cerema est membre de la Société Hydrotechnique de France (SHF), société savante œuvrant pour le partage des connaissances, l'innovation et la prospective dans les domaines des sciences et de l'ingénierie de l'eau assurant à l'équipe SOM un accès à l'évolutions des savoirs scientifiques et techniques dans ses domaines d'expertise. L'équipe est également membre du réseau de professionnels Groupe Doppler Hydrométrie (GDH), lié à la SHF, à l'origine de la publication du guide Mesures hydrologiques par profileur Doppler (*aDcp*)[1] auquel se réfère l'équipe SOM pour les mesures *aDcp*.

[1] Le Coz J., Pierrefeu G., Saysset G., Brochot J.-F., Marchand P. Mesures hydrologiques par profileur Doppler (aDcp). Paris : Ed. Quæ, 2008. 155 p. ISBN :978-2-7592-0286-7

Sommaire

1 PRESENTATION DE L'ETUDE 10
1.1 Contexte de l'étude 10
1.2 Approche méthodologique 11
1.2.1 Evolution hydromorphologique du secteur et végétalisation du lit 11
1.2.2 Morphodynamique du secteur d'effondrement de berge 12
1.2.3 Caractérisation et analyse des effondrements 13
2 CAMPAGNE DE MESURES 14
2.1 Méthodologie utilisée 14
2.2 Unités et qualité des mesures 14
2.2.1 Unités 14
2.2.2 Qualité du système de positionnement 14
2.3 Descriptif des équipements 15
2.3.1 Moyens nautiques 15
2.3.2 Systèmes de positionnement des mesures 15
2.4 Système d'acquisition hydrographique 16
2.4.1 Mesures bathymétriques 16
2.4.2 Mesures courantométriques 16
2.5 Conditions hydrologiques et hydrauliques des levés 17
3 RESULTATS 18
3.1 Hydrologie et hydraulique 18
3.1.1 Evolution des débits entre 1863 et 2022 18
3.1.2 Lignes d'eau : étiage, module, hautes eaux 19
3.1.3 Vitesses et directions des écoulements 23
3.2 Morphologie 27
3.2.1 Evolution de la forme en plan 27
3.2.2 Evolution des fonds et morphologie actuelle 30
3.2.3 Morphologie des berges rive droite et encoche d'érosion 33
3.3 Végétation ligneuse 36
3.3.1 Evolution de la végétalisation du lit 36
3.3.2 Végétation des berges rive droite et embâcles 42
4 SYNTHESE ET CONCLUSION 44
5 Références 46
6 Annexes 47
6.1 ANNEXE 1 – Cartographies 48
6.1.1 Agrandissement Illustration 2 : profils de mesures 2016 et 2020 ; identification des secteurs et unités morphologiques 48

6.1.2 Agrandissement Illustration 3 : profils bathymétriques 2016, points topo-bathymétriques réels et projetés 2020 49
6.2 ANNEXE 2 – Matériel utilisé 50
6.2.1 Moyens nautiques de l'équipe SOM 50
6.2.2 Système de positionnement hydrographique et topographique de l'équipe SOM 51
6.2.3 Systèmes d'acquisition hydrographique de l'équipe SOM 52
6.3 ANNEXE 3 – Glossaire des sigles et abréviations 54

Index des illustrations

Illustration 1 : localisation du secteur d'effondrement de berge sur la commune de Tavers. 10
Illustration 2 : localisation des profils de mesures de 2016 et 2020 ; identification des secteurs et unités morphologiques cités dans ce document (agrandissement ANNEXE 1 – Cartographies). 11
Illustration 3 : profils bathymétriques 2016, points topo-bathymétriques réels et projetés sur les profils théoriques 2020 (agrandissement ANNEXE 1 – Cartographies). 12
Illustration 4 : trajectoires des lignes d'eau pour les deux conditions de debit renseignées. 13
Illustration 5 : embarcation pneumatique Sillinger 380um avec le trimaran deployé à couple portant l'*aDcp*. 15
Illustration 6 : schéma de principe de la mesure avec un echosondeur monofaisceau. 16
Illustration 7 : schéma de principe de la mesure avec un courantomètre à effet *Doppler*. 16
Illustration 8 : courbes des écarts cumulés de la moyenne annuelle au module, valeur ancienne (361 $m^3.s^{-1}$) et valeur actuelle (355 $m^3.s^{-1}$). 18
Illustration 9 : lignes d'eau d'étiage entre 1978 et 2018 entre les îles de Mareau-aux-Prés a l'aval d'Orleans et Blois. 20
Illustration 10 : a) comparaison des lignes d'eau correspondant au module de 1998 et 2020 ; b) lignes d'eau mesurées en 2020 dans le chenal secondaire (P5) et le chenal principal (P6) du site d'étude. Le r^2 correspond à la droite de tendance linéaire tracée pour chaque ligne d'eau. 21
Illustration 11 : a) comparaison des lignes d'eau correspondant aux hautes eaux de 2008, 2012 et 2020 ; b) lignes d'eau mesurées en 2020 dans le chenal secondaire (P5) et le chenal principal (P6) du site d'étude. Le r^2 correspond à la droite de tendance linéaire tracée pour chaque ligne d'eau ; c) comparaison des lignes d'eau mesurees – module et hautes eaux – dans le chenal principal et le chenal secondaire en 2020. 22
Illustration 12 : amplitude et repartition des vitesses moyennes pour chaque section de mesure (p1 : profil 1 ; p2cp : profil 2 chenal principal ; p2cs : profil 2 chenal secondaire ; p3cp : profil 3 chenal principal ; p3cs : profil 3 chenal secondaire ; p4 : profil 4) pour les debits correspondant au module et hautes eaux. 24
Illustration 13 : repartition des vitesses sur la section du profil 2 pour deux conditions de debit (module ; hautes eaux) et intensite des courants transverses associes. la profondeur et la largeur de la section varient selon le debit, les echelles d'ordonnees et d'abscisses sont differentes entre les deux campagnes. 25
Illustration 14 : repartition des vitesses sur la section du profil 3 dans le chenal secondaire pour deux conditions de debit (module ; hautes eaux) et intensite des courants transverses associes. la profondeur et la largeur de la section varient selon le debit, les echelles d'ordonnees et d'abscisses sont differentes entre les deux campagnes. 25
Illustration 15 : vitesses transverses, a differentes profondeurs, dans le chenal secondaire pour deux conditions de debit (module, hautes eaux). la largeur de section varie selon le debit, l'echelle des abscisses est differente entre les graphiques. 26
Illustration 16 : evolution de la morphologie en plan de la loire a l'amont de la centrale saint-laurent des eaux. . 28
Illustration 17 : evolution de la morphologie en plan de la loire du tronçon aval a l'amont de la centrale saint-laurent-des-eaux. 29
Illustration 18 : panneau de fond mis a jour par l'erosion de berge de l'ile « e », prise de vue vers l'amont le 19/02/2020. 30
Illustration 19 : profils transversaux topo-bathymetriques p1, p2 et p3 de 2020 et comparaison avec les profils en travers 2016. les croix noires sont les points issus des profils en long p5 et p6 a l'intersection avec les profils en travers. 31
Illustration 20 : profils en long bathymetriques du chenal principal (p6) et du chenal secondaire (p5) en 2020. les croix noires sont les points issus des profils en travers p2 et p3, les croix bleues sont les points issus des profils en travers dreal 2016 a l'intersection avec les profils en long. 32
Illustration 21 : profils topographiques complementaires des berges en rive droite. 33
Illustration 22 : a) localisation des points et des profils leves sur l'encoche d'erosion principale ; b) profils topographiques de l'encoche d'erosion principale ; c) profil topographique du haut de berge de l'encoche d'erosion principale. 34
Illustration 23 : a) coupe de la berge en erosion ; b) zoom sur la partie sommitale abrupte ; c) zoom sur les sediments en partie inferieure. 35
Illustration 24 : secteurs et unites morphologiques cibles pour l'analyse de la dynamique de colonisation par la vegetation. 36
Illustration 25 : evolution et vegetalisation de la barre sedimentaire rive droite du secteur 1. l'orientation des photographies et l'echelle sont differentes entre chaque photographie ; les photographies du siel sont orientees avec le nord vers le haut. 37
Illustration 26 : a) difference de configuration morphologique de la berge rive gauche entre 1968 et 2020 ; b) developpement et vegetalisation des barres sedimentaires « a » et « b » en rive gauche. l'orientation des photographies et l'echelle sont differentes entre chaque photographie ; les photographies du siel sont orientees avec le nord vers le haut. 39

Illustration 27 : evolution des ilots « c », « d » et « e » du secteur 3 entre 1968 et 2020. l'orientation des photographies et l'echelle sont differentes entre chaque photographie ; les photographies du siel sont orientees avec le nord vers le haut. 40
Illustration 28 : vegetalisation et evolution des ilots a l'entree du chenal secondaire, au droit des panneaux de fond, entre 1968 et 2020. l'orientation des photographies et l'echelle sont differentes entre chaque photographie ; les photographies du siel (2005, 2015, 2020) sont orientees avec le nord vers le haut. 41
Illustration 29 : exemples d'arbres en berge rive droite penches au-dessus de la riviere avec risque de chute dans le chenal secondaire. 42
Illustration 30 : exemples de systemes racinaires d'arbres mis a nu en berge rive droite du chenal secondaire. 43
Illustration 31 : exemple de troncs d'arbres tombes dans le chenal secondaire et d'accumulation de branchages en berge. la photographie a gauche est prise au droit de l'erosion de berge. les fleches blanches materialisent le sens de l'ecoulement, « rd » la rive droite. 43

Index des tableaux

Tableau 1 : dates des mesures des lignes d'eau et débit moyen journalier associé à la station de Blois. 19
Tableau 2 : pente de la berge rive droite et différence d'altitude entre le haut de berge et le niveau d'eau d'étiage (Q_{Blois}=115 $m^3.s^{-1}$) au droit des profils topo-bathymétriques et topographiques complémentaires présentés d'amont en aval..... 33

1 PRESENTATION DE L'ETUDE

1.1 Contexte de l'étude

Au premier trimestre 2018, le Conseil Départemental du Loiret (CD 45) signalait à la Direction Départementale des Territoires du Loiret (DDT 45) des effondrements de berge de la Loire en rive droite (Illustration 1), sur la commune de Tavers, menaçant l'Itinéraire Loire à vélo dont le CD 45 est gestionnaire.

Sur la demande de la DDT 45, le Laboratoire Régional de Blois du Cerema Normandie-Centre (actuelle Agence de Blois) et la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Centre-Val de Loire (DREAL CVL) ont fourni un état des lieux (Cerema, 2018 ; DREAL CVL – Service Loire et Bassin Loire-Bretagne, 2019).

Les effondrements de berge se situent en amont immédiat de la prise d'eau du Centre Nucléaire de Production d'Electricité (CNPE) de Saint-Laurent-des-Eaux. Dans ce secteur, des rideaux de palplanches (panneaux de fond) ont été implantés en 1968 par EDF pour favoriser la sédimentation dans le chenal en rive droite de l'île à l'amont de la centrale (dénommée dans les rapports précédents « la Petite Ile », correspondant à l'unité numérotée « e » dans ce rapport), et ainsi concentrer à l'étiage la totalité du débit le long de la berge du CNPE. En 2015, EDF recèpe ces panneaux de fond à la cote 74 m NGF pour stopper leur influence en raison de leur forte dégradation et de leur rôle qui n'est plus assuré suite aux modifications morphologiques du lit de la Loire depuis leur installation. Toutefois, le Cerema a observé la présence du premier et dernier panneau de fond (P1 et P7) a une cote supérieure.

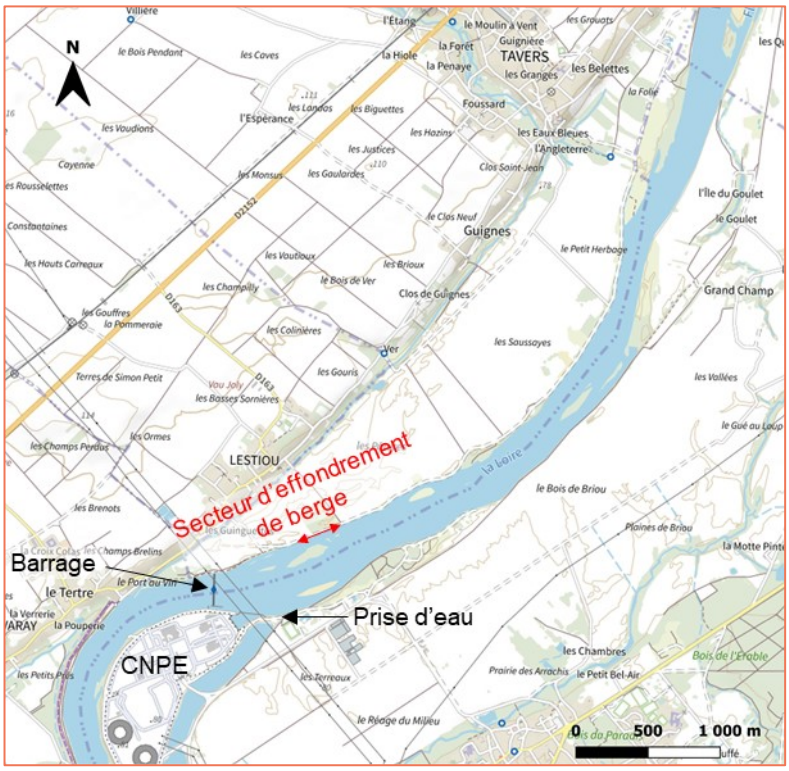


Illustration 1 : localisation du secteur d'effondrement de berge sur la commune de Tavers.
(Source : Carte IGN)

Dans ce contexte, la DDT 45 a sollicité le Cerema pour réaliser une étude du fonctionnement morphodynamique de la Loire dans ce secteur afin de comprendre les mécanismes en jeu dans les effondrements de berge survenus. Cette étude comprend l'actualisation de l'analyse réalisée en 2008 par EDF R&D (Bouchard, 2008) couplée à des mesures de suivi topo-bathymétrique du fond de la Loire et des berges, des vitesses d'écoulement pour différents débits et des lignes d'eau associées. Les mesures bathymétriques ont été réalisées le 19/02/2020, pour un débit de 380 $m^3.s^{-1}$ à la station de Blois, correspondant au module. La topographie des berges a été réalisée le 07/07/2020, à l'étiage (Q_{Blois} = 115 $m^3.s^{-1}$) ainsi que l'inspection de terrain. Les campagnes de suivi des lignes d'eau, des vitesses et des directions des écoulements ont été réalisées les 19/02/2020 et 17/06/2020 pour des débits correspondant respectivement au module et à un débit de hautes eaux (Q_{Blois} = 783 $m^3.s^{-1}$). Une campagne de mesure des lignes d'eau et de courantométrie était prévue pour un débit supérieur à 1000 $m^3.s^{-1}$ mais n'a pu être réalisée à ce jour.

1.2 Approche méthodologique

1.2.1 Evolution hydromorphologique du secteur et végétalisation du lit

L'évolution hydromorphologique du secteur a été appréhendée à partir de l'évolution des débits, des lignes d'eau et de la forme en plan de la Loire à l'aide des photographies aériennes. L'évolution de la forme en plan est fortement influencée par la végétalisation du lit. A partir des photographies disponibles sur le site internet de l'IGN « Remonter le temps », une analyse de la végétalisation du secteur a été réalisée.

Une actualisation de l'analyse réalisée par EDF R&D (Bouchard, 2008) a été effectuée dans cette étude. Elle comprend l'actualisation de l'évolution de la forme en plan et l'évolution des débits à la station de Blois.

L'évolution de la forme en plan de la Loire a été réalisée entre 1955 et 2005 (Bouchard, 2008) sur un tronçon d'environ 3,7 km vers l'amont à partir du barrage (Illustration 1) avec une subdivision en trois tronçons, amont, milieu, aval (Illustration 2 ; ANNEXE 1 – Cartographies). L'actualisation a été effectuée sur le même tronçon à partir des photographies aériennes géoréférencées datant de 2005, 2015 et 2020, disponibles sur le site internet du Système d'Information des Evolutions du lit de la Loire (SIEL) de la DREAL CVL. Les résolutions sont différentes entre les photographies de 2005, 2015 et 2020 avec respectivement une résolution de 1 m, 0,5 m et 0,25 m. Ainsi, les évolutions morphologiques identifiées ne peuvent pas être inférieures au mètre. De plus, la position de la végétation ligneuse et l'ombrage exercée par cette dernière limitent fortement la visibilité des berges. Il apparaît difficile de quantifier les évolutions morphologiques dans les zones végétalisées, en deçà d'une dizaine de mètres. L'évolution a été évaluée par digitalisation des berges à l'aide du logiciel SIG QGIS 3.28.3. Sur le secteur aval où l'effondrement est constaté, les îles et îlots ont été nommés de « a » à « i » pour faciliter leur identification (Illustration 2 ; ANNEXE 1 – Cartographies).



Illustration 2 : localisation des profils de mesures de 2016 et 2020 ; identification des secteurs et unités morphologiques cités dans ce document (agrandissement ANNEXE 1 – Cartographies).
(Sources : bathymétrie 2016 et photographie 2020 – SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

Afin de déterminer si le climat ligérien présente des successions d'années sèches ou humides qui expliqueraient des évolutions morphologiques, Bouchard (2008) a construit une courbe de tendance sur la chronique hydrologique de la Loire à la station de Blois (code station : K447 0010 01) dont les premières mesures datent de 1863. L'indicateur utilisé est l'écart entre la moyenne des débits journaliers sur l'année et le module. A partir de cet indicateur, la courbe des écarts cumulés de la moyenne annuelle est tracée. Dans l'étude de 2008, la courbe a été tracée jusqu'en 2008, pour un module de 361 $m^3.s^{-1}$ (Illustration 8).

Dans la présente étude, cette courbe a été complétée jusqu'à décembre 2022. Les années présentant trop de lacunes, ce qui aurait biaisé le calcul de la moyenne annuelle, ont été exclues : 1992, 1993, 1994, 1996, 2000 et 2002. Sur les années pour lesquelles la moyenne annuelle a été calculée, 3 années (1863, 1997, 2003) présentent des lacunes mais au moins 87 % de la chronique est disponible. La valeur du module calculée sur le site l'Hydroportail est actuellement de 355 $m^3.s^{-1}$. Cette différence influence la position de la courbe sur l'axe des ordonnées mais ne modifie pas les tendances.

Les lignes d'eau d'étiage ont été récupérées sur le site du SIEL de la DREAL CVL et permettent d'appréhender l'évolution du fond et notamment l'incision. Sur la période 1978 – 2018, 23 lignes d'eau d'étiage sont disponibles au droit du site de la Centrale Saint-Laurent-des-Eaux pour des débits compris entre 36 $m^3.s^{-1}$ et 99,6 $m^3.s^{-1}$ à la station de Blois.

1.2.2 Morphodynamique du secteur d'effondrement de berge

La caractérisation de la morphologie du lit a été réalisée à l'aide des mesures bathymétriques selon 6 profils (Illustration 2 ; ANNEXE 1 – Cartographies). Les profils en travers 1 et 3 sont localisés sur le même emplacement que les profils levés par la DREAL CVL en 2016 permettant d'évaluer les modifications morphologiques (Illustration 2 et Illustration 3, ANNEXE 1 – Cartographies). Les points des profils bathymétriques levés en 2020 ont été projetés sur des profils théoriques (Illustration 3, ANNEXE 1 – Cartographies).

