

NOS DOMAINES D'ACTIVITÉS

UNE EXPERTISE DE L'EAU COMPLETE ET UN ACCOMPAGNEMENT SUR MESURE

Rivières, lacs et torrents

Prévention, prévision, protection, gestion du risque inondation, expertise post crue, gestion de crise.
Gestion sédimentaire.
Réalisation d'ouvrages de protection des biens et des personnes (barrages, digues, ouvrages de franchissement).

Environnement et écologie

Renaturation & valorisation des cours d'eau et milieux associés.
Développement durable.
Protection des milieux.
Continuité écologique.

Réseaux

Production, stockage & distribution d'eau potable.
Assainissement & épuration des eaux usées.
Gestion des eaux pluviales.
Conception et gestion des aménagements d'irrigation et d'enneigement.

Topographie

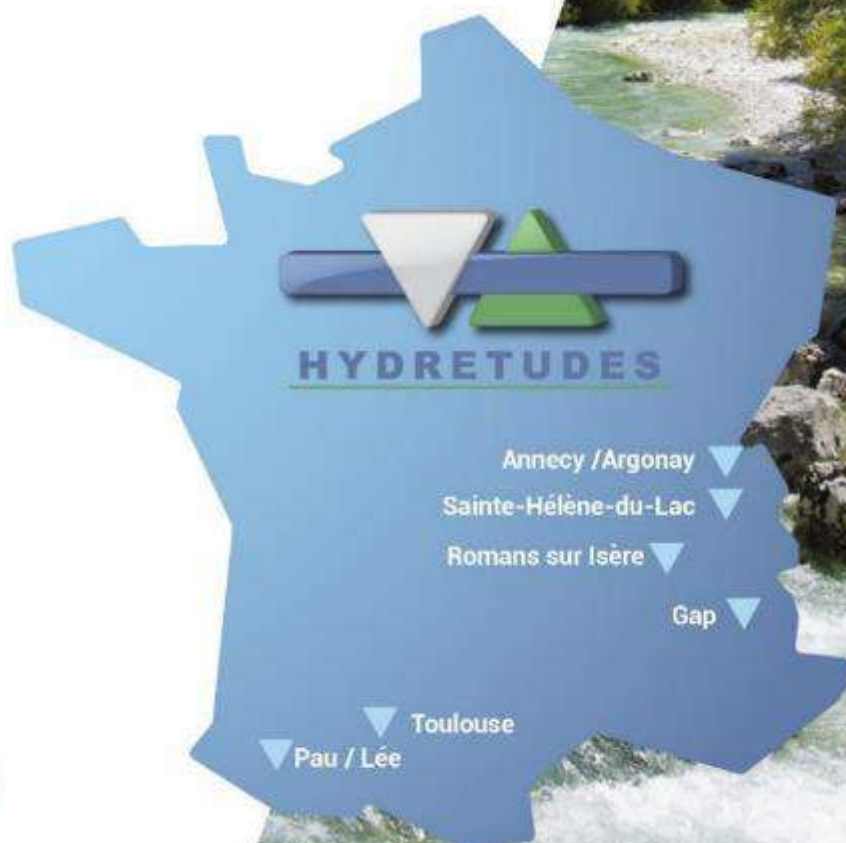
Topographie de rivières, de réseaux.
Récolement.

Contact :
contact@hydretudes.com
www.hydretudes.com



Flashez et visitez notre site

Saint-Pierre
de la Réunion



Réf. : 21-CE-1129 – AMO étude projet photovoltaïque flottant - Chevenon

Affaire suivie par :
Jean-Michel SIGAUD
Tel. : 04 73 42 10 93
Mail : jean-michel.sigaud@cerema.fr
Direction / Service : Centre-Est / ACF / GER

Note à l'attention de :

Mme Sylvie LEBOUAR
DDT de la Nièvre – SLSR / CPR
2, rue des Pâtis
BP 30069
58020 NEVERS CEDEX

Clermont-Ferrand, le 26/04/2021

Objet : avis technique projet photovoltaïque Chevenon (étude hydraulique)

NOTE TECHNIQUE

1- Rappel de la commande

La Direction Départementale des Territoires de la Nièvre (DDT58) est chargée d'instruire un projet de centrale photovoltaïque flottante sur la commune de Chevenon dans la Nièvre, porté par la société ELEMENTS. Le site choisi est situé en rive gauche de la Loire. Il s'agit d'une gravière actuellement composée de 3 bassins, dont 2 ne sont plus en exploitation, gérée par la société EQIOM.