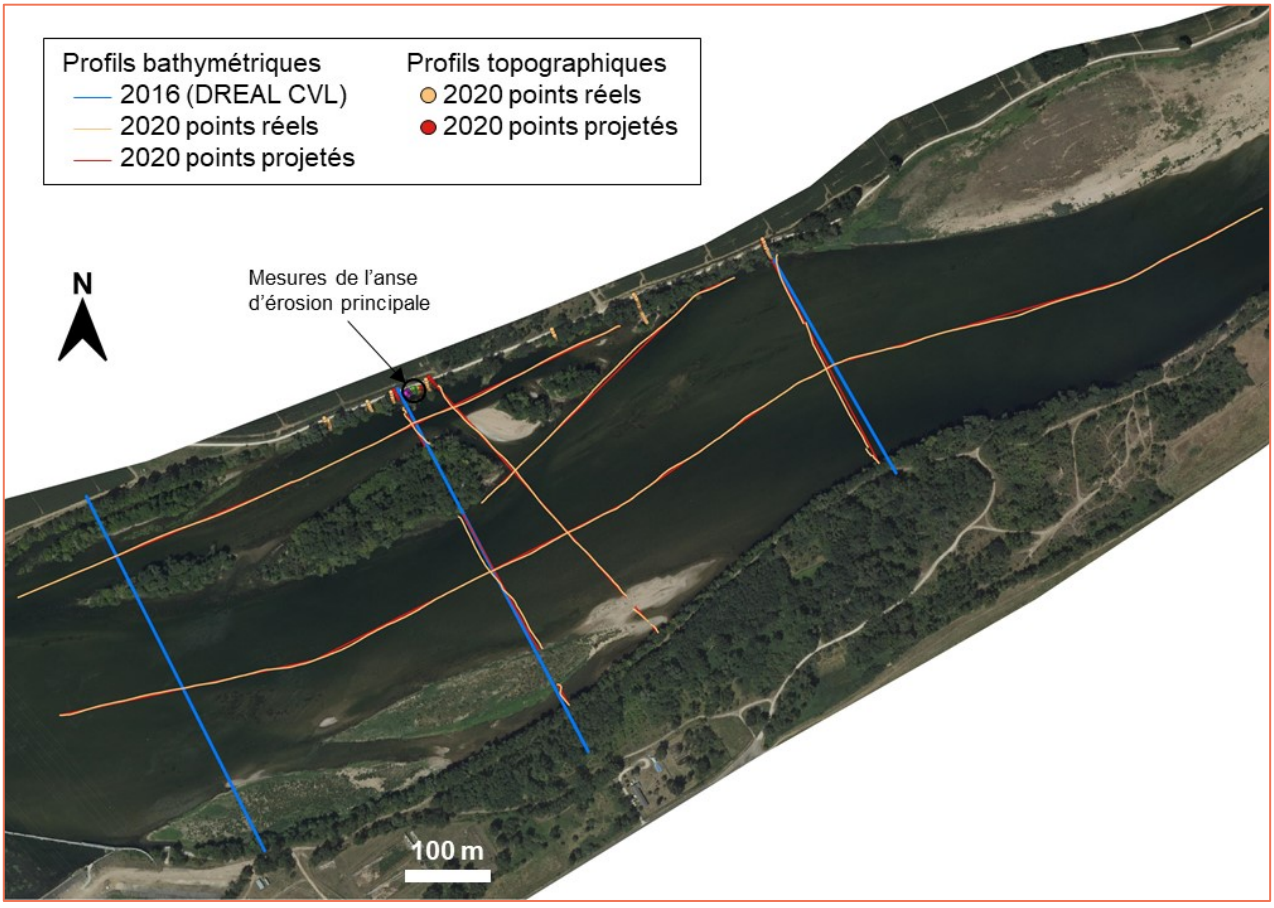


Illustration 3 : profils bathymétriques 2016, points topo-bathymétriques réels et projetés sur les profils théoriques 2020 (agrandissement ANNEXE 1 – Cartographies).
(Sources : bathymétrie 2016 et photographie 2020 – SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

Les lignes d'eau ont été mesurées sur les profils en long 5 et 6, également suivis en bathymétrie (Illustration 2, ANNEXE 1 – Cartographies), et les vitesses et directions des écoulements ont été mesurées sur les sections correspondant aux profils 1, 2, 3 et 4 (Illustration 2, ANNEXE 1 – Cartographies), pour deux conditions de débit :

- un débit proche du module avec un débit à la station de Blois de 380 $m^3.s^{-1}$;
- un débit de hautes eaux, correspondant à presque deux fois le module, de 783 $m^3.s^{-1}$ à la station de Blois.

Les lignes d'eau ont également été projetées sur les profils théoriques afin de permettre leur comparaison (Illustration 4).

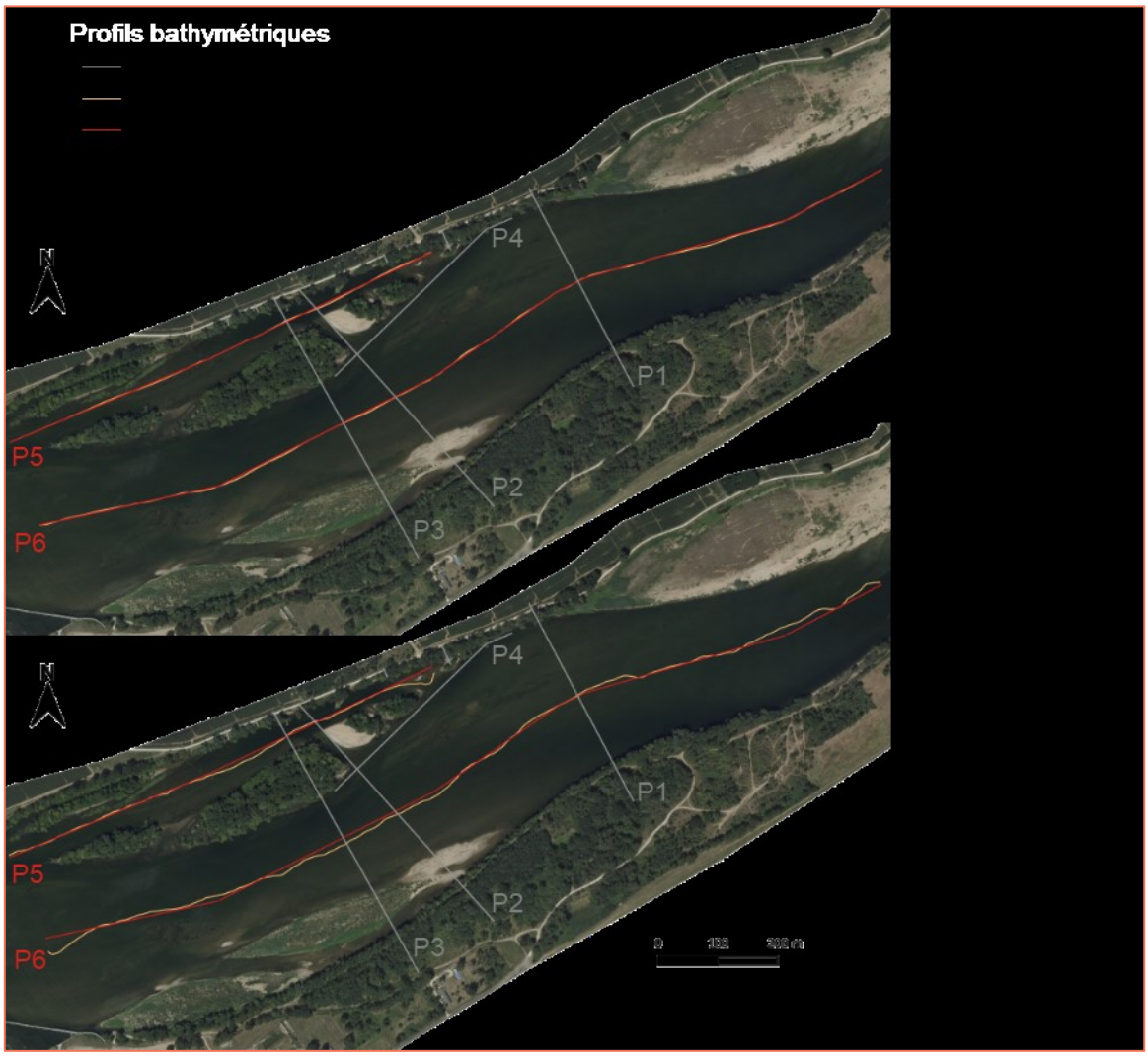


Illustration 4 : trajectoires des lignes d'eau pour les deux conditions de débit renseignées.
(Sources : photographie 2020 – SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

1.2.3 Caractérisation et analyse des effondrements

Un suivi topographique des berges (profils Pa, Pb, Pc et Pd ; Illustration 2, ANNEXE 1 – Cartographies) et de l'encoche d'érosion (Illustration 3, ANNEXE 1 – Cartographies) a été réalisée à l'étiage 2020.

En parallèle du suivi topographique une inspection de terrain a été réalisée, notamment pour identifier l'état de la végétation ligneuse sur les berges.

2 CAMPAGNE DE MESURES

2.1 Méthodologie utilisée

Les mesures bathymétriques et de lignes d'eau ont été effectuées à l'aide d'un échosondeur monofaisceau bi-fréquence, piloté par le logiciel de navigation et d'acquisition de données HYPACK. Le positionnement du bateau en mode cinématique temps réel (*RTK*) est assuré par un récepteur GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites).

Le levé des points topographiques a été réalisé à l'aide d'une canne de topographie et d'une station totale.

Les mesures de courantométrie ont été réalisées à l'aide d'un profileur acoustique à effet Doppler (*aDcp*) piloté par le logiciel WinRiverII. Un profil *aDcp* se caractérise par des données moyennées à partir de mesures réalisées sur au moins 4 allers-retours ou 720 secondes de mesure[2]. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un bateau pneumatique et d'un flotteur trimaran monté à couple de l'embarcation portant l'*aDcp.* Selon les conditions d'écoulement et magnétique lors du levé, le positionnement des mesures est assuré soit par l'*aDcp* en mode suivi de fond (*Bottom Track*) soit par un récepteur GNSS.

Les mesures ont été effectuées par les hydrographes de l'équipe SOM. Le traitement des données a été assuré par le responsable des mesures pour cette étude, Francis Garnier, et par la responsable de l'étude Coraline Wintenberger. Le traitement des données bathymétriques a été effectué à l'aide de la suite logiciels HYPACK et du logiciel TopStation. Le traitement des données *aDcp* a été assuré avec le logiciel d'acquisition WinRiverII et le logiciel Velocity Mapping Toolbox (VMT).

2.2 Unités et qualité des mesures

2.2.1 Unités

Les systèmes de référence des coordonnées géographiques et de nivellement utilisé dans ce rapport sont le système géodésique RGF93 et sa projection associée Lambert 93 pour la planimétrie et le système NGF-IGN69 dans le système géodésique RGF93 pour l'altimétrie, calculé à partir de la grille de conversion entre l'ellipsoïde et le géoïde RAF18 pour les mesures GNSS.

Les données planimétriques et altimétriques citées dans ce rapport sont exprimées en mètre (m).

2.2.2 Qualité du système de positionnement

Le positionnement des mesures est assuré par le système de Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites (GNSS) provenant des constellations de satellites GPS (constellation de satellites américains) et GLONASS (constellation de satellites russes). Le système GNSS est connecté au réseau de stations d'observations Orphéon permettant la réception et l'intégration de corrections en temps réel (*RTK*) assurant un positionnement centimétrique des mesures.

[2] Oberg K. and Mueller D. S. Validation of Streamflow Measurements Made with Acoustic Doppler Current Profilers Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, No. 12, December 1, 2007.
ISSN 0733-9429/2007/12-1421–1432/$25.00

2.3 Descriptif des équipements

2.3.1 Moyens nautiques

Les mesures ont été réalisées depuis l'embarcation pneumatique Sillinger 380UM (ANNEXE 2 – Matériel utilisé : Moyens nautiques de l'équipe SOM) accueillant la chaîne de mesure bathymétrique ou *aDcp* (Illustration 5).



Illustration 5 : embarcation pneumatique Sillinger 380UM avec le trimaran déployé à couple portant l'aDcp. (Source : Cerema/NC-AB/GRISOM)

2.3.2 Systèmes de positionnement des mesures

Les mesures de bathymétrie au sondeur monofaisceau sont assurées par le récepteur GNSS *RTK* Trimble R6 (ANNEXE 2 – Matériel utilisé : Système de positionnement hydrographique et topographique de l'équipe SOM) lorsque la réception des signaux des satellites est de bonne qualité.

Le récepteur GNSS *RTK* Trimble R6 (ANNEXE 2 – Matériel utilisé :Système de positionnement hydrographique et topographique de l'équipe SOM) assure également le positionnement des mesures de courantométrie lorsque la réception des signaux des satellites est de bonne qualité.

Les mesures topographiques des berges ont été réalisées à l'aide d'une station totale robotisée Trimble S5 (ANNEXE 2 – Matériel utilisé :Système de positionnement hydrographique et topographique de l'équipe SOM) qui assure le positionnement des points topographiques avec la canne de topographe et le prisme. La forte végétalisation du site empêche la réception du signal GNSS *RTK* sur les berges et nécessite l'utilisation de la station totale. La mise en station est réalisée à l'aide du signal GNSS *RTK,* connecté à Orphéon, dans un secteur où le signal est présent.

2.4 Système d'acquisition hydrographique

2.4.1 Mesures bathymétriques

Les mesures bathymétriques ont été réalisées avec un échosondeur monofaisceau bi-fréquence Odom Echotrac MK III (ANNEXE 2 – Matériel utilisé :Systèmes d'acquisition hydrographique de l'équipe SOM) dont les deux fréquences d'émission sont de 200 kHz et 33 kHz.

Les mesures de l'écho acoustique du sondeur, combinées au déplacement de l'embarcation, engendrent un profil de profondeur (Illustration 6) avec un grand nombre de points de mesures, permettant d'obtenir une morphologie du fond à l'aplomb de la trajectoire de l'embarcation.

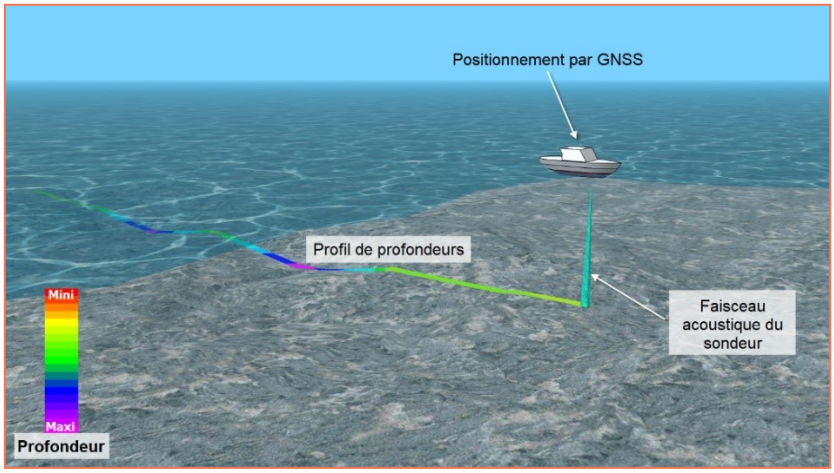


Illustration 6 : schéma de principe de la mesure avec un échosondeur monofaisceau.
(Source : Cerema/NC-AB/GRISOM)

2.4.2 Mesures courantométriques

Les mesures de courantométrie ont été assurées par un *aDcp* Teledyne Riveray (ANNEXE 2 – Matériel utilisé :Systèmes d'acquisition hydrographique de l'équipe SOM) possédant quatre faisceaux acoustiques étroits de 2 degrés, inclinés à 30° par rapport à la verticale. L'*aDcp* mesure les vitesses et les directions des écoulements sur une section, permettant d'étudier la structure des écoulements et de calculer les débits (Illustration 7). Il mesure sa vitesse par rapport au fond de la rivière, la vitesse des particules dans la colonne d'eau par rapport à lui-même et en déduit la vitesse des écoulements par rapport au fond.

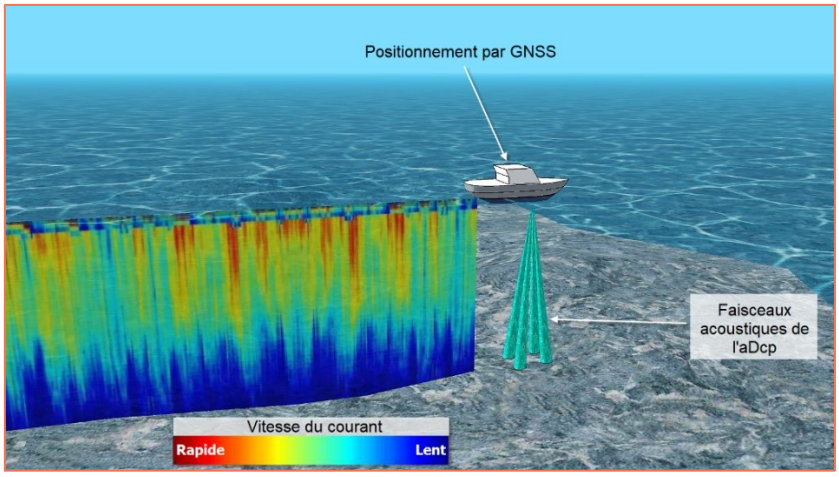


Illustration 7 : schéma de principe de la mesure avec un courantomètre à effet Doppler.
(Source : Cerema/NC-AB/GRISOM)

2.5 Conditions hydrologiques et hydrauliques des levés

La station hydrométrique utilisée comme référence dans cette étude est celle de Blois (code station : KK447 0010 01) située environ 25 km en aval du site. Les débits caractéristiques de la Loire à cette station sont les suivants :

- module : 355 $m^3.s^{-1}$;
- débit d'étiage de fréquence biennale (QMNA) : 81,2 $m^3.s^{-1}$;
- débit de crue de fréquence biennale (QJ) : 1680 $m^3.s^{-1}$;
- débit de crue de fréquence décennale (QJ) : 2770 $m^3.s^{-1}$.

Les mesures hydrographiques ont été effectuées pour deux conditions de débit :

- débit correspondant au module le 19/02/2020 : Q_{Blois} = 380 $m^3.s^{-1}$;
- débit de hautes eaux correspondant à deux fois le module le 17/06/2020: Q_{Blois} = 783 $m^3.s^{-1}$.

Les mesures de topographie ont été effectuées le 07/07/2020 pour des conditions d'étiage : Q_{Blois} = 115 $m^3.s^{-1}$).

3 RESULTATS

3.1 Hydrologie et hydraulique

3.1.1 Evolution des débits entre 1863 et 2022

En 2008, Bouchard avait identifié une période d'environ 50 ans (1860-1909) sans grande oscillation, puis une période de débits excédentaires, entre 1910 et 1944, suivie d'une période de 20 ans à tendance déficitaire (1944-1964). Entre 1964 et 1988, la tendance sur la période est plutôt excédentaire et très marquée sur la période 1976-1983. A partir de 1989, la courbe a tendance à décroître. En 2008, le déficit n'était pas aussi marqué que pendant la période 1944-1964. L'actualisation de cette courbe montre que le déficit s'est poursuivi jusqu'en 2022 portant la période de déficit à au moins 33 ans (Illustration 8).

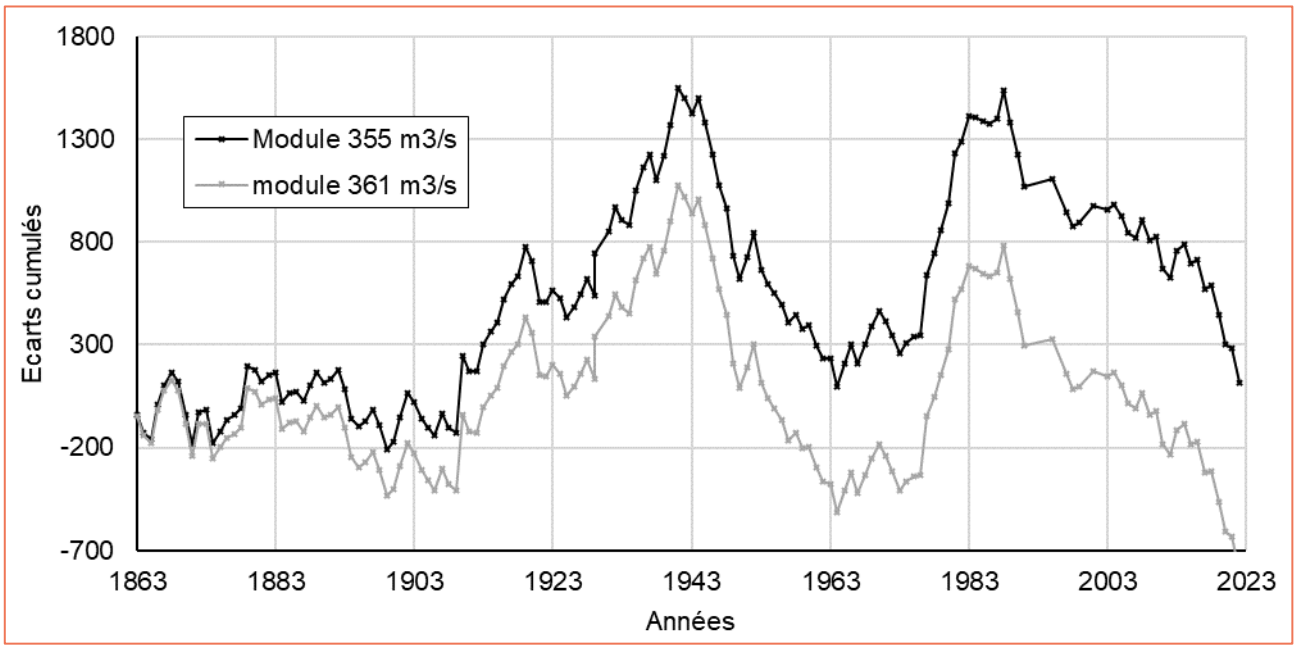


Illustration 8 : courbes des écarts cumulés de la moyenne annuelle au module, valeur ancienne (361 $m^3.s^{-1}$) et valeur actuelle (355 $m^3.s^{-1}$).
(Source : www.hydro.eaufrance.fr, dernière consultation janvier 2023)

Dans son étude, Bouchard (2008) considère qu'une période excédentaire est propice aux évolutions morphologiques, telle que la période 1973-1983 depuis la construction de la centrale. En complément, il faut noter que les périodes déficitaires sont propices au développement de la végétation alluviale ce qui peut également engendrer des modifications morphologiques importantes, notamment par la construction des îles. Ainsi, à partir des années 1990, le contexte hydrologique est favorable au développement de la forêt alluviale.