Ce projet est opposable au PPRi de la Loire sur le secteur compris entre Nevers et Saint-Léger-des-Vignes. La prise en compte du risque inondation est par conséquent impérative dans la réflexion et le dimensionnement du projet. Les impacts du projet en termes de risque inondation doivent donc être étudiés et discutés.

La DDT58, Service Loire Sécurité Risques, a confié au Cerema, Direction Territoriale Centre-Est, une mission d'appui technique, visant à l'accompagner lors des réunions techniques préalables au dépôt du dossier d'autorisation, et à fournir un avis technique sur ce même dossier déposé par la société ELEMENTS.

La mission du Cerema porte plus précisément sur les éléments suivants :

- étude d'ancrage, réalisée par l'agence d'Autun ;
- étude hydraulique, réalisée par l'agence de Clermont-Ferrand.

Cette note technique ne traite que le volet hydraulique des études.

2- Documents analysés :

- Annexe 7 de l'étude d'impact - étude hydraulique
- Annexe 10 de l'étude d'impact - étude hydraulique et hydrogéologique de la carrière EQIOM

3- Analyse des documents remis par la société ELEMENTS

3.1 Annexe 7 de l'étude d'impact - étude hydraulique

3.1.1 Historique de l'étude et rappel des observations déjà formulées lors des échanges précédents

Tout d'abord, il est à noter qu'une première version du rapport de l'étude hydraulique (rapport version v2 du 28/10/2020, non finalisé) avait été transmise par la société ELEMENTS, et avait fait l'objet d'observations de la part du Cerema. Celles-ci portaient essentiellement sur la discrétisation du modèle hydraulique 2D très précisément au droit de la future centrale photovoltaïque. Ces observations ont ensuite été discutées lors de la réunion technique du 25/11/2020.

3.1.2 Observations sur la version v3 du rapport remis avec le dossier de l'étude d'impact

- Paragraphe 1 : Introduction :
 - **Pas d'observation**
- Paragraphe 2 : Contexte :
 - Paragraphe 2.1.3. Hydrographie :
 - De nouveaux éléments sont rapportés par rapport à la version initiale du rapport, mettant en évidence l'influence de la nappe d'accompagnement de la Loire sur le niveau d'eau dans les gravières. Cependant, il faut bien garder à l'esprit que **le modèle hydraulique** ne prend en compte que les phénomènes d'inondation par débordement de cours d'eau (Loire et ses affluents) et **ne traite pas le phénomène d'inondation par remontée de nappe**.
 - Par ailleurs, une description fine des échanges entre les gravières et le ruisseau des Prés lors des crues de Loire est fournie ; ces derniers peuvent en revanche être pris en compte dans le modèle hydraulique 2D en fonction du soin apporté à la construction du modèle hydraulique.
 - Paragraphe 2.3 : Démarche :
 - **Pas d'observation sur la méthodologie retenue**, qui est fidèle aux échanges techniques ayant précédé le dépôt du dossier.
- Paragraphe 3 : Présentation du modèle ANTEA :

Ce paragraphe a fait l'objet de quelques compléments par rapport à la version précédemment diffusée.

 - Paragraphe 3.1 à 3.6 :
 - Il s'agit d'une synthèse de l'étude hydraulique réalisée par ANTEA dans le cadre de la démarche PPRI
 - Les hypothèses retenues paraissent cohérentes en matière de choix de la Condition limite aval, du maillage « adaptatif », du choix des coefficients de Strickler, du calage du modèle sur 4 crues historiques, etc.
 - **Pas d'observation particulière** sur l'étude menée précédemment.
 - Paragraphe 3.7 : Utilisation pour le projet d'ELEMENTS
 - On retrouve globalement les mêmes éléments que dans la version précédente du rapport, avec cependant quelques compléments rapportés, qui concernent principalement les modifications à apporter au modèle ANTEA initial (non adapté au droit des gravières), et qui nécessite :
 - une densification du maillage au droit du site d'étude,
 - une actualisation de la topographie du site (prise en compte de la bathymétrie réalisée au droit des gravières),
 - un ajustement des coefficients de rugosité au niveau des bassins des gravières.
 - **Pas d'observation** sur les compléments rapportés
- Paragraphe 4 : Actualisation du modèle ANTEA :
 - Paragraphe 4.1 : Modifications
 - Le modèle hydraulique 2D repris au droit de la gravière intègre bien les modifications attendues :
 - taille des mailles de 10 mètres au droit des gravières,
 - topographie de la gravière interpolée sur le maillage affiné,
 - ajustement des coefficients de frottement (Strickler), valeur de K=25 fixée pour les surfaces en eau.
 - **Pas d'observation sur les éléments ajoutés**, conformes aux échanges précédents
- Paragraphe 5 : Comparaison des résultats entre le modèle ANTEA et le modèle actualisé
 - La rédaction de ce paragraphe (consacré à la comparaison des valeurs brutes et des changements de classes de hauteurs d'eau et de vitesses entre modèle initial et modèle actualisé) a été reprise, et intègre désormais les modifications apportées au modèle hydraulique au droit des gravières.