3.1.2 Lignes d'eau : étiage, module, hautes eaux

3.1.2.1 Lignes d'eau d'étiage

Les débits, correspondant aux 23 lignes d'eau d'étiage (Illustration 9) mesurées au droit du site de la Centrale Saint-Laurent des Eaux, sont compris entre 36 $m^3.s^{-1}$ et 99,6 $m^3.s^{-1}$ à la station de Blois (Tableau 1).

Tableau 1 : dates des mesures des lignes d'eau et débit moyen journalier associé à la station de Blois. (Sources : www.hydro.eaufrance.fr, dernière consultation janvier 2023)

Date	Débit ($m^3.s^{-1}$)	Date	Débit ($m^3.s^{-1}$)
14/11/1978	77	04/08/1999	78,1
06/08/86	79	23/08/2000	98,8
18/08/88	92	06/08/2002	Absence de données
26/07/89	61,5	06/08/2003	62,1
21/08/90	61,5	01/10/2004	99,6
14/08/91	71	27/07/2005	72,9
12/08/93	Absence de données	02/08/2006	36
21/07/94	Absence de données	19/08/2009	77,1
10/08/95	80	06/07/2011	51,2
06/08/1996	Absence de données	22/08/2012	81,6
31/07/1997	79,9	03/09/2018	68
12/08/1998	68,9		

Les lignes d'eau matérialisent de nombreux seuils sur le secteur (Illustration 9) et le site d'étude est localisé sur un tronçon contraint en amont par le seuil du pont de Beaugency et à l'aval par le seuil associé à la centrale (Illustration 9).

Le seuil de la centrale apparaît sur les lignes d'eau à partir de 1988. Entre 1988 et 1996, les lignes d'eau sont mesurées au droit du pont de Beaugency et du seuil de la centrale. A partir de 1996, des points intermédiaires sont levés. Avec ces nouveaux points, il apparaît qu'à l'aval du pont de Beaugency, la pente de la ligne d'eau d'étiage est plus forte sur la période 1996-2018 entre les PK 664,5 et PK 667,9 que ce qui était observé entre 1988 et 1996. La comparaison de la ligne d'eau d'étiage de 1978 avec 1996 montre que l'altitude de la ligne d'eau est plus faible au PK 664,5 à l'aval du pont (- 0,2 m) et plus élevée au PK 667,9 (+ 0,2 m), ainsi la pente de la ligne d'eau d'étiage en 1996 est plus faible qu'en 1978.

Sur les lignes d'eau d'étiage entre 1996 et 2018, l'altitude de la ligne d'eau peut varier, en raison de débits différents, mais aucune tendance, incision ou exhaussement, ne se distingue. Les lignes d'eau de 1998 et 2018 ont été mesurées pour des débits presque identiques (Tableau 1) et l'écart d'altitude sur le secteur d'érosion de berge est inférieur à 0,1 m.

En revanche, une tendance sur la pente des lignes d'eau d'étiage est observée. Entre les PK 667,9 et PK 669,4, la pente de la ligne d'eau d'étiage se réduit par rapport à l'amont (PK 664,5 – PK 667,9) puis entre le PK 669,4 et le PK 671,5 correspondant au seuil de la centrale, la pente de la ligne d'eau d'étiage est presque nulle.

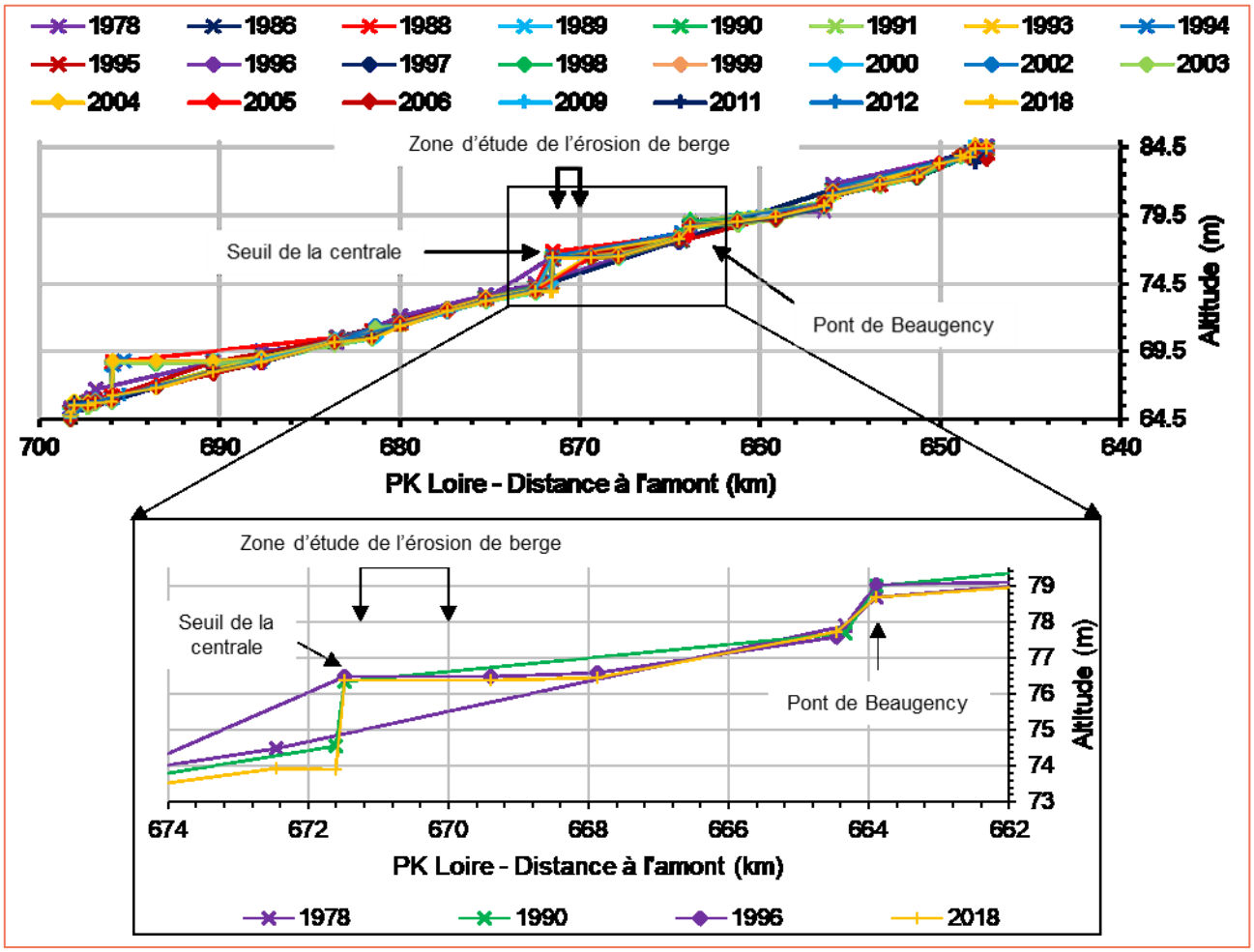


Illustration 9 : lignes d'eau d'étiage entre 1978 et 2018 entre les îles de Mareau-aux-Prés à l'aval d'Orléans et Blois. (Sources : SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr)

3.1.2.2 Module et hautes eaux

Dans le cadre de cette étude, des mesures de ligne d'eau ont été effectuées pour des débits spécifiques dont le débit correspondant au module ($Q_{module\text{-}Blois}$ = 350 $m^3.s^{-1}$) à la station de Blois.

Les mesures d'altitude de la ligne d'eau ont été réalisées dans le chenal secondaire (P5) et le chenal principal (P6) pour un débit de 380 $m^3.s^{-1}$ à la station de Blois le 19/02/2020. Les lignes d'eau mesurées en 2020 sont cohérentes avec la ligne d'eau de 1998, levé sur le secteur, pour un débit similaire (Illustration 10A).

La ligne d'eau, au module, dans le chenal principal (P6) a une tendance linéaire avec une pente de 0,00013 m/m (Illustration 10B). En revanche, une rupture dans la ligne d'eau est visible pour le chenal secondaire (P5), juste à l'aval de la berge en érosion au PK 670,75. En amont, la ligne d'eau a une pente plutôt similaire à la ligne d'eau du chenal principale. En aval, la pente de la ligne d'eau diminue. La variabilité de la ligne d'eau, notamment dans la partie amont peut s'expliquer par l'apport latéral des écoulements provenant du chenal principal par les passes entre les îlots.

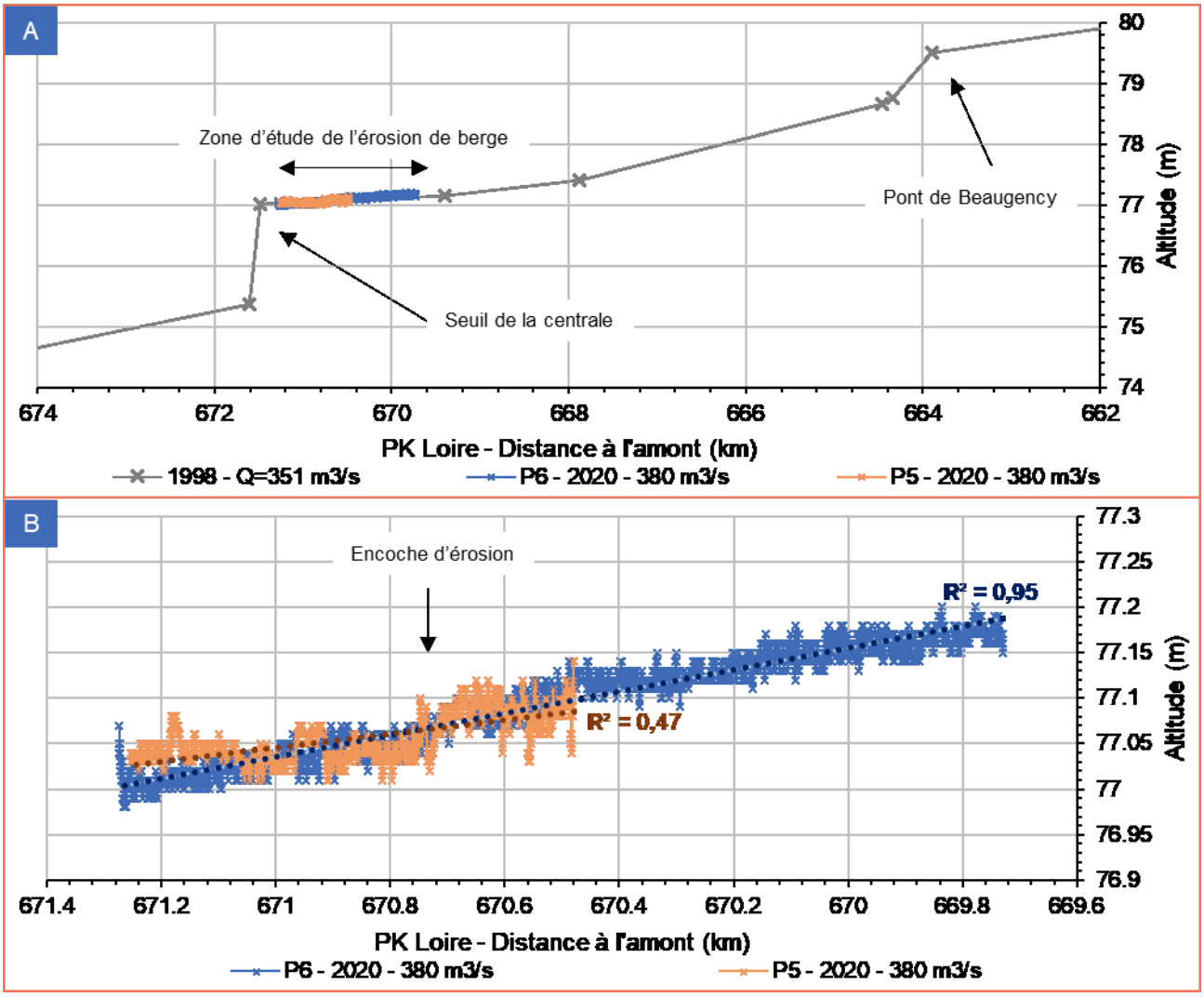


Illustration 10 : A) comparaison des lignes d'eau correspondant au module de 1998 et 2020 ; B) lignes d'eau mesurées en 2020 dans le chenal secondaire (P5) et le chenal principal (P6) du site d'étude. Le R² correspond à la droite de tendance linéaire tracée pour chaque ligne d'eau.
(Sources : SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

Les autres débits pour lesquels des mesures devaient être effectuées correspondaient à deux débits de hautes eaux (700 $m^3.s^{-1}$ et >1000 $m^3.s^{-1}$). Le débit >1000 $m^3.s^{-1}$ n'a pas pu être renseigné par les mesures. Des lignes d'eau sont disponibles sur le site du SIEL de la DREAL CVL pour les débits recherchées, 1220 $m^3.s^{-1}$ en 2012 et 790 $m^3.s^{-1}$ en 2008 (Illustration 11A).

Des mesures d'altitude de la ligne d'eau ont été réalisées dans le chenal secondaire (P5) et le chenal principal (P6) pour un débit de 786 $m^3.s^{-1}$ à la station de Blois le 17/06/2020.

L'absence de point de mesure de la ligne d'eau au droit du seuil de la centrale en 2008 confère à celle-ci une pente plus forte que la réalité (Illustration 11). Bien que l'altitude des lignes d'eau soit différente entre 2012 et 2020, en raison d'un débit différent, leur pente est similaire (Illustration 11A).

Les mesures de 2020 révèlent que pour un débit deux fois supérieur au module, la pente de la ligne d'eau est deux fois plus forte dans le chenal principal (P6) avec une pente de 0,00027 m/m et toujours à tendance linéaire (Illustration 11B). Dans le chenal secondaire, la ligne d'eau a une tendance également linéaire contrairement à ce qui est observé au module. La pente y est plus forte que dans le chenal principal avec une valeur de 0,00043 m/m.

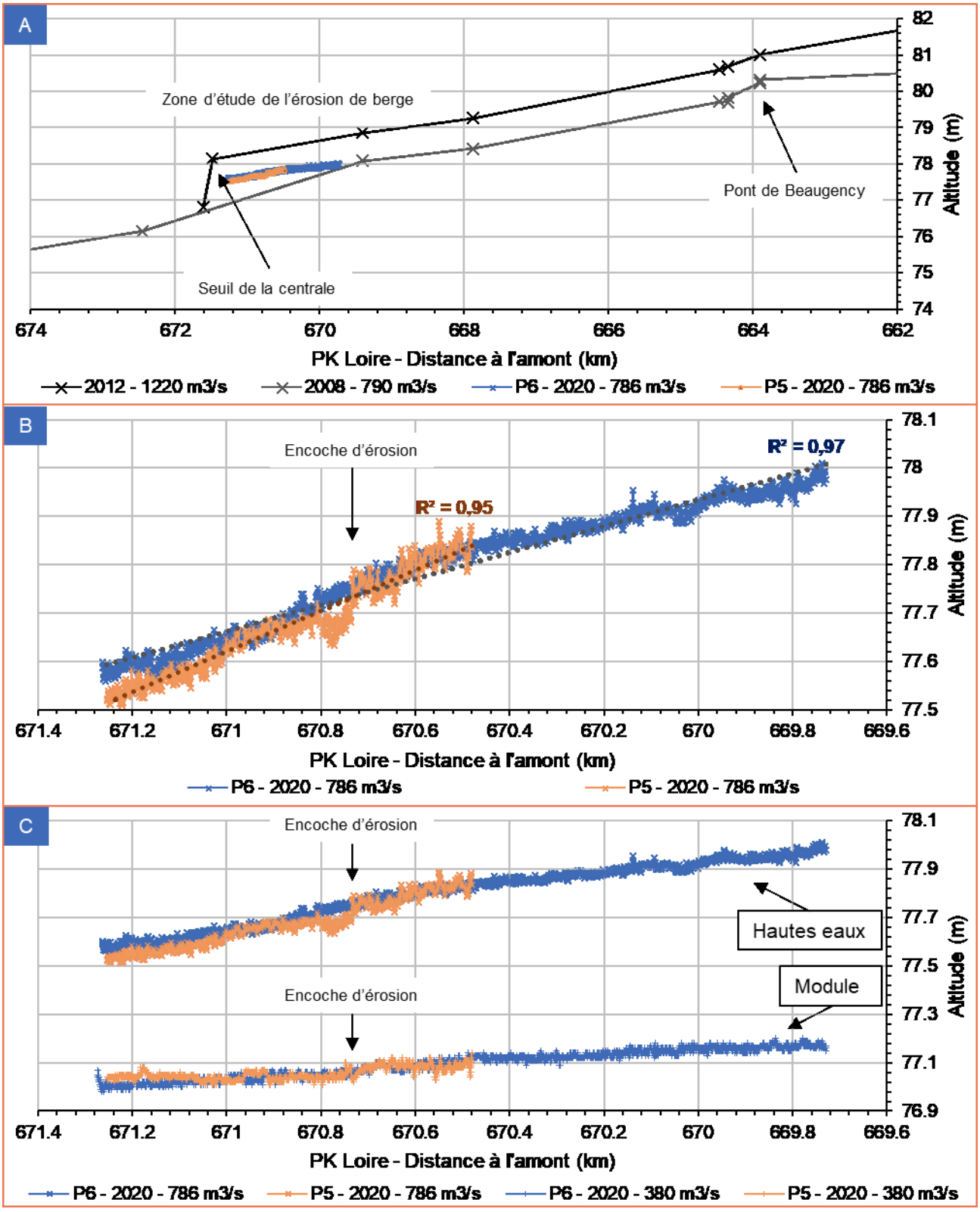


Illustration 11 : A) comparaison des lignes d'eau correspondant aux hautes eaux de 2008, 2012 et 2020 ; B) lignes d'eau mesurées en 2020 dans le chenal secondaire (P5) et le chenal principal (P6) du site d'étude. Le R² correspond à la droite de tendance linéaire tracée pour chaque ligne d'eau ; C) comparaison des lignes d'eau mesurées – module et hautes eaux – dans le chenal principal et le chenal secondaire en 2020.
(Sources : SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

En hautes eaux, bien que la tendance générale de la ligne d'eau dans le chenal secondaire soit linéaire, une augmentation brutale, localisée, et associée à une diminution de l'altitude générale de la ligne d'eau est visible entre le PK 670,73 et le PK 670,80 (Illustration 11B). L'amont de ce secteur se localise directement à l'aval de la berge érodée et se poursuit sur 70 m vers l'aval.

Les lignes d'eau ne montrent pas de déconnexion entre les deux chenaux (Illustration 11C). Au module et en hautes eaux, l'écart entre l'altitude des lignes d'eau du chenal principal et du chenal secondaire est inférieur à 0,1 m.

3.1.3 Vitesses et directions des écoulements

Les mesures *aDcp* ont permis de caractériser les vitesses et les directions des écoulements sur les profils 1, 2, 3 et 4 pour deux débits caractéristiques :

- un débit proche du module (Q_{Blois} = 380 $m^3.s^{-1}$) ;
- un débit de hautes eaux correspondant à environ 2 fois le module (Q_{Blois} = 786 $m^3.s^{-1}$).

Pour un débit correspondant au module, les vitesses moyennes ont tendance à être plus élevées dans le chenal principal que dans le chenal secondaire, à augmenter légèrement vers l'aval et à présenter moins de dispersion dans les valeurs (Illustration 12). La vitesse moyenne maximale, 1,09 $m.s^{-1}$, est mesurée dans le chenal principal sur le profil 3.