- **Pas d'observation** : les commentaires sont clairs et les explications suffisamment précises et détaillées pour justifier les modifications apportées au modèle hydraulique.
- Paragraphe 6 : Modélisation avec centrale photovoltaïque
 - **Ce paragraphe est totalement nouveau et fait l'objet d'un premier contrôle.**
 - Le choix du coefficient de Strickler (K=1) pour modéliser les îlots peut paraître extrême et pessimiste au regard de l'influence réelle des éléments du projet sur les écoulements. Cependant, il s'agit d'une valeur maximisante permettant d'estimer l'impact maximal induit par la présence de la centrale.
 - Les cartographies relatives aux valeurs brutes et aux classes de hauteurs et de vitesses et leurs commentaires associés n'appellent pas d'observation particulière autres que celles déjà formulées. L'impact de la centrale reste limité en termes de localisation et d'intensité sur les hauteurs et vitesses.
 - Le test de sensibilité sur le coefficient de frottement associé à la centrale indique que **le modèle est peu sensible à cette valeur** (les différences induites restent inférieures à la marge d'incertitude du modèle hydraulique), **ce qui conforte les résultats obtenus.**
 - De plus, il est important de souligner que malgré des hypothèses maximisantes sur le coefficient de rugosité associé aux structures composant la centrale, **les hauteurs d'eau obtenues pour la simulation d'une Q200 restent dans tous les cas inférieures aux PEHC.**
 - La vitesse maximale retenue « par tranche de direction de 20° » semble adaptée pour définir les hypothèses de dimensionnement des ancrages, et se veut sécuritaire.
 - Les longueurs des câbles d'ancrage sont justifiées et paraissent largement dimensionnées au regard des hauteurs d'eau minimales et maximales retenues, qui **n'appellent pas de remarque particulière**. Il en est de même pour l'implantation des éléments dits « sensibles », implantés a minima à la cote 180 mNGF.
- Paragraphe 7 : Problématique des embâcles
 - Le bureau d'études estime (à juste titre) que le site est peu sensible à la formation d'embâcles, du fait principalement de l'absence de zones productrices d'embâcles en amont immédiat des gravières. Les informations historiques indiquent toutefois la présence de quelques végétaux lors des dernières crues morphogènes observées (toutes largement inférieures à Q200), ce qui justifie ce focus dans le cadre de l'étude du projet.
 - **Les mesures préventives présentées par le bureau d'études paraissent en revanche plus difficiles à mettre en œuvre en l'état du fait que la société ELEMENT ne dispose pas de la maîtrise foncière** des terrains situés en amont et le long du fleuve :
 - l'entretien de la ripisylve nécessiterait la mise en place d'une convention préalable avec l'établissement gémapien en charge de son entretien et de sa gestion, qui n'est pas du seul ressort du futur exploitant de la centrale ;
 - de même pour l'orientation des cultures, l'exploitant n'a aucune emprise sur les futurs choix de cultures qui pourront être faits par les agriculteurs exploitant les terrains en lit majeur de la Loire ;
 - le deuxième point évoqué par ELEMENTS, consistant à évacuer des débris situés en lit majeur à l'annonce d'une crue, paraît en revanche plus réaliste et efficient, dans la mesure où les crues de la Loire sur ce secteur peuvent être anticipées suffisamment tôt grâce aux alertes vigicrues.
 - La proposition d'implanter des dromes en amont des bassins paraît bien adaptée au type de flottants attendus (principalement des débris végétaux issus des parcelles agricoles).
 - En revanche, la protection en amont du site à l'aide de peignes pour retenir les « gros flottants » (troncs, branches, etc.) nécessite des structures plus lourdes, et suppose la réalisation d'études géotechniques plus poussées et difficilement quantifiables à ce stade d'avancement, comme indiqué à juste titre par le bureau d'études.
 - Les simulations numériques avec implantation de systèmes de protection « anti-embâcles » lourds indiquent un impact relativement limité sur les hauteurs et les vitesses d'écoulement, tant en matière de localisation que d'intensité. **Sur ce point, l'analyse du bureau d'études paraît cohérente.**
- Paragraphe 8 : Conclusion
 - Il s'agit d'une synthèse des éléments traités précédemment : **pas d'observation**.