Dans le chenal principal :

- sur le profil 1, les vitesses les plus élevées se localisent en rive droite ;
- sur le profil 2, les vitesses sont réparties de manière homogène ;
- sur le profil 3, les vitesses sont élevées en rive droite, contre les berges de l'île « e » ;
- sur le profil 4, les vitesses les plus élevées sont mesurées à l'entrée du chenal secondaire, dans la passe entre les îlots « g » et « i ».

Dans le chenal secondaire, la répartition des vitesses est différente entre le profil 2 et le profil 3. Toutefois, les vitesses maximales se localisent pour les deux profils plutôt vers la rive droite avec une valeur de 0,9 $m.s^{-1}$.

Pour un débit correspondant à deux fois le module, les vitesses moyennes augmentent pour l'ensemble des sections (Illustration 12) avec la valeur la plus élevée, 1,6 $m.s^{-1}$, mesurée dans le chenal principal sur le profil 3. La répartition des vitesses dans le chenal principal est la même au module et pour un débit de deux fois le module. Les vitesses les plus élevées mesurées dans le chenal secondaire sont de 1,4 $m.s^{-1}$ sur le profil 2 et 1,5 $m.s^{-1}$ sur le profil 3 et se concentrent plutôt sur le centre du chenal (Illustration 12).

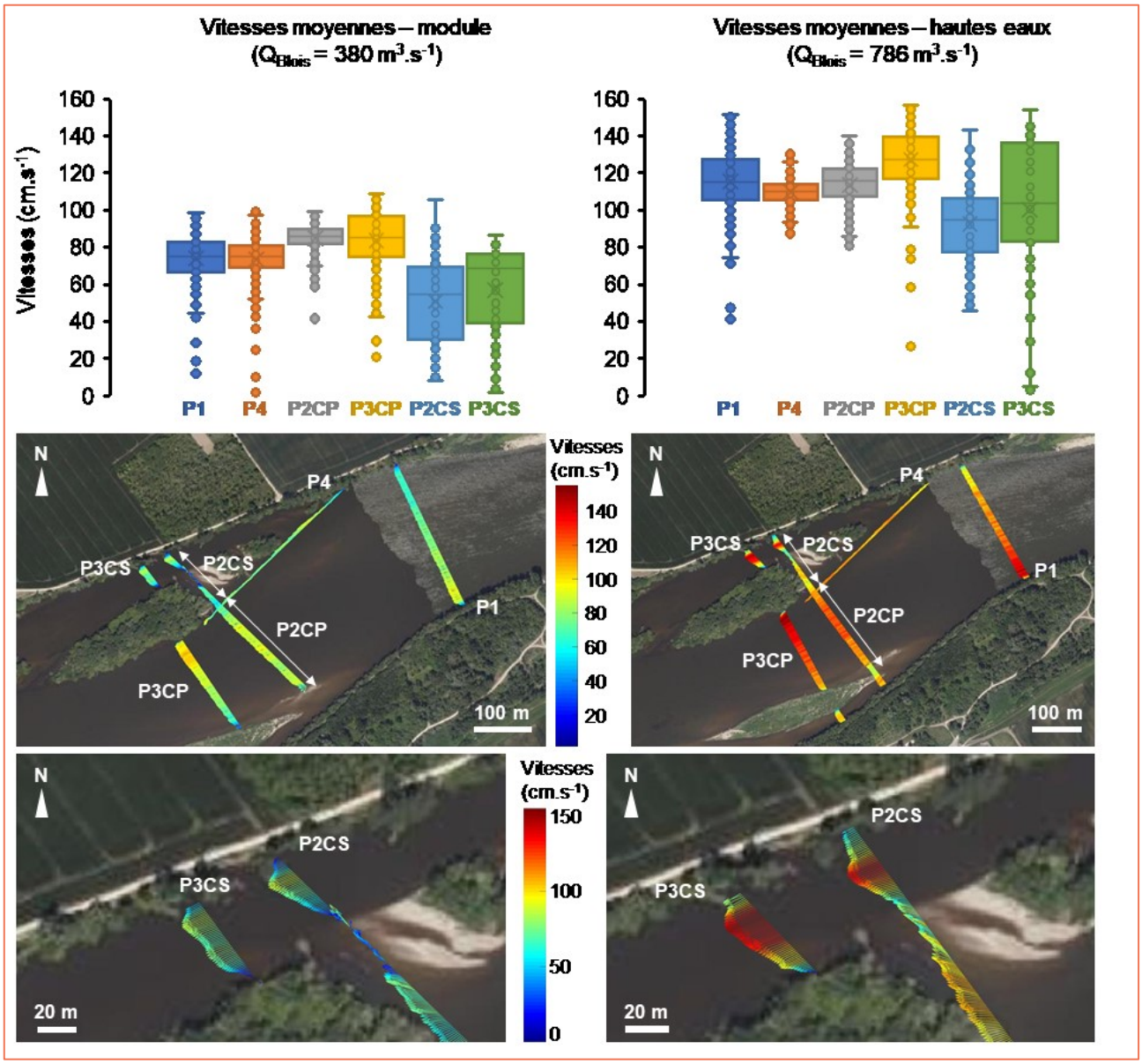


Illustration 12 : amplitude et répartition des vitesses moyennes pour chaque section de mesure (P1 : profil 1 ; P2CP : profil 2 chenal principal ; P2CS : profil 2 chenal secondaire ; P3CP : profil 3 chenal principal ; P3CS : profil 3 chenal secondaire ; P4 : profil 4) pour les débits correspondant au module et hautes eaux.
(Sources : photographie 2020 – SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

Les directions principales de l'écoulement ne sont pas dirigées vers la berge rive droite dans le chenal secondaire au module et en hautes eaux (Illustration 12). En revanche, les directions d'écoulement dans la passe de connexion du chenal principal vers le chenal secondaire, entre l'îlot « f » et l'île « e », sont clairement orientées vers le chenal secondaire.

Sur le profil 2, l'intensité des courants transverses augmentent surtout entre l'îlot « f » et l'île « e », avec une forte augmentation en hautes eaux, mais leur intensité diminue vers le centre du chenal secondaire (Illustration 13).

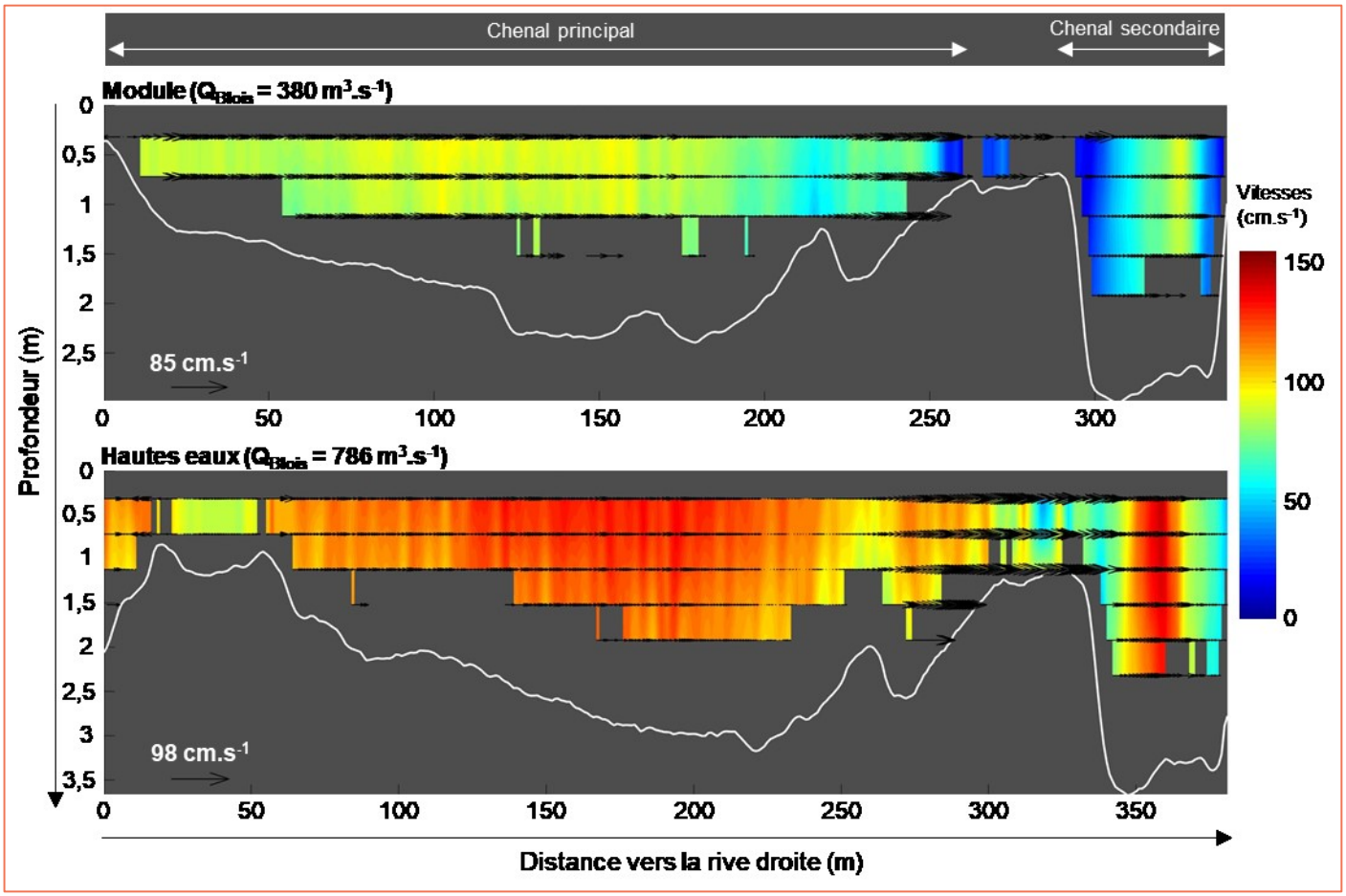


Illustration 13 : répartition des vitesses sur la section du profil 2 pour deux conditions de débit (module ; hautes eaux) et intensité des courants transverses associés. La profondeur et la largeur de la section varient selon le débit, les échelles d'ordonnées et d'abscisses sont différentes entre les deux campagnes.
(Source : Cerema/NC-AB/GRISOM)

En revanche, sur le profil 3, l'intensité des vitesses transverses est relativement faible au module et elles augmentent fortement en hautes eaux vers la berge rive droite (Illustration 14).

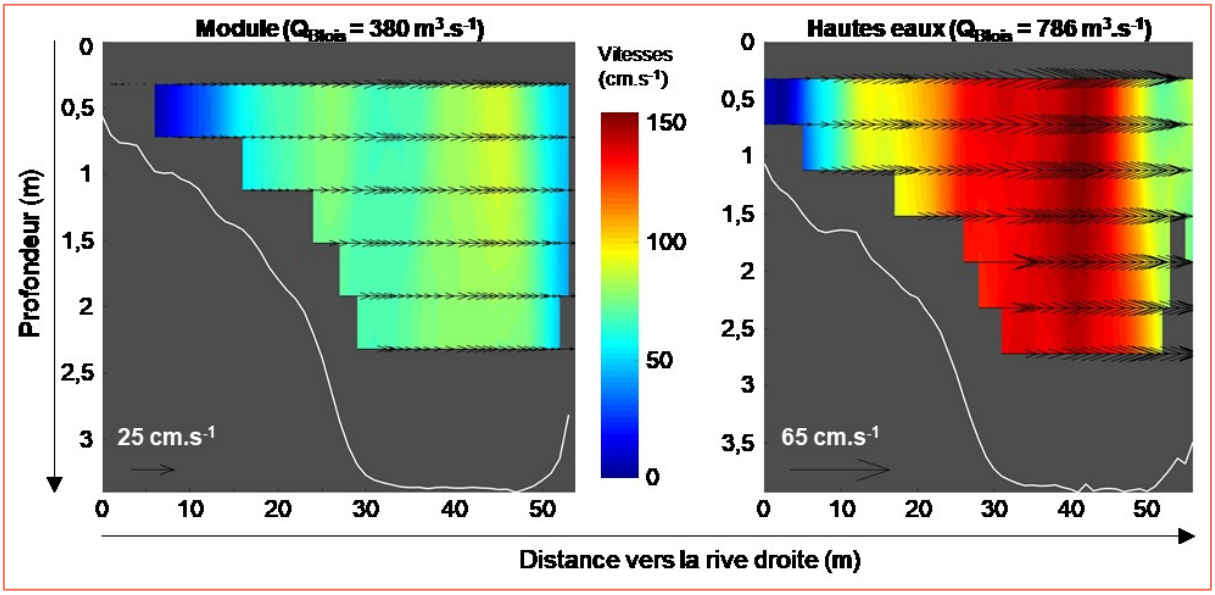


Illustration 14 : répartition des vitesses sur la section du profil 3 dans le chenal secondaire pour deux conditions de débit (module ; hautes eaux) et intensité des courants transverses associés. La profondeur et la largeur de la section varient selon le débit, les échelles d'ordonnées et d'abscisses sont différentes entre les deux campagnes.
(Sources : Cerema/NC-AB/GRISOM)

Dans le chenal secondaire, les vitesses transverses sur le profil 2 pour le module sont au maximum de 0,4 $m.s^{-1}$ (Illustration 15). En hautes eaux, elles sont plus élevées notamment vers la rive gauche et le centre du chenal secondaire avec des valeurs atteignant respectivement 0,8 $m.s^{-1}$ et 0,5 $m.s^{-1}$. Toutefois, à proximité de la berge rive droite, l'intensité des vitesses transverses diminuent et sont dans les 10-15 m à proximité de la fin de la section inférieures à 0,2 $m.s^{-1}$ pour les deux conditions de débit.

Sur le profil 3, les vitesses transverses sont faibles au module avec des intensités qui n'excèdent pas 0,3 $m.s^{-1}$ (Illustration 15). En hautes eaux, elles augmentent fortement avec des valeurs atteignant 0,7 $m.s^{-1}$ au centre du chenal secondaire. Bien que l'intensité des vitesses transverses ait tendance à diminuer vers la rive droite pour les deux conditions de débit, en hautes eaux les valeurs restent relativement élevées avec des valeurs à proximité de la berge rive droite supérieures à 0,3 $m.s^{-1}$.

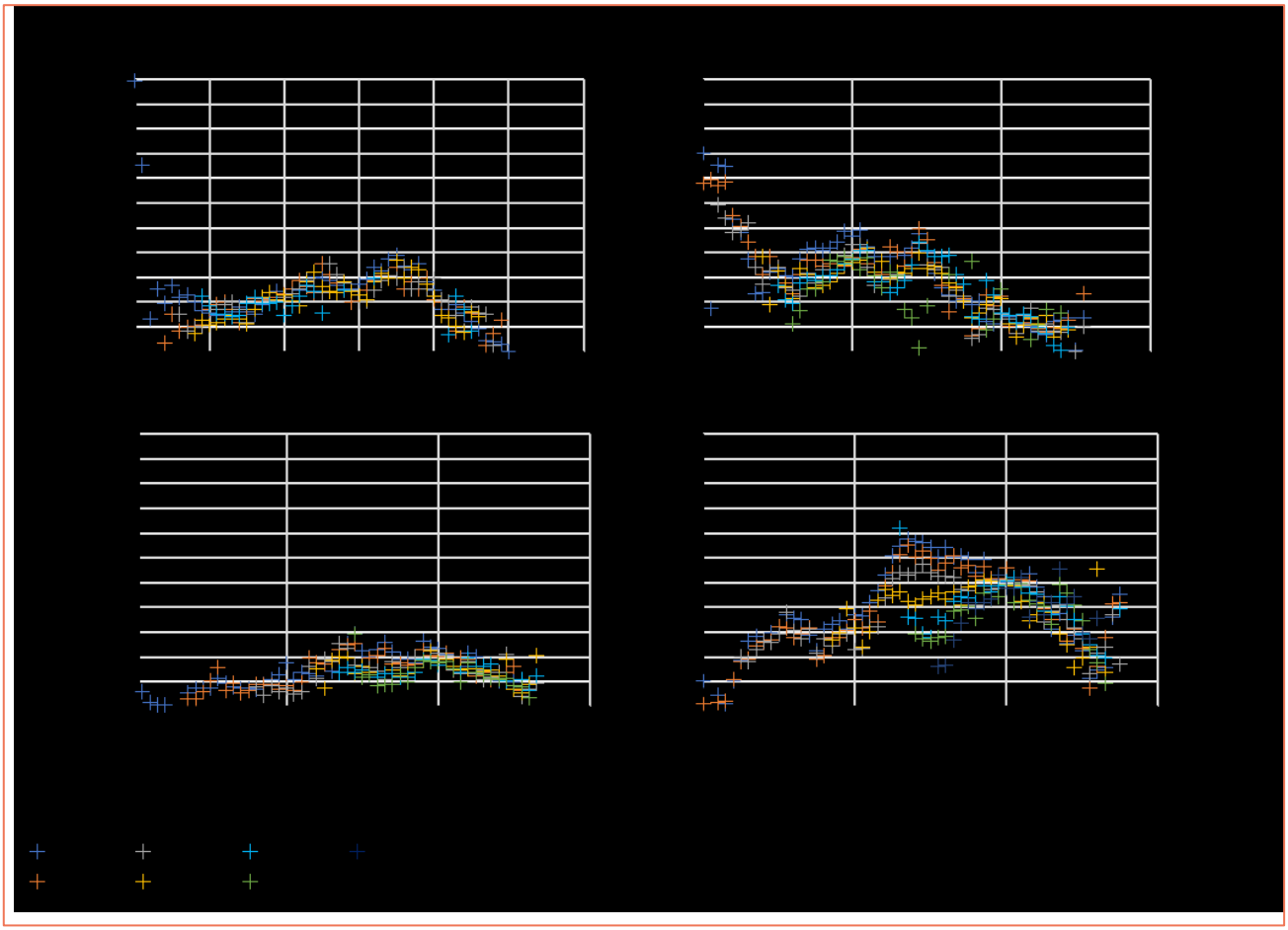


Illustration 15 : vitesses transverses, à différentes profondeurs, dans le chenal secondaire pour deux conditions de débit (module, hautes eaux). La largeur de section varie selon le débit, l'échelle des abscisses est différente entre les graphiques. (Sources : Cerema/NC-AB/GRISOM)

3.2 Morphologie

3.2.1 Evolution de la forme en plan

Dans son analyse, Bouchard (2008) considère que la dynamique dans ce secteur est la progression des formes fluviales du bief amont vers l'aval mais que cette dynamique est bloquée à proximité du barrage en raison des panneaux de fond favorisant le maintien de l'île en rive droite et du seuil du barrage (Illustration 1) déprimé en rive gauche, soutirant l'écoulement et empêchent l'extension du banc en face sur la rive gauche. Il conclut que ce sont les aménagements actuels qui stabilisent la position des fonds. Il précise également que la migration des formes fluviales amont vers l'aval a modifié la direction des écoulements à l'approche de l'île, modifiant également l'orientation des panneaux de fond par rapport à l'écoulement et donc leur fonctionnement par rapport à l'étude initiale de 1965.

L'analyse de la forme en plan montre clairement une évolution entre 1955 et 1984. A partir de 1984, les formes fluviales sont stables et les évolutions morphologiques de faibles ampleurs, y compris sur le tronçon amont.

L'analyse révèle que la stabilité de la position des formes fluviales au sein du chenal observée depuis 1984 perdure sur les tronçons amont et médian. Néanmoins, sur le tronçon médian, la végétation ligneuse s'est développée sur la barre sédimentaire en rive droite, notamment sur la partie aval mais également sur la bordure le long du chenal.

Une modification notable est visible sur le tronçon aval, en rive gauche avec le développement d'une barre sédimentaire végétalisée (« b », Illustration 17) en aval d'un îlot déjà visible en 2005. Ces barres végétalisées en rive gauche (« a » et « b », Illustration 17) se situent dans une zone d'abri favorable au développement de barres forcées, c'est-à-dire dont la position est relativement stable au sein du chenal et qui sont facilement colonisables par la végétation ligneuse, évoluant rapidement en île.