3.1.3 Conclusions sur le rapport de l'étude hydraulique

L'étude hydraulique réalisée par le bureau d'études à la demande de la société ELEMENTS répond bien aux exigences imposées par le PPRi sur la prise en compte du risque inondation dans le cadre du projet de centrale photovoltaïque flottante.

L'étude hydraulique apporte l'ensemble des éléments et justifications techniques permettant de valider le modèle. Rappelons pour cela que le modèle hydraulique sert à évaluer l'impact du projet de centrale photovoltaïque sur le risque inondation et à dimensionner les ancrages des structures à partir des vitesses d'écoulement estimées par modélisation.

Le bureau d'étude montre que le projet de centrale photovoltaïque a **un impact notable mais modéré sur les hauteurs d'eau et les vitesses au sein de la gravière, et très peu d'influence ailleurs**, ce qui valide les deux premières prescriptions imposées par la PPRi :

- 1 « [...] la présence de l'installation n'aggrave pas le risque inondation » ;
- 2 « [...] l'installation n'a pas de conséquence négative sur les zones de grand écoulement des crues, à savoir les zones de vitesse élevée. »

Les propositions techniques du bureau d'études (dimensionnement des ancrages, longueur des ancrages, décalage d'implantation par rapport aux berges, implantation des installations sensibles au-dessus de la cote $z=180$ mNGF) **sont justifiées et paraissent adaptées** eu égard aux deux dernières prescriptions prévues dans le PPRi, à savoir :

- 3 « [...] l'installation résistera à une inondation de type PHEC (de par la hauteur de submersion et de par la vitesse d'écoulement de la crue) » ;
- 4 « [...] l'installation sera dimensionnée au niveau des ancrages pour éviter tout arrachement d'une partie des composants en cas de crue. »

En revanche, les propositions de mesures préventives visant à limiter la formation d'embâcles en amont du site **mériteraient d'être précisées** (avec conventions à monter) **et peuvent être difficiles à mettre en place sans consensus avec les différents acteurs** (en particulier agriculteurs et futur établissement gémapien).

3.2 Annexe 10 de l'étude d'impact - étude hydraulique et hydrogéologique de la carrière EQIOM

3.2.1 Objectifs de l'étude

Cette étude réalisée en 2017 par Setec-Hydratec à partir de modélisations, vise en particulier à évaluer les impacts hydrauliques et hydrogéologiques du projet d'extension de la gravière exploitée par EQIOM. Le projet prévoit l'extraction de matériaux et la création de nouveaux bassins dans la zone située en amont immédiat du bassin de la gravière actuellement en exploitation.

3.2.2 Analyse succincte de l'étude

Pas d'observation particulière concernant cette étude, qui paraît largement détaillée, illustrée et argumentée.

Elle conclut au fait que le projet d'extension de la carrière « *n'induit pas de rehaussement significatif des lignes d'eau (supérieur à 1 cm) pour l'ensemble des crues étudiées (de période de retour de 50 ans à 500 ans)* ». A l'inverse, le projet « *induit un abaissement de la ligne d'eau de l'ordre de 7 cm pour les différentes crues testées (de 5,6 cm pour la crue de période de retour 500 ans à 7,6 pour les crues de faible période de retour). [...] Cet abaissement de la ligne d'eau est le plus significatif au droit du projet mais il se propage en se réduisant vers l'amont sur environ 2,5km.* ».

En résumé, le projet d'extension de la gravière aurait tendance à abaisser la ligne d'eau en cas de crue de la Loire. En revanche, l'étude ne s'intéresse pas à son impact sur les vitesses, qui restent pourtant déterminantes pour le dimensionnement des ancrages des structures composant la centrale photovoltaïque flottante.