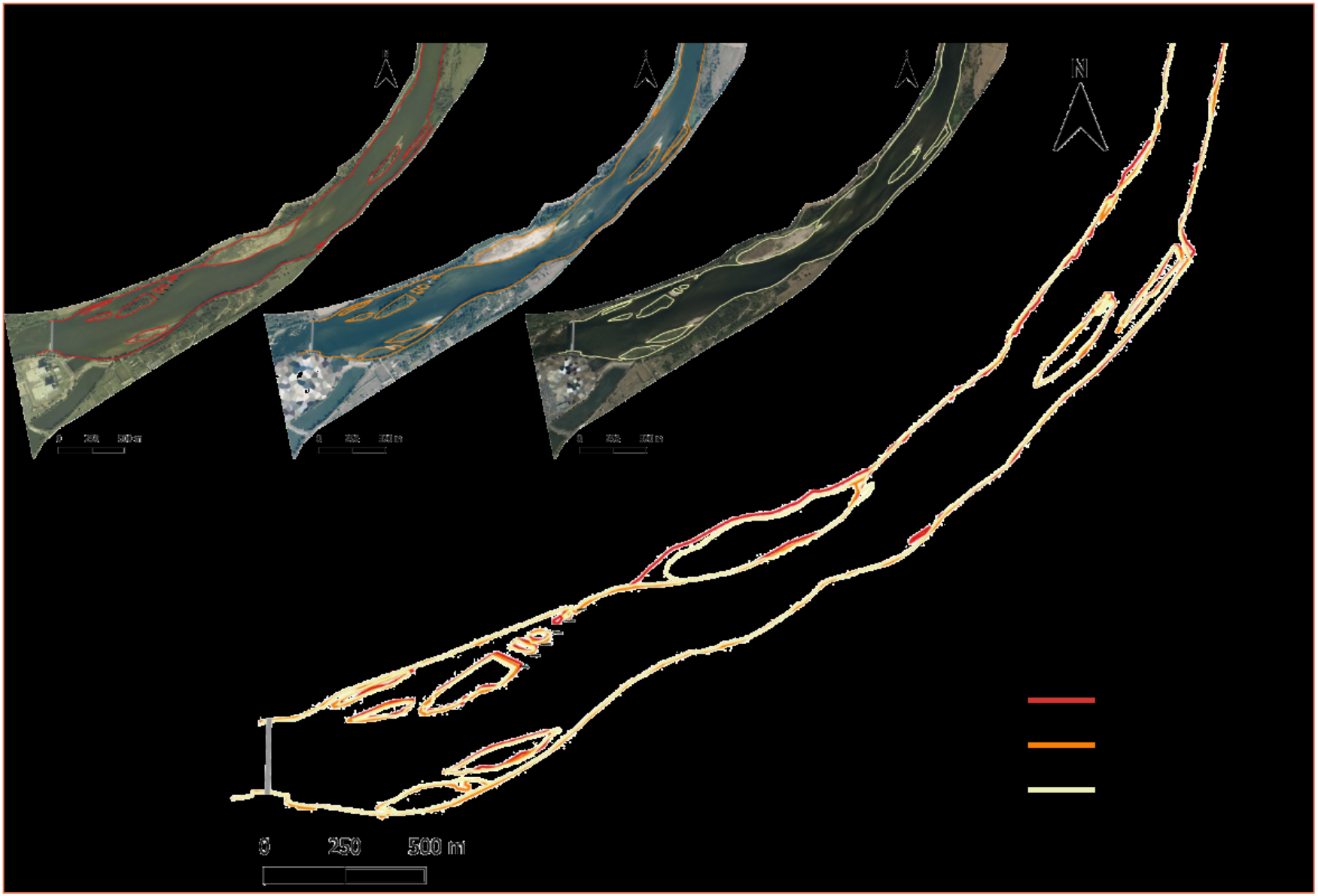


Illustration 16 : évolution de la morphologie en plan de la Loire à l'amont de la centrale Saint-Laurent des Eaux.
(Sources : photographies aériennes du SIEL – DREAL CVL téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

Bien que la localisation des formes fluviales au sein du chenal ait très peu évoluée, sur le tronçon aval, des modifications notables sont visibles en rive droite, au droit du complexe d'îles. L'île (« c », Illustration 17) située en aval dans le chenal secondaire s'est élargie d'une dizaine de mètres dans sa partie médiane en rive gauche.

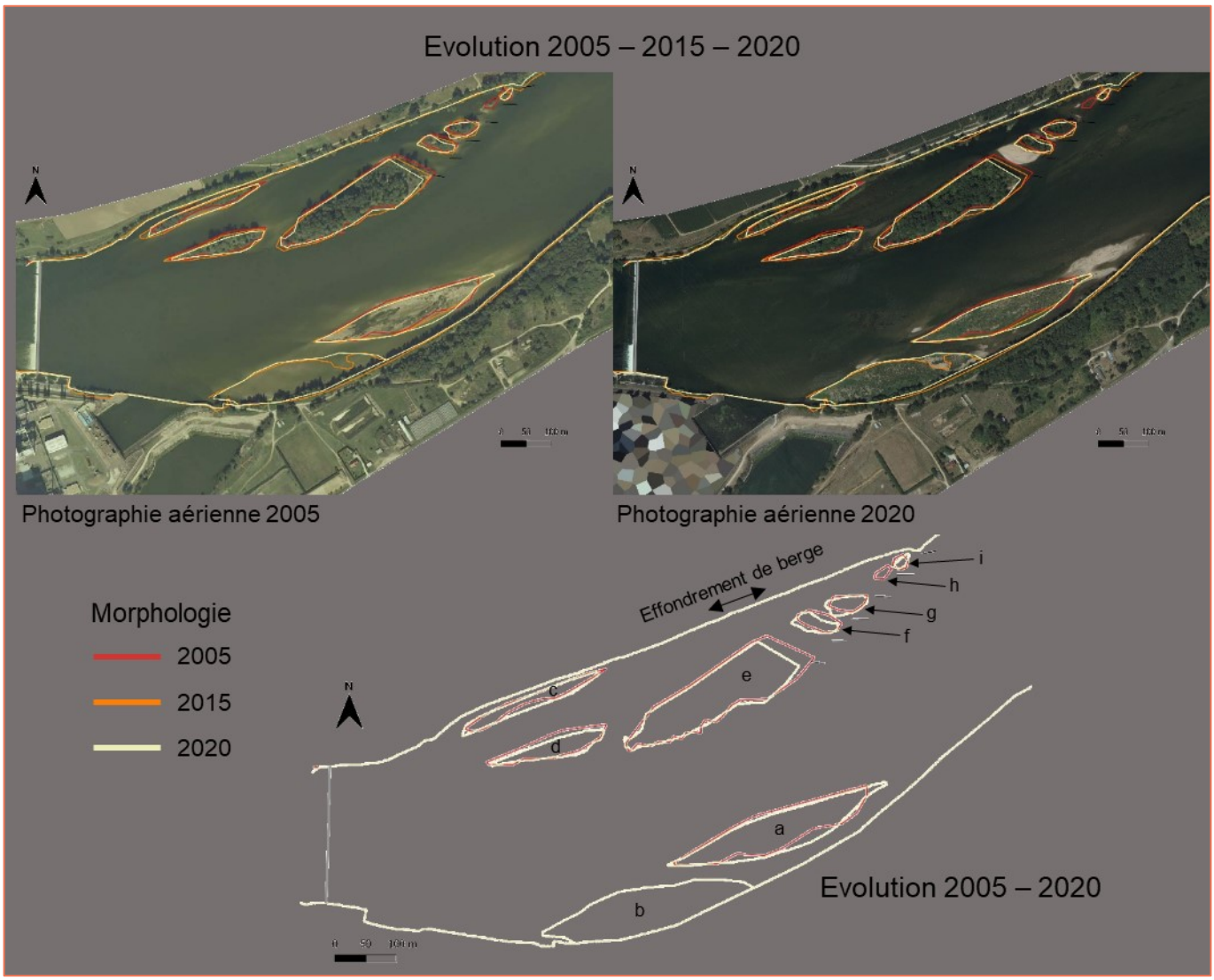


Illustration 17 : évolution de la morphologie en plan de la Loire du tronçon aval à l'amont de la centrale Saint-Laurent-des-Eaux.
(Sources : photographies aériennes du SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

Les modifications visibles sur les photographies aériennes les plus importantes concernent les îlots à l'entrée du chenal secondaire et la grande île dans leur prolongement. La partie amont de la grande île (« e », Illustration 17) a été érodée, avec un recul d'environ 20 m, et laissant apparaître le panneau de fond P7, situé le plus à l'aval (Illustration 18). Le panneau P7 n'est pas directement au niveau du sous-chenal, il est situé environ 20 m en aval, il n'a donc pour le moment pas d'influence directe sur la connexion avec le chenal secondaire.



Illustration 18 : panneau de fond mis à jour par l'érosion de berge de l'île « e », prise de vue vers l'amont le 19/02/2020. (Source : Cerema/NC-AB/GRISOM)

L'îlot juste en amont (« f », Illustration 17) s'est agrandit sur une dizaine de mètres vers l'aval ainsi, le sous-chenal d'écoulement entre la grande île et l'îlot amont s'est élargi passant de 45 m en 2005 à 55 m en 2020. L'îlot « g » s'est également élargi vers l'aval d'environ 10 m. En amont, deux îlots sont présents en 2005 (« h » et « i », Illustration 17), en 2020 seul l'îlot « i » perdure et le chenal séparant les îlots « g » et « i » mesure environ 70 m de large.

La stabilité des formes fluviales au sein du chenal est fortement liée à la colonisation des barres sédimentaires par la végétation qui participe à la stabilisation de ces unités morphologiques.

3.2.2 Evolution des fonds et morphologie actuelle

Sur le profil P1, la tendance générale d'évolution entre 2016 et 2020 est au dépôt avec un exhaussement entre 0,4 m et 0,6 m du profil bathymétrique (Illustration 19). Toutefois, cet exhaussement ne modifie pas la morphologie générale de la section qui reste inchangée avec le chenal d'écoulement et le thalweg localisés en rive gauche.

En revanche, les modifications de morphologie sont importantes sur le profil P3 entre 2016 et 2020 (Illustration 19). En rive gauche, une sédimentation d'au minimum 1,6 m est mesurée et correspond au développement de l'îlot « a » (Illustration 17) évoqué dans la partie 3.2.1 « Evolution de la forme en plan ». Le chenal d'écoulement principal s'est déplacé vers la rive droite, au pied de l'île « e » (Illustration 17), avec un abaissement de la cote du chenal dans ce secteur de 1,2 m. Toutefois, cet abaissement correspond à - 0,6 m par rapport au thalweg en 2016.

Les mesures de 2020 suggèrent que l'île « e » s'est engraissée (+ 1,2 m en bordure rive droite) et le chenal secondaire s'est creusé avec une érosion enregistrée de 1,9 m (Illustration 19 : Profil 3). Cette érosion survient entre 2015 et 2020 de manière concomitante avec le retrait des panneaux de fond en 2015. L'écart de 6 m observée sur la berge rive droite ne révèle pas un recul de la berge liée à son érosion (Illustration 19 : Profil 3). En effet, cette différence est liée à la position des profils. En raison de la végétation, le profil topographique 2020 a été décalé de 6 m vers l'aval par rapport au profil bathymétrique de 2020 et 10 m en aval par rapport au profil 2016. Ce déplacement du profil vers l'aval explique le décalage, dont la valeur est relativement constante, de la berge entre 2016 et 2020. La morphologie de la berge est très similaire entre les deux profils ce qui ne serait probablement pas le cas avec de l'érosion de berge.

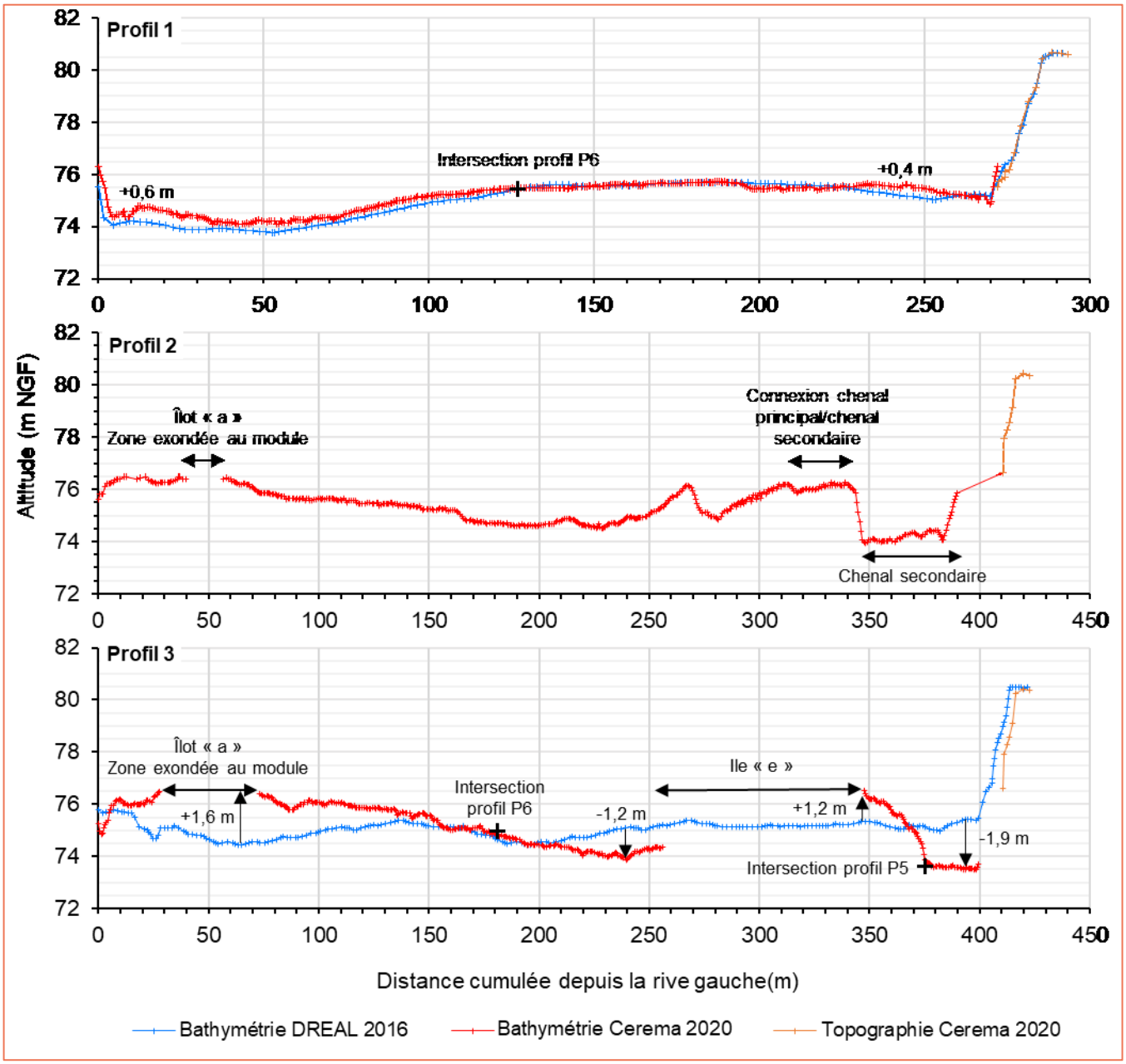


Illustration 19 : profils transversaux topo-bathymétriques P1, P2 et P3 de 2020 et comparaison avec les profils en travers 2016. Les croix noires sont les points issus des profils en long P5 et P6 à l'intersection avec les profils en travers. (Sources : SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

Les profils en long bathymétriques P5 et P6 se raccordent correctement aux données des profils en travers P1, P2 et P3 à leurs intersections (Illustration 20). Sur le profil en long P6, des dunes sont présentes dans le chenal principal et particulièrement visibles sur la partie aval du profil. Dans cette partie, elles ont une hauteur de l'ordre de 0,2-0,3 m et une longueur d'onde pluri-métrique n'excédant pas 10 m. Dans la partie amont du profil P5, en amont du profil P2, des dunes sont également visibles dans le chenal secondaire.

La comparaison de l'altitude aux intersections des profils en long 2020 et des profils en travers 2016 révèle très peu de variations dans le chenal principal (P6). La variation la plus importante est celle observée au droit de l'intersection avec P3, également visible sur la comparaison du profil en travers P3. En amont et en aval, les différences ne sont pas significatives et sont de l'ordre de grandeur de la hauteur des formes du lit développées sur le fond du chenal le jour des mesures en 2020.

A l'aval dans le chenal secondaire, la comparaison de l'altitude à l'intersection entre le profil en long 2020 et le profil en travers de 2016, à une distance cumulée de 125 m, ne révèle pas de différence d'altitude. En revanche, au droit de l'intersection entre le profil P5 et le profil P3 sur lequel est également disponible un profil de la DREAL en 2016, la comparaison des altitudes 2016-2020 révèle une érosion importante de 1,5 m, cohérente avec l'érosion constatée sur le profil P3.

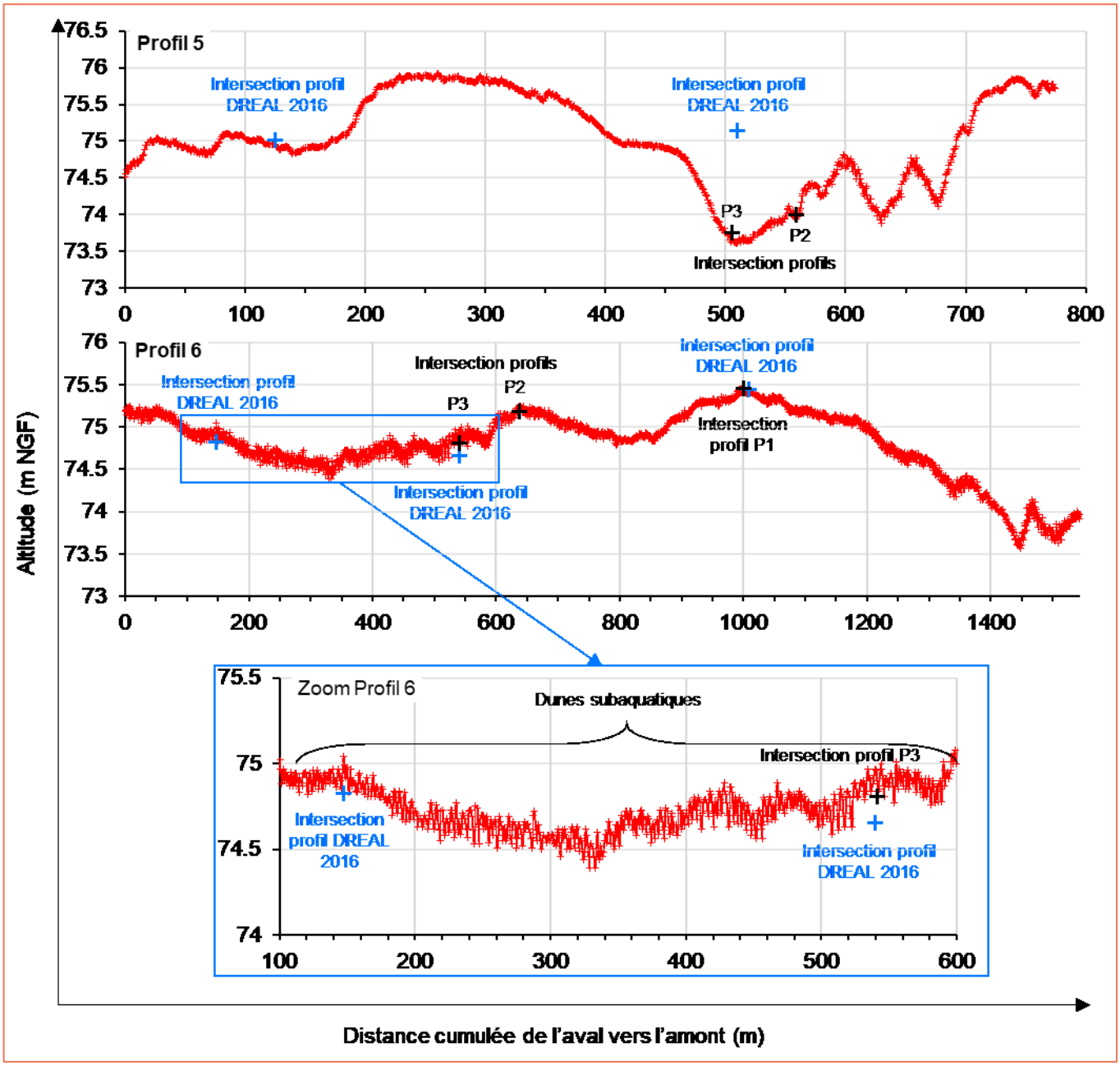


Illustration 20 : profils en long bathymétriques du chenal principal (P6) et du chenal secondaire (P5) en 2020. Les croix noires sont les points issus des profils en travers P2 et P3, les croix bleues sont les points issus des profils en travers DREAL 2016 à l'intersection avec les profils en long.
(Sources : SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

Sur les profils en travers P2 et P3, le chenal secondaire paraît incisé par rapport au chenal principal avec une cote de fond de chenal respective de 73,9 m et 73,5 m. Le profil P5 permet d'observer que l'ensemble du chenal secondaire n'est pas incisé, mais qu'il existe une dépression entre les distances cumulées 460 m et 600 m avec le point le plus bas localisé juste à l'aval de l'encoche d'érosion. Plus en amont sur le profil P5, deux dépressions moins profondes sont également visibles dont les points bas sont localisés dans l'axe d'écoulement entre les îlots « i-g » et « g-f » (Illustration 17) connectant le chenal principal au chenal secondaire.