3.2.3 Lien avec le dossier relatif à la centrale photovoltaïque flottante

Cette étude a été réalisée en 2017 à l'initiative de EQIOM, et est par conséquent totalement déconnectée du projet de centrale photovoltaïque flottante, qui n'est par ailleurs jamais évoqué dans l'étude.

A l'inverse, l'étude hydraulique de 2021 menée par Hydrétudes à la demande de la société ELEMENTS ne prend pas en compte non plus ce projet d'extension de la carrière par l'exploitant EQIOM.

L'étude de 2017 a montré que le projet d'extension n'avait pas d'impact défavorable sur la ligne d'eau lors des crues majeures de la Loire. En revanche, **elle n'a pas statué sur ses impacts en matière de dynamique des écoulements.**

Le projet d'extension de la carrière pourrait par conséquent induire des vitesses d'écoulement localement plus fortes au droit des futures installations de la centrale, ayant ainsi potentiellement une incidence directe sur le dimensionnement des ancrages.

4- Conclusion générale

L'étude hydraulique de 2021 relative au projet de centrale photovoltaïque répond bien aux prescriptions imposées par le PPRi dans la configuration actuelle de la carrière en phase d'exploitation.

En revanche, elle ne tient pas compte du projet d'extension de la carrière par l'exploitant EQIOM, qui peut avoir dans sa configuration à terme une incidence (probablement limitée) sur la dynamique des écoulements, et par conséquent sur le dimensionnement des ancrages des équipements de la future centrale photovoltaïque.

En cas de confirmation du projet d'extension de la carrière par l'exploitant EQIOM, **de nouvelles simulations pourraient être envisagées, afin d'estimer les nouvelles vitesses maximales au droit du projet**, tout en s'assurant que les ancrages restent correctement dimensionnés au regard de ces nouvelles valeurs.

Jean-Michel SIGAUD
Responsable d'études en risque inondation
et assainissement routier

**Projet de centrale photovoltaïque flottante
à Chevenon dans la Nièvre - Assistance
technique pour la thématique "Hydraulique
- PPRI"**



**Etude
hydraulique**

N° d'Affaire : ARI-20-041

Version 3

14 décembre 2020

SUIVI ET VISA DU DOCUMENT

Maitre d'ouvrage

ELEMENTS
5 rue Anatole France
34000 Montpellier
04 34 26 61 67
contact@elements.green

Affaire

Projet de centrale photovoltaïque flottante à Chevenon dans la Nièvre - Assistance technique pour la thématique "Hydraulique - PPRi"

ARI-20-041

Didier CLEMENT

Etude hydraulique

Emetteur

HYDRETUDES - Centre technique principal
815, route de Champ Farçon
74370 ARGONAY
04.50.27.17.26
contact@hydretudes.com



Document

Rapport d'étude
14 décembre 2020

Indice	Date	Mise à jour	Rédigé par	Vérifié par
1	09/12/2020	V1	C. RAUCOULES	D.CLEMENT
2	11/12/2020	V2	C. RAUCOULES	D.CLEMENT
3	14/12/2020	V3 – Reprise dernières remarques	C. RAUCOULES	D.CLEMENT
4				
5				

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES	5
LISTE DES TABLEAUX	6
1. INTRODUCTION	7
2. CONTEXTE	8
2.1. Présentation du site.....	8
2.1.1. Localisation.....	8
2.1.2. Exploitation de la gravière	8
2.1.3. Hydrographie	10
2.2. Aspect réglementaire	12
2.3. Démarche	13
3. PRESENTATION DU MODELE HYDRAULIQUE ANTEA.....	14
3.1. Généralités.....	14
3.2. Logiciel utilisé.....	14
3.3. Emprise du modèle hydraulique	15
3.4. Maillage.....	15
3.5. Conditions aux limites	17
3.5.1. Condition amont.....	17
3.5.2. Condition aval	17
3.6. Coefficient de rugosité.....	17
3.7. Utilisation pour le projet d'Eléments	18
3.7.1. Scénario retenu	18
3.7.2. Lacunes du modèle	19
3.7.3. Synthèse de l'analyse du modèle d'ANTEA.....	20
4. ACTUALISATION DU MODELE ANTEA	21
4.1. Modifications	21
4.1.1. Densité du maillage	21
4.1.2. Topographie.....	21
4.1.3. Coefficient de frottement	22
4.2. Synthèse des modèles utilisés	22
5. COMPARAISON DES RESULTATS ENTRE LE MODELE ANTEA ET LE MODELE ACTUALISE .	23
5.1. Visualisation des résultats	23
5.1.1. Documents graphiques.....	23
5.1.2. Représentation des résultats.....	23
5.2. Analyse et comparaison des résultats	24
5.2.1. Différences en termes de hauteurs d'eau	24