3.2.3 Morphologie des berges rive droite et encoche d'érosion

La pente de la berge en rive droite sur le profil 1 est bien moins forte que sur les profils plus à l'aval (Tableau 2).

Tableau 2 : pente de la berge rive droite et différence d'altitude entre le haut de berge et le niveau d'eau d'étiage (Q_{Blois}=115 $m^3.s^{-1}$) au droit des profils topo-bathymétriques et topographiques complémentaires présentés d'amont en aval.

Nom de profil	P1	Pa	Pb	P2	P3	Pc	Pd
Pente (%)	43	68	73	64	58	62	63
Différence haut de berge - niveau d'eau (m)	4	1,6	3,7	3,7	3,7	3,8	1,7

A partir du profil Pa, localisé le plus à l'amont de la bifurcation entre le chenal principal et le chenal secondaire, la pente devient forte sur l'ensemble des profils (Tableau 2). Toutefois, pour les profils Pa et Pd, la hauteur de berge au-dessus du niveau d'eau d'étiage n'est pas importante puisqu'elle est respectivement de 1,6 m et 1,7 m (Illustration 21). En revanche, pour les profils Pb à Pc, la hauteur de berge au-dessus du niveau d'étiage est forte (3,7-3,8 m). Ce secteur, d'environ 230 m de long, correspond à la connexion entre le chenal principal et le chenal secondaire, influencé par la présence des îlots. La berge érodée se localise dans ce secteur de berges abruptes et hautes par rapport au niveau d'eau d'étiage.

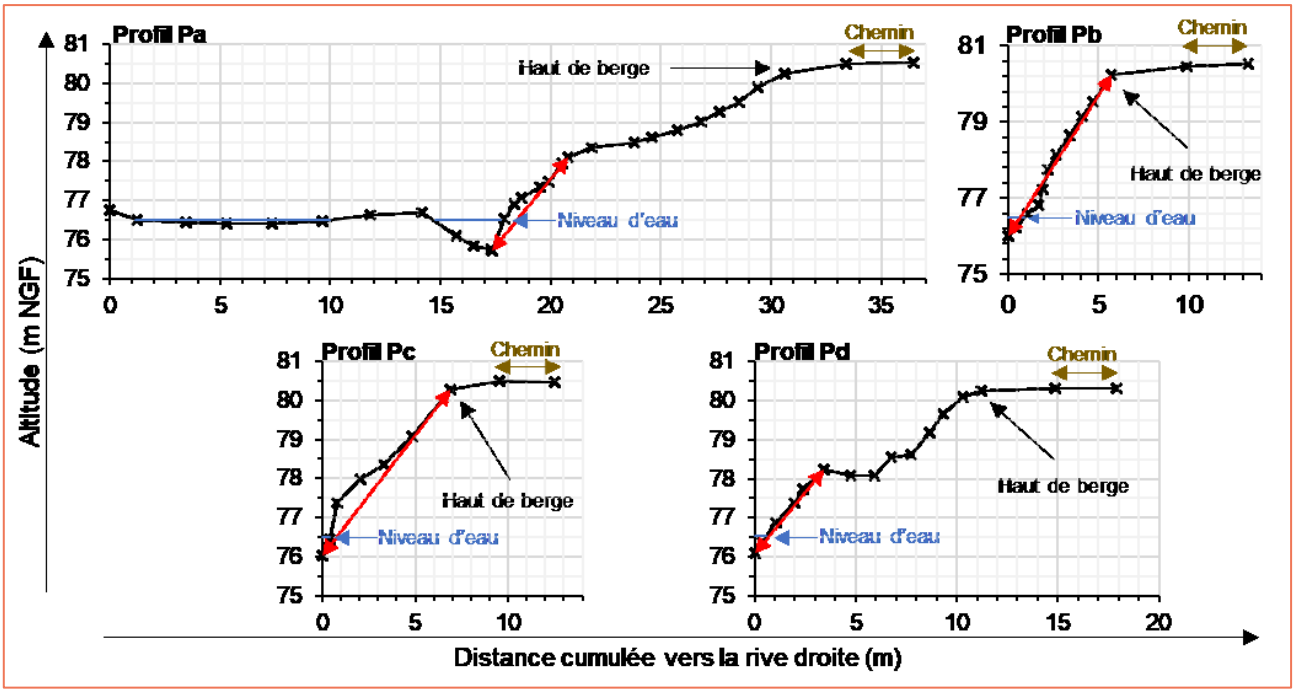


Illustration 21 : profils topographiques complémentaires des berges en rive droite.
(Source : Cerema/NC-AB/GRISOM)

Les profils topographiques de l'encoche d'érosion principale révèlent une morphologie de la berge concave avec une forte pente en haut de berge (Illustration 22B). L'encoche d'érosion mesure plus d'une vingtaine de mètre de long (Illustration 22C).

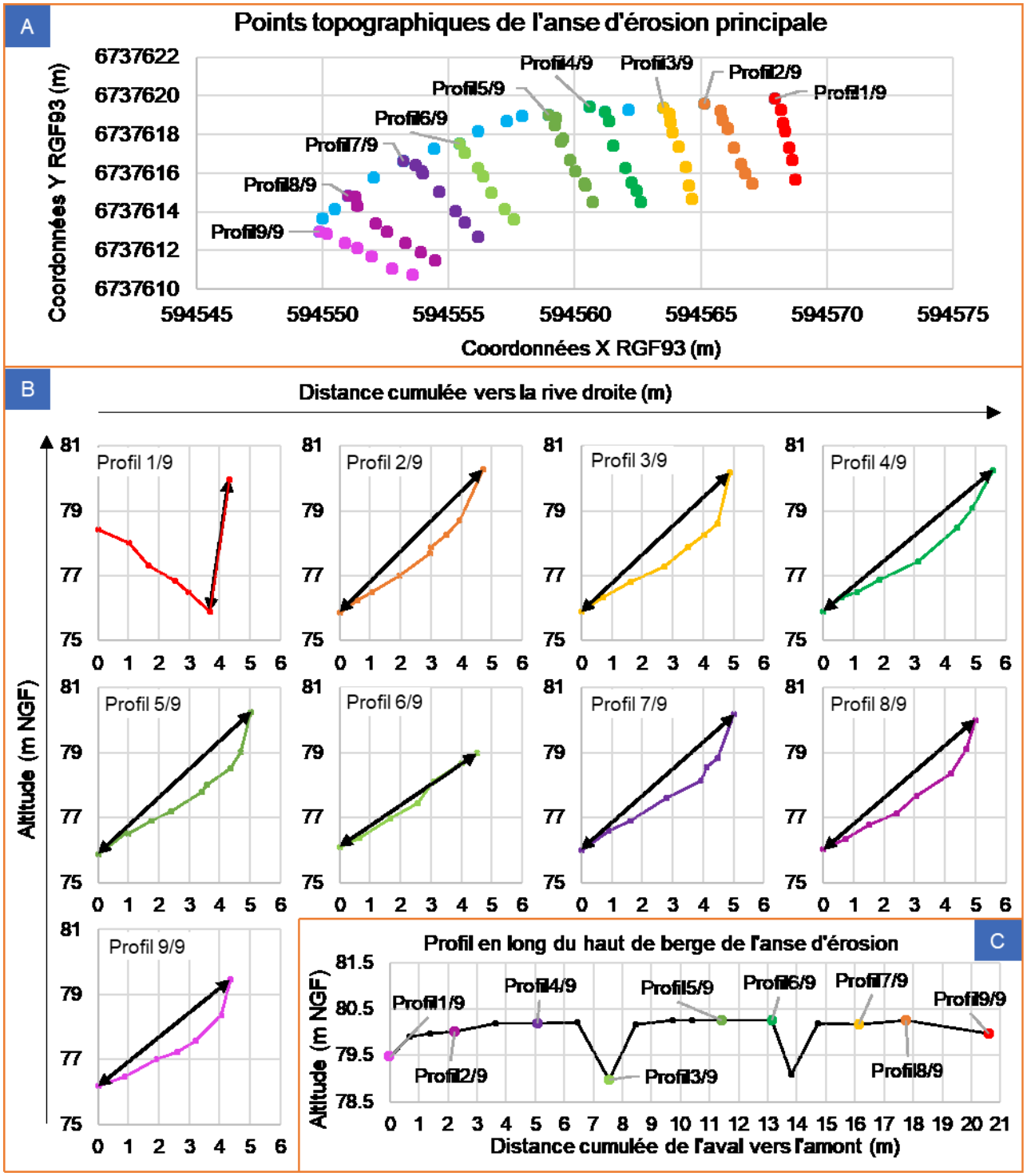


Illustration 22 : A) localisation des points et des profils levés sur l'encoche d'érosion principale ; B) profils topographiques de l'encoche d'érosion principale ; C) profil topographique du haut de berge de l'encoche d'érosion principale. (Source : Cerema/NC-AB/GRISOM))

En partie sommitale, la berge est particulièrement abrupte sur une hauteur de l'ordre métrique. Cette partie se compose de sédiments fins qui apparaissent assez cohérents (Illustration 23A et B). En dessous, la pente devient moins forte, les sédiments apparents sont composés de sables et de galets (Illustration 23A et C).



Illustration 23 : A) coupe de la berge en érosion ; B) zoom sur la partie sommitale abrupte ; C) zoom sur les sédiments en partie inférieure.
(Source : Cerema/NC-AB/GRISOM)

3.3 Végétation ligneuse

3.3.1 Evolution de la végétalisation du lit

Les photographies disponibles sur le site de l'IGN « remonter le temps » (https://remonterletemps.ign.fr/) permettent d'observer la dynamique de végétalisation depuis l'installation des panneaux de fond aux abords de l'aménagement, sur les secteurs 1, 2 et 3 (Illustration 24).

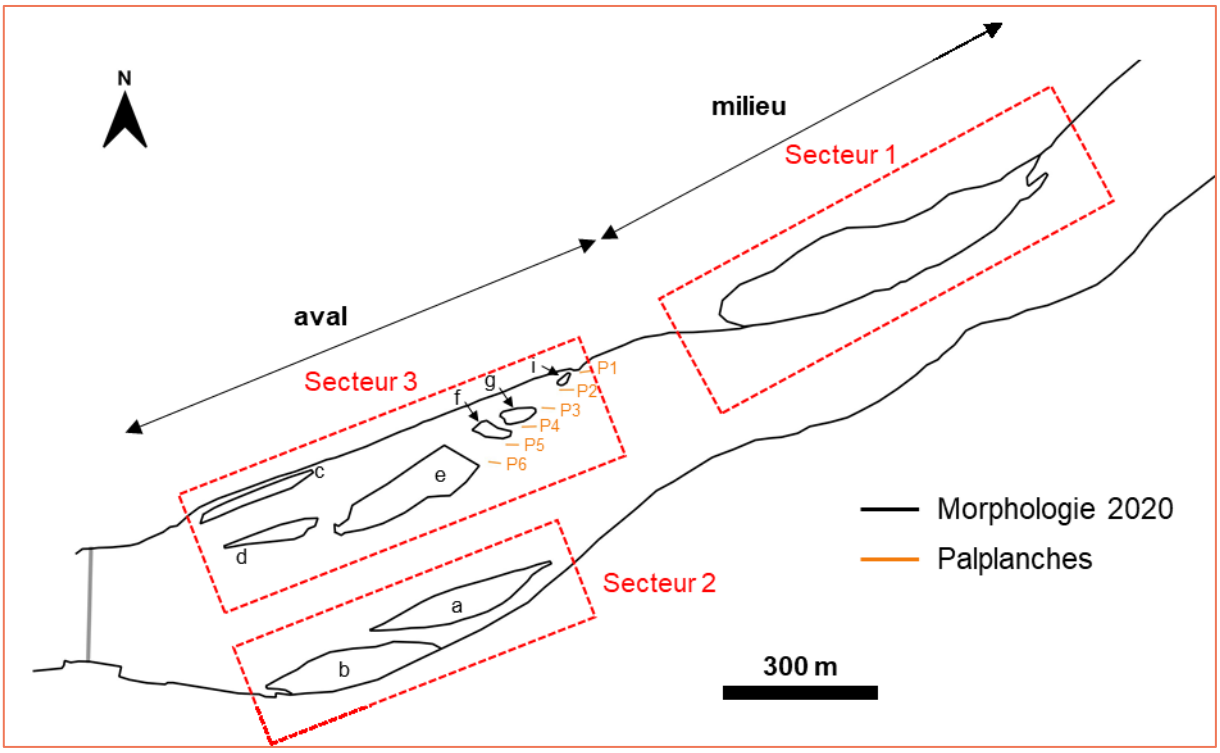


Illustration 24 : secteurs et unités morphologiques ciblés pour l'analyse de la dynamique de colonisation par la végétation. (Source : Cerema/NC-AB/GRISOM)

3.3.1.1 Secteur 1 : barre sédimentaire rive droite

Sur la photographie de 1978, apparaît la barre sédimentaire en rive droite sur le tronçon médian dont la position perdure actuellement (Illustration 25). Entre 1978 et 1986, cette barre ne se végétalise pas. A partir de 1990, la végétation semble commencer à s'installer et elle se développe entre 1990 et 1996. Sur les photographies aériennes de 1996 et 1997, la barre sédimentaire a été fortement colonisées par la végétation ligneuse et apparaît se transformer en île. Sur la photographie de l'année 2000, les peuplements boisés ont disparu ayant sûrement fait l'objet d'entretien du lit. La barre sédimentaire reste végétalisée mais fait certainement l'objet d'un entretien régulier pour éviter l'implantation des arbres. Une reprise de la végétalisation dans la partie amont de la barre est visible entre 2006 et 2011, zone qui apparaît dévégétaliser sur les photographies de 2015 et 2020.

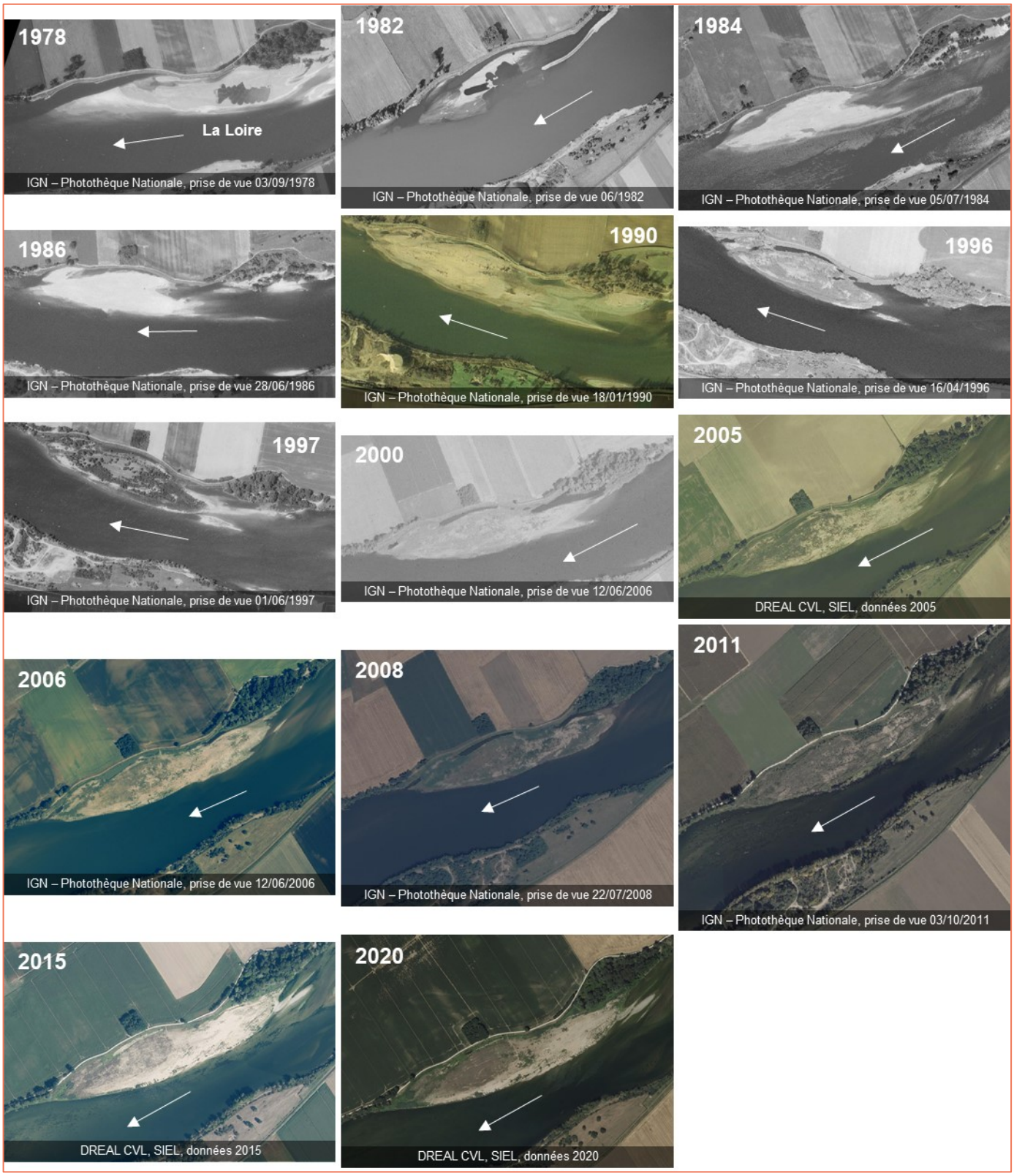


Illustration 25 : évolution et végétalisation de la barre sédimentaire rive droite du secteur 1. L'orientation des photographies et l'échelle sont différentes entre chaque photographie ; les photographies du SIEL sont orientées avec le nord vers le haut. (Sources : IGN – Photothèque Nationale, téléchargement sur https://remonterletemps.ign.fr ; photographies aériennes 2005, 2015, 2020 du SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

3.3.1.2 Secteur 2 : barres sédimentaires rive gauche – amont de la prise d'eau

La comparaison des photographies aériennes de 1968 et de 2020 permet d'apprécier la morphologie différente de la berge rive gauche en amont de la prise d'eau (Illustration 26A).

Cette berge a été reconfigurée en 1978 afin de modifier l'orientation des écoulements vers la prise d'eau pour limiter son ensablement. A partir de cette reconfiguration, la berge est stable dans le temps et propice au développement de barres de type forcé. Sur la photographie de 1984, une barre forcée est visible (« a » Illustration 26B). Jusqu'en 2000, cette barre apparaît plus ou moins exondée et non végétalisée. A partir de la photographie de 2005, la barre se végétalise. A partir de la photographie 2006, une seconde barre (« b » Illustration 26B) s'individualise à l'aval de la première. Sur les photographies de 2015 et 2020, les deux barres sont fortement végétalisées et séparées par un sous-chenal d'écoulement.

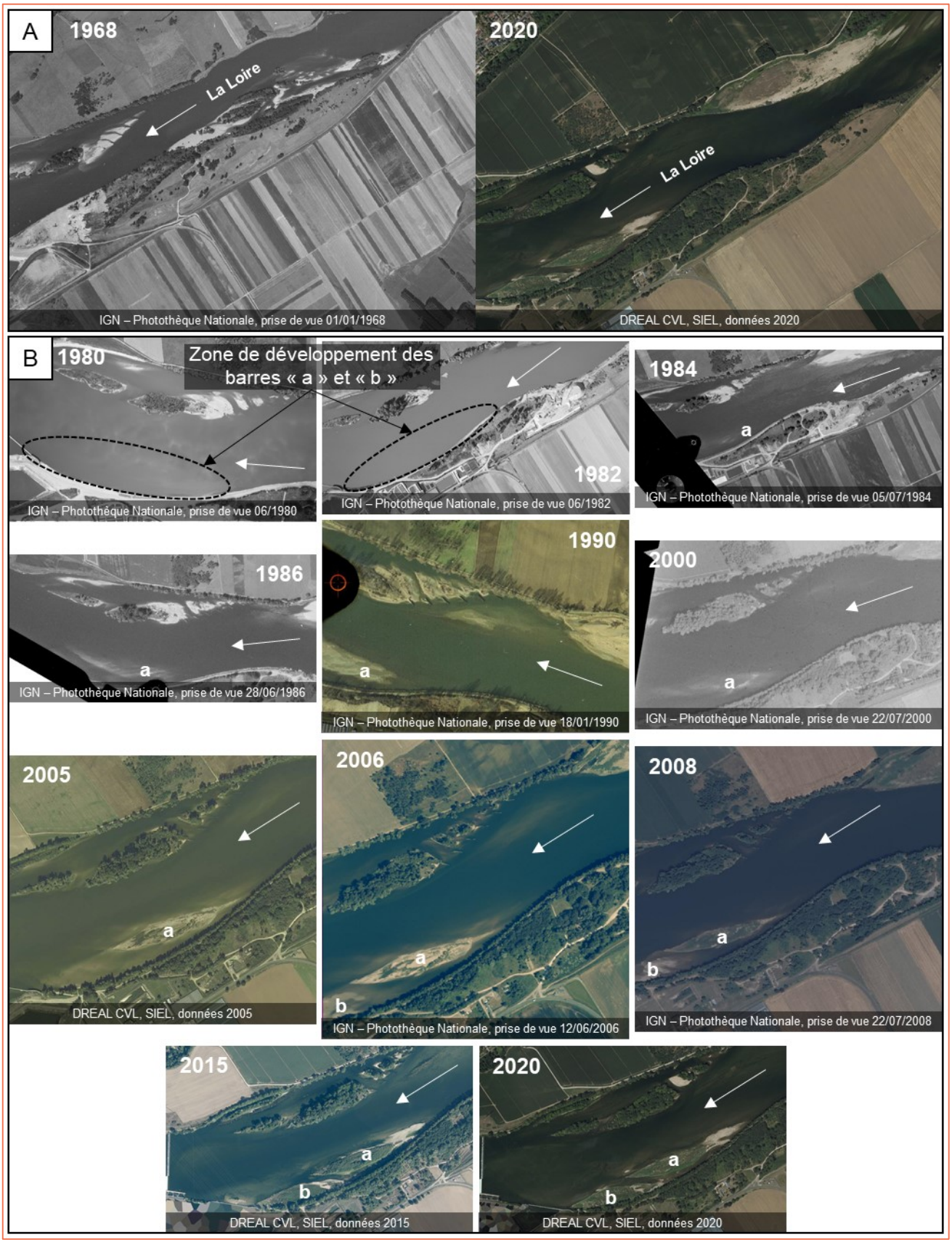


Illustration 26 : A) différence de configuration morphologique de la berge rive gauche entre 1968 et 2020 ; B) développement et végétalisation des barres sédimentaires « a » et « b » en rive gauche. L'orientation des photographies et l'échelle sont différentes entre chaque photographie ; les photographies du SIEL sont orientées avec le nord vers le haut.
(Sources : IGN – Photothèque Nationale, téléchargement sur https://remonterletemps.ign.fr ; photographies aériennes 2005, 2015, 2020 du SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

3.3.1.3 *Secteur 3 : îles et entrée du chenal secondaire rive droite*

Ce secteur concerne l'évolution du complexe d'îles et les îlots développés au droit des panneaux de fond en rive droite de la Loire. Dans la partie aval du chenal secondaire, une barre sédimentaire est régulièrement visible sur les photographies aériennes entre 1972 et 1986 (« c », Illustration 27). Sur la photographie de 2005, il est visible que cette barre sédimentaire a été colonisée par la végétation et se transforme en île, clairement identifiable sur les photographies de 2015 et 2020.

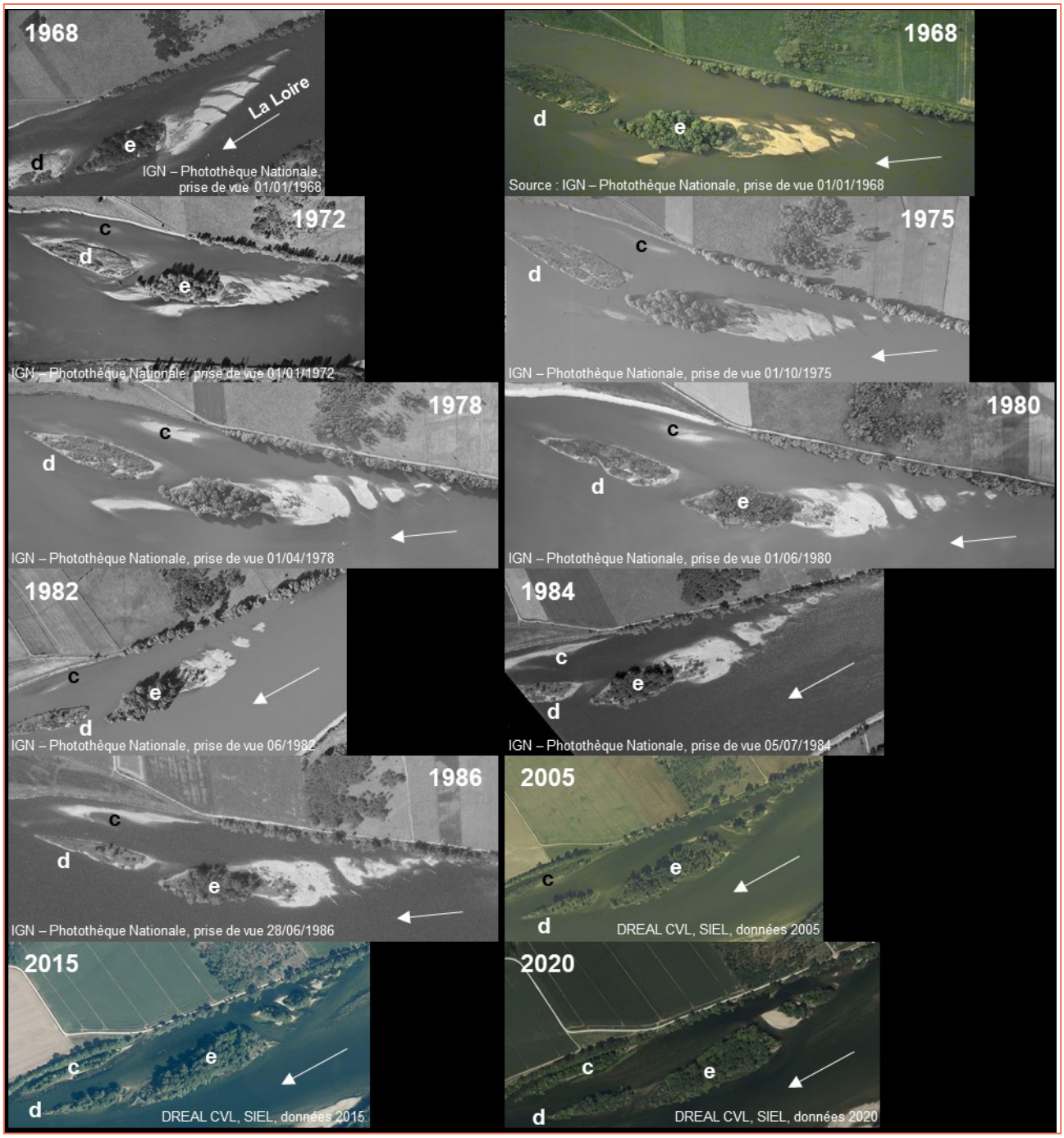


Illustration 27 : évolution des îlots « c », « d » et « e » du secteur 3 entre 1968 et 2020. L'orientation des photographies et l'échelle sont différentes entre chaque photographie ; les photographies du SIEL sont orientées avec le nord vers le haut. (Sources : IGN – Photothèque Nationale, téléchargement sur https://remonterletemps.ign.fr ; photographies aériennes 2005, 2015, 2020 du SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

Les îles « d » et « e » sont végétalisées dès 1968 (Illustration 27) avec des grands arbres sur l'île « e » alors que la végétation apparaît plus basse sur l'île « d ». Entre les deux photographies de 1968, la colonisation apparaît différente sur l'île « d » ce qui n'est pas cohérent avec les dates de prise de vue. Toutefois, cela ne change pas l'évolution constatée par la suite. A partir de la photographie de 1986, de grands arbres sont également visibles sur l'île « d ».

En amont de l'île « e », entre l'île et le panneau de fond P7 le plus à l'aval (Illustration 28), une zone de dépôt de sédiments en cours de végétalisation est visible dès 1968. La colonisation semble avoir régressée sur la photographie de 1978 puis la recolonisation reprend par la suite. A partir de la photographie de 1978, le panneau de fond la plus à l'aval, P7, n'est plus visible et la colonisation par la végétation progresse nettement à partir des années 1990. Sur la photographie de 2005, l'île s'est étendue en amont jusqu'au panneau de fond P6. Après le retrait des panneaux, entre 2015 et 2020, une érosion de la partie amont de l'île est observée et décrite dans la partie « 3.2.1 Evolution de la forme en plan ».

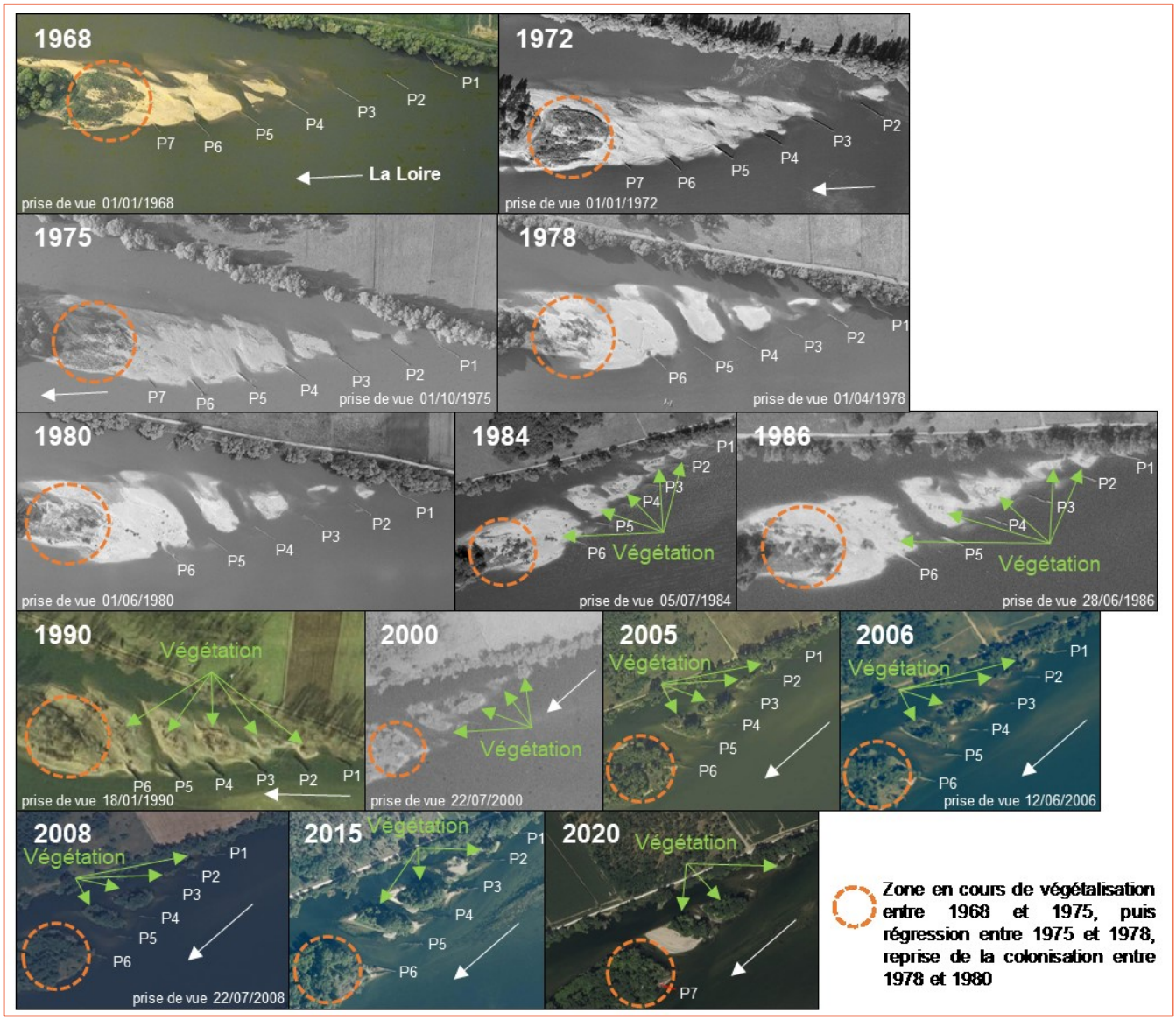


Illustration 28 : végétalisation et évolution des îlots à l'entrée du chenal secondaire, au droit des panneaux de fond, entre 1968 et 2020. L'orientation des photographies et l'échelle sont différentes entre chaque photographie ; les photographies du SIEL (2005, 2015, 2020) sont orientées avec le nord vers le haut.
(Sources : IGN – Photothèque Nationale, téléchargement sur https://remonterletemps.ign.fr ; photographies aériennes 2005, 2015 et 2020 du SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

Dès l'installation des panneaux en 1968 des dépôts de sédiments sont visibles à l'entrée du chenal secondaire (Illustration 28), répondant à l'objectif d'implantation des panneaux. Les photographies disponibles entre 1968 et 1982 (Illustration 28) attestent que ces dépôts de sédiments n'ont pas été colonisés par la végétation ligneuse au cours de cette période de 14 ans.

A partir de 1984, apparait sur les photographies, de la végétation sur les dépôts de sédiment à l'entrée du chenal secondaire, au droit des panneaux de fond (Illustration 28). Les îlots se développent entre les années 1990 et 2000 en lien avec le développement de la végétation. Au départ quatre îlots se construisent entre les panneaux P1-P2, P2-P3, P3-P4 et P4-P5. A partir de 2005, l'îlot entre les panneaux P2-P3 semble régresser, il a totalement disparu sur la photographie de 2020.

3.3.2 Végétation des berges rive droite et embâcles

Il y a de nombreux arbres sur la berge en rive droite. L'inspection de terrain de l'été 2020 a révélé que de nombreux arbres sont penchés au-dessus de la rivière et menacent de tomber (Illustration 29).

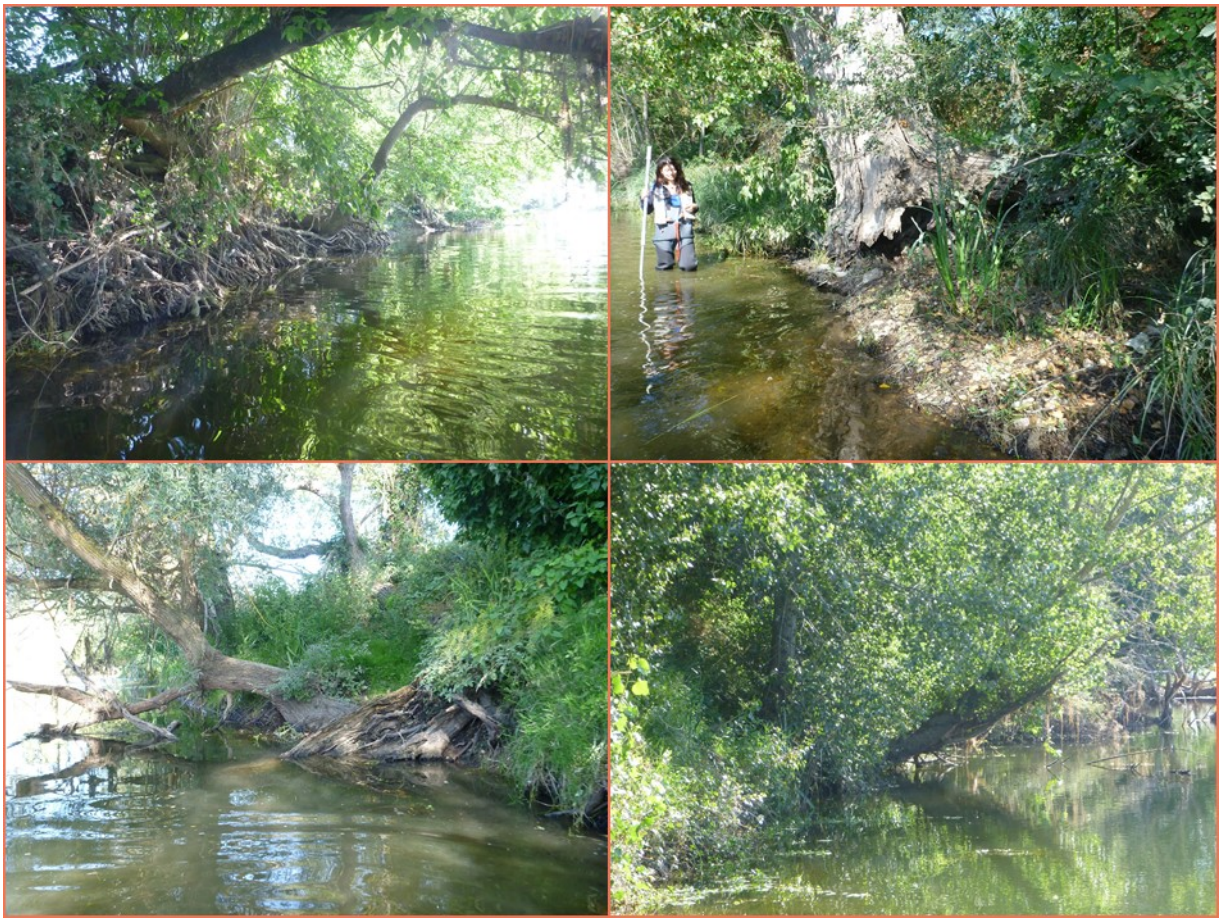


Illustration 29 : exemples d'arbres en berge rive droite penchés au-dessus de la rivière avec risque de chute dans le chenal secondaire.
(Source : Cerema/NC-AB/GRISOM)

De nombreux systèmes racinaires sont mis à nu, ce qui menace également la stabilité des arbres (Illustration 30).



Illustration 30 : exemples de systèmes racinaires d'arbres mis à nu en berge rive droite du chenal secondaire.
(Source : Cerema/NC-AB/GRISOM)

Des troncs d'arbres et des accumulations de branchages sont également visibles dans le chenal secondaire (Illustration 31).



Illustration 31 : exemple de troncs d'arbres tombés dans le chenal secondaire et d'accumulation de branchages en berge. La photographie à gauche est prise au droit de l'érosion de berge. Les flèches blanches matérialisent le sens de l'écoulement, « RD » la rive droite.
(Source : Cerema/NC-AB/GRISOM)

Ces observations ont principalement été faites dans la partie amont du chenal secondaire, entre les profils topographiques complémentaires Pb et Pc pour lesquels les berges sont particulièrement abruptes (Illustration 21).

4 SYNTHESE ET CONCLUSION

L'objectif de cette étude est de caractériser le fonctionnement de la morphodynamique de la Loire dans ce secteur pour appréhender le phénomène d'effondrement de berge survenu en rive droite de la Loire sur la commune de Tavers.

Les éléments analysés permettent de confirmer que le tronçon de Loire sur lequel est survenu l'effondrement de berge est stable. Depuis les années 90, l'hydrologie est plutôt déficitaire (3.1.1 Evolution des débits entre 1863 et 2022 – Illustration 8) et favorable au développement de la forêt alluviale qui colonise les barres sédimentaires et stabilise les formes fluviales. Les lignes d'eau d'étiage ne montrent pas de tendance à l'exhaussement ou à l'incision à l'échelle du tronçon. Ainsi, il n'y a pas de tendance d'évolution à l'échelle du tronçon qui expliquerait cet effondrement de berge.

Les modifications notables de la morphologie ont été observées localement, sur le profil 3 :

- érosion importante dans le chenal secondaire au droit de l'effondrement de berge, survenant entre 2015, année de retrait des palplanches, et 2020 ;
- érosion au droit de l'île « e » dans le chenal principal ;
- sédimentation en rive gauche en lien avec la végétalisation des barres sédimentaires.

Sur le profil bathymétrique en long dans le chenal secondaire, des dépressions sont visibles dans l'axe des chenaux de connexion entre les îlots végétalisés. La dépression la plus marquée est celle située entre le profil 2 et le profil 3, secteur de l'effondrement de berge. La colonisation des formes fluviales par la végétation s'accompagne souvent de l'incision des chenaux environnants.

Dans le chenal secondaire, les mesures en hautes eaux (deux fois le module) montrent que :

- la pente de la ligne d'eau est forte, plus forte que dans le chenal principal ;
- en aval de l'effondrement de berge (profil 3), les vitesses transverses sont dirigées vers la berge et relativement fortes, ce qui n'est pas le cas en amont sur le profil 2.

Toutefois, les directions principales de l'écoulement ne sont pas orientées vers la berge rive droite et les vitesses maximales sont plutôt localisées vers le centre du chenal.

Entre les profils Pa et Pc, la pente des berges en rive droite est abrupte et la hauteur de berge est importante ce qui est favorable à l'érosion par mouvement gravitaire. L'inspection de terrain a révélé que ces berges étaient colonisées par des ligneux menaçant de tomber (arbres penchés, systèmes racinaires mis à nu) ce qui pourrait provoquer des arrachements de berge. Plusieurs troncs d'arbres dans le chenal secondaire attestent de cette dynamique. Par ailleurs, les troncs d'arbres tombés dans le chenal secondaire depuis la rive droite peuvent engendrer des turbulences favorisant l'érosion.

Lors de l'inspection de terrain en été 2020, un tronc et des branchages étaient présents au droit de l'effondrement de berge.

La configuration morphologique de la connexion entre le chenal secondaire et le chenal principal est favorable à l'érosion de berge :

- îlots végétalisés favorisant l'incision des chenaux environnants et dépression dans le chenal secondaire accentuant la hauteur de berge ;
- forte pente de la ligne d'eau pour un débit de hautes eaux dans le chenal secondaire, associée à des vitesses de même intensité que dans le chenal principal ;
- courants transverses en hautes eaux dirigés vers la rive droite et l'effondrement de berge (profil 3).

Par ailleurs, la configuration morphologique des berges elles-mêmes est favorable à leur effondrement avec des pentes fortes.

La végétation ligneuse sur la berge rive droite dans ce secteur peut jouer le double rôle de facteur déclenchant ou aggravant de l'effondrement de berge.

Afin de limiter le risque d'effondrement ou d'aggravation d'effondrement déjà survenu, une gestion de la végétation ligneuse sur le linéaire entre les profils topographiques Pa et Pc apparaît appropriée :

- vérifier l'état des arbres et retirer les arbres menaçant de tomber et qui pourraient emporter la berge en s'effondrant ;
- retirer les embâcles qui favorisent les turbulences et l'érosion, notamment celles « accrochés » à la berge à risque.

La végétation ligneuse et les embâcles étant par ailleurs des éléments favorables à la biodiversité, cette gestion doit être vraiment ciblée sur le secteur à risque.

La configuration morphologique de la connexion apparaissant comme favorable à la survenue de l'effondrement de berge, une réflexion sur la modification de cette connexion peut être envisagée afin de limiter l'érosion du chenal et la pente de la ligne d'eau en hautes eaux.

5 REFERENCES

Bontemps, A. (2008). Fiche d'intervention sur site du 18/05/2018 C18RB0031 – PCD 402. Rapport Cerema

Bouchard, J.P. (2008). Centrale de Saint Laurent - Analyse des évolutions morphologiques du lit de la Loire en amont du site. Rapport EDF H-P73-2008-02919-FR.

Braud, S. (2019). Érosion de berge sur la commune de Tavers. Diaporama DREAL Centre-Val de Loire, Service Loire et Bassin Loire-Bretagne.

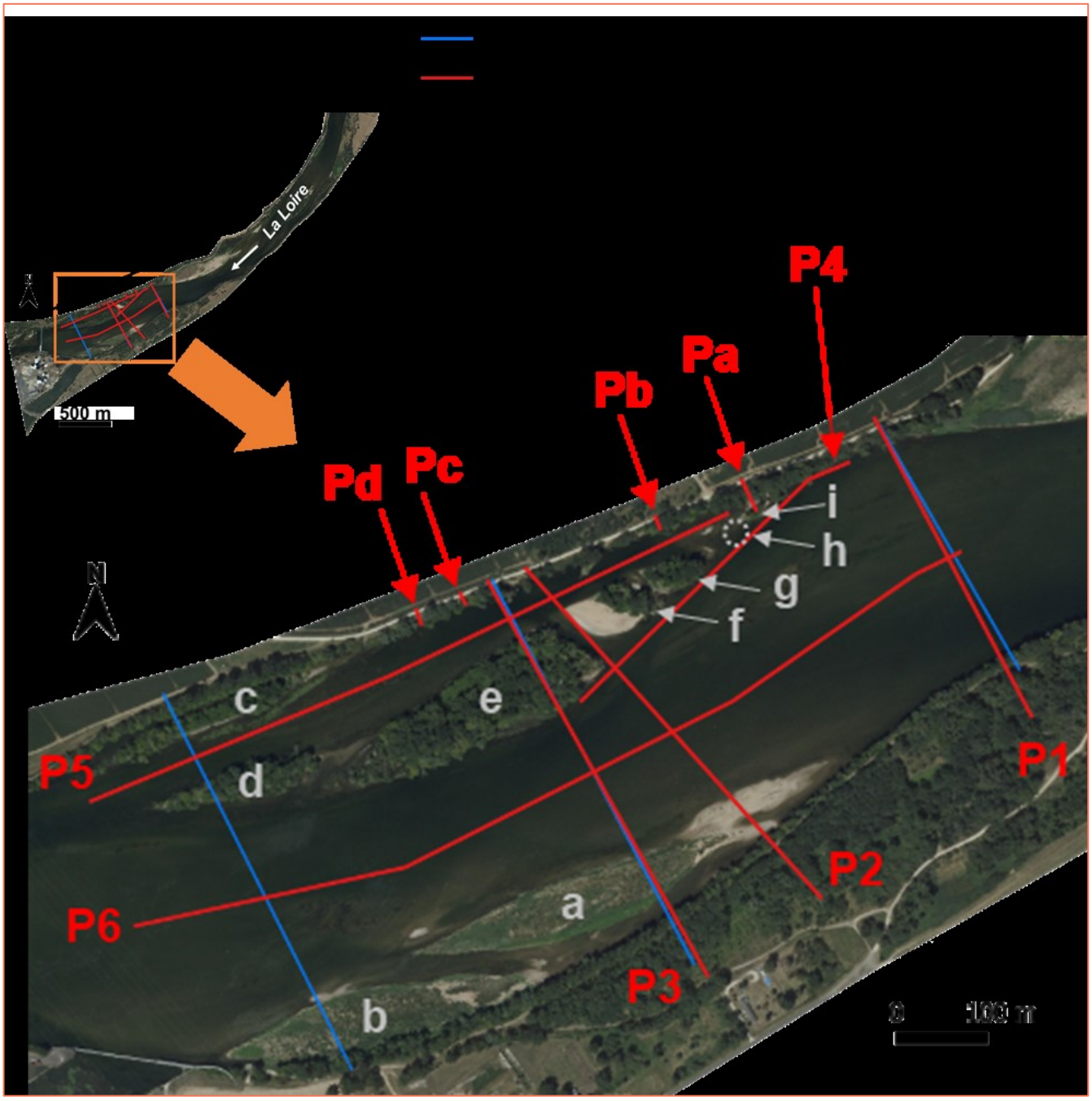
CNPE de Saint Laurent (2019). Érosion de berge sur la commune de Tavers.

Magnan M. (2015). CNPE de Saint-Laurent – Modification de l'ouvrage de prise d'eau. Rapport de fin d'intervention. Centre National d'Equipement de production d'Electricité – Direction Production Ingénierie.

6 ANNEXES

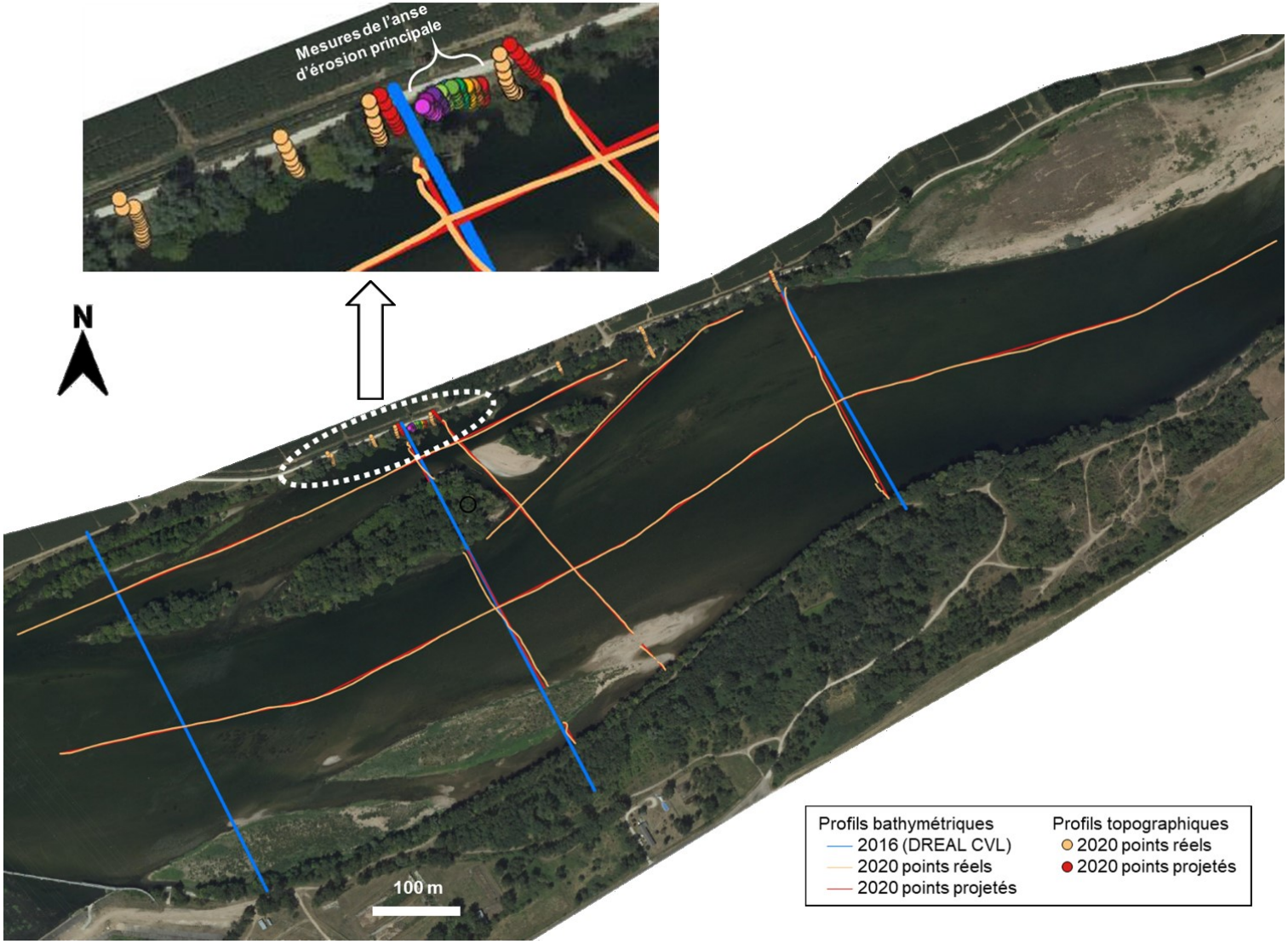
6.1 ANNEXE 1 – Cartographies

6.1.1 Agrandissement Illustration 2 : profils de mesures 2016 et 2020 ; identification des secteurs et unités morphologiques



(Sources : bathymétrie 2016 et photographie 2020 – SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

6.1.2 Agrandissement Illustration 3 : profils bathymétriques 2016, points topo-bathymétriques réels et projetés 2020



(Sources : bathymétrie 2016 et photographie 2020 – SIEL – DREAL CVL, téléchargement sur https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr ; Cerema/NC-AB/GRISOM)

6.2 ANNEXE 2 – Matériel utilisé

6.2.1 Moyens nautiques de l'équipe SOM

Moyens nautiques	Description	Mis en œuvre	Position-nement	Photo	Moyen Utilisé
Sillinger 380UM	Embarcation pneumatique à faible tirant d'eau capable d'accueillir l'ensemble de la chaine d'acquisition. Equipée d'un moteur de 20cv elle est idéale pour l'intervention sur des cours d'eau aux possibilités de manœuvre restreintes.	-Bathymétrie -Imagerie acoustique -Courantométrie	-GNSS -Optique		☒
Linder Arkip 460	Embarcation à coque aluminium capable d'accueillir l'ensemble de la chaine d'acquisition. Equipée d'un moteur de 50cv, elle est utilisée pour l'intervention sur de large cours d'eau et pour des conditions de débits conséquentes.	-Bathymétrie -Imagerie acoustique -Courantométrie	-GNSS -Optique		☐
Drone Zboat 1800	Drone nautique télépiloté capable de réaliser des mesures bathymétriques et courantométriques à distance. Maniable et réactif, il est idéal pour l'acquisition de mesures en eaux peu profondes ou pour des zones dangereuses. Il est également déployé lors d'une absence de mise à l'eau adaptée aux embarcations.	-Bathymétrie monofaisceau -Courantométrie	-GNSS -Optique		☐
Oceanscience River Boat	Trimaran à coque polyéthylène. Il est dédié à l'utilisation de courantomètre *ADCP*. Il est déployé soit à couple d'une embarcation soit tracté à la main depuis un ouvrage. Il dispose d'un très faible tirant d'eau et réduit les perturbations hydrauliques au niveau du courantomètre.	-Courantométrie	-GNSS		☒

6.2.2 Système de positionnement hydrographique et topographique de l'équipe SOM

Matériel	Mode de position-nement	Description	Mise en œuvre	Matériel associé	Photo	Moyen Utilisé
Trimble R6	GNSS	Système de positionnement par satellite (GPS + GLONASS + GALILEO) RTK (en temps réel) via le réseau Full GNSS d'Orphéon. Orphéon est un système de corrections GNSS basé sur un réseau de stations terrestres de références réparties sur le territoire dont chaque position est connue avec précision. Il permet un positionnement centimétrique en temps réel.	-Topographie -Bathymétrie -Courantométrie	-Carnet de terrain Trimble TSC2/3		☒
Trimble R7	GNSS		-Bathymétrie -Courantométrie	-Carnet de terrain Trimble TSC2/3 -Antenne Zephyr		☐
Trimble R12i	GNSS		-Topographie -Bathymétrie -Courantométrie	-Carnet de terrain Trimble TSC5		☐
Leica Viva GS14	GNSS		-Topographie	-Carnet de terrain Leica CS10		☐
Carte Trimble BD982	GNSS		-Bathymétrie multifaisceaux	--SplitBox SBG Systems Antenne Zephyr 3 x2		☐
Station totale Trimble S6	Optique	Le système de positionnement optique est utilisé lorsque le positionnement GNSS n'est pas disponible où, lorsque la précision du signal n'est pas assez élevée en raison de phénomènes de masques (e.g. ouvrage, végétation). Le système de positionnement GNSS est utilisé pour la mise en station de cet instrument.	-Topographie -Bathymétrie -Imagerie acoustique	-Carnet de terrain Trimble TSC2		☐
Station totale Trimble S5	Optique			-Carnet de terrain Trimble TSC3		☒
Centrale inertielle SBG Ekinox-U	Inertiel	La centrale inertielle intègre les mouvements du sondeur pour calculer son attitude (roulis, tangage, pilonnement et cap), sa vitesse linéaire et sa position en temps réel. Elle permet l'hybridation de la trajectoire de l'embarcation sous un ouvrage.	-Bathymétrie multifaisceaux	-SplitBox SBG Systems -Sondeur R2Sonic Sonic2020 -Célérimètre Valport mini SVS		☐

6.2.3 Systèmes d'acquisition hydrographique de l'équipe SOM

Matériel	Type de mesures	Description	Logiciel/matériel associé	Photo	Moyen Utilisé
Odom Echotrac MKIII	Bathymétrie monofaisceau	Le sondeur monofaisceau est un sondeur bathymétrique disposant d'un unique faisceau d'émission acoustique. Le signal acoustique est émis vers le nadir du sondeur par un transducteur à large ouverture et réfléchi par le fond; L'écho est reçu par le même transducteur. Connaissant la célérité du son dans l'eau, la mesure du temps de parcours permet de d'obtenir la profondeur minimale entre l'émetteur/récepteur et le fond.	-Logiciel de navigation et d'acquisition Hypack -Positionnement optique ou GNSS		☒
Odom Echotrac E20	Bathymétrie monofaisceau				☐
R2Sonic 2020	Bathymétrie multifaisceaux	Le sondeur multifaisceaux est un sondeur bathymétrique disposant d'un grand nombre de faisceaux d'émission acoustique répartis le long d'une fauchée perpendiculaire à l'axe du navire. Cette fauchée d'émission permet une couverture surfacique de la zone à lever. Le grand nombre de points acquis permet ainsi d'obtenir la morphologie détaillée du fond. L'attitude du sondeur doit être connue en permanence avec précision et ces systèmes sont nécessairement couplé à une centrale inertielle.	-Logiciel de navigation et d'acquisition Hypack -Positionnement GNSS -Centrale inertielle (SBG Ekinox) -Célérimètre (Mini SVS)		☐
Sonar latéral C-Max2	Imagerie acoustique	Le sonar à balayage latéral réalise, à l'aide d'ondes acoustiques émises à haute fréquence, des images détaillées de la réflectivité des fonds et de la partie immergée de structures et d'ouvrages. Ces images sont obtenues en balayant un faisceau acoustique étroit, en incidence rasante sur le fond. Ce signal, enregistré latéralement à la direction d'avancée du sonar, constitue, ligne après ligne, une image acoustique du fond.	-Logiciel de navigation et d'acquisition Hypack -Positionnement optique ou GNSS		☐
Sonar latéral Tritech StarFish					☐

Teledyne RiverRay ADCP	Courantométrie Jaugeage	Le courantomètre ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) est un appareil basé sur l'effet Doppler capable d'enregistrer un profil des vitesses et des directions du courant. Il comporte des transducteurs piézoélectriques qui transmettent et reçoivent les signaux acoustiques. Il permet d'étudier la structure des écoulements sur une section de rivière et de calculer des débits.	-Logiciel d'acquisition WinRiverII -Positionnement GNSS		☒
Moulinet hydrométrique	Courantométrie	Courantomètre constitué d'une hélice que l'on place dans le courant, plus le courant est rapide plus celle-ci tourne vite. À chaque tour l'hélice produit une impulsion électrique, qui est transmise dans un câble, puis comptabilisée. Cet instrument permet la mesure précise de la vitesse instantanée d'un courant.	N/A		☐
CTD SONTEK CastAway	Mesure de célérité, etc.	Le célérimètre permet de mesurer la vitesse de propagation du son dans la colonne d'eau. Dans la chaine d'acquisition multifaisceaux il mesure la célérité de surface à proximité du sondeur et utilise cette donnée pour la formation des faisceaux. Cette technique est indispensable à la bonne exploitation des mesures acoustiques.	N/A		☐

6.3 ANNEXE 3 – Glossaire des sigles et abréviations

Cerema	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
GDH	Groupe Doppler Hydrométrie
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
RI	Risques Inondations
SOM	Surveillance des Ouvrages et des Milieux
SHF	Société Hydrotechnique de France
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
DDT	Direction Départementale des Territoires
CD	Conseil Départemental
DREAL CVL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Centre Val-de-Loire
SIEL	Système d'Information des Evolutions du lit de la Loire
EDF	Electricité de France
CNPE	Centre Nucléaire de Production d'Electricité
Q	Débit
SIG	*Système d'Information Géographique*
aDcp	*acoustic Doppler current profiler*
GNSS	*Global Navigation Satellite System*
GPS	*Global Positioning System (Système Américain)*
GLONASS	*Global Navigation Satellite System (Système Russe)*
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NGF	Nivellement Général de la France
PI	Passage Inférieur
RAF	Référence des Altitudes Françaises
RGF	Réseau Géodésique Français
RTK	*Real Time Kinematics*
SMF	Sondeur Multifaisceaux
SVP	*Sound Velocity Profiler*
SVS	*Sound Velocity Sensor*

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
Siège social : Cité des mobilités - 25 avenue François Mitterrand - CS 92 803 - 69674 Bron Cedex -
Tél. : +33 (0)4 72 14 30 30 – www.cerema.fr