5.2.2.	Différences en termes de vitesses d'écoulement.....	28
5.3.	Synthèse de l'actualisation du modèle ANTEA.....	31
6.	MODELISATION AVEC CENTRALE PHOTOVOLTAIQUE	32
6.1.	Plan du projet de centrale	32
6.2.	Intégration au modèle.....	32
6.3.	Résultats	34
6.4.	Impact de la centrale sur le risque inondation	34
6.4.1.	Analyse et comparaison des résultats modèles sans et avec centrale.....	34
6.4.2.	Test de sensibilité avec un coefficient de frottement plus modéré.....	40
6.4.3.	Synthèse de l'impact de la centrale sur le risque inondation	40
6.5.	Aide au dimensionnement de la structure.....	41
6.5.1.	Dimensionnement des ancrages	41
6.5.2.	Longueur des lignes d'ancrage	43
6.5.3.	Côte d'implantation des éléments sensibles	44
6.5.4.	Synthèse des éléments dimensionnants	44
7.	PROBLEMATIQUE DES EMBACLES	45
7.1.	Sensibilité du site et historique	45
7.1.1.	Sensibilité du site.....	45
7.1.2.	Historique.....	47
7.1.3.	Synthèse.....	47
7.2.	Solutions proposées.....	48
7.2.1.	Mesures préventives	48
7.2.2.	Mesures actives.....	50
7.3.	Synthèse de la problématique des embâcles	57
8.	CONCLUSION.....	59
8.1.	Résultats de l'analyse	59
8.2.	Intégration des préconisations dans l'étude générale	61
	ANNEXES – ATLAS CARTOGRAPHIQUES	64

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Phasage quinquennal du projet d'exploitation sur 30 ans, après 2023 - EQIOM 2017	8
Figure 2: Site d'étude	9
Figure 3: Variation de la cote piézométriques (m NGF) – EQIOM	10
Figure 4: P1 - Bassin C en exploitation	11
Figure 5: P2 – Ruisseau des Prés	11
Figure 6: P3 - Exutoire trop-plein bassin C	11
Figure 7: P4 - Exutoire trop-plein bassin A	11
Figure 8: P5 - Point bas en amont de l'angle sud du bassin B	11
Figure 9: P6 - Canal de connexion entre les bassins A et C	11
Figure 10: Zonage centré sur la zone d'étude, issu du PPRi de la Loire approuvé au 17 janvier 2020 .	12
Figure 11: Emprise du modèle ANTEA en noir - Limites des communes de la zone d'étude en rouge	15
Figure 12: Maillage du modèle ANTEA avec les côtes de fond, centré sur l'aval.....	16
Figure 13: Courbe de tarage aval	17
Figure 14: Hydrogramme injecté en amont du modèle de la Loire - Période de retour de 200 ans	18
Figure 15: Localisation de la brèche modélisée	18
Figure 16: Maillage avec topographie au niveau de la gravière dans le modèle ANTEA	19
Figure 17: Maillage avec coefficient de frottement au niveau de la gravière dans le modèle ANTEA .	20
Figure 18: Maillage densifié et topographie ajustée dans le modèle actualisé.....	21
Figure 19: Maillage densifié avec coefficient de frottement dans le modèle actualisé	22
Figure 20: Différences de hauteurs d'eau observées entre M.ACTUALISE et M.ANTEA	27
Figure 21: Changements de classes de hauteurs observés entre M.ACTUALISE et M.ANTEA.....	27
Figure 22: Différences de vitesses d'écoulement observées entre M.ACTUALISE et M.ANTEA.....	30
Figure 23: Changements de classes de vitesses observés entre M.ACTUALISE et M.ANTEA	30
Figure 24: Coefficients de frottement dans le modèle avec centrale	32
Figure 25: Plan de projet d'implantation de la centrale établi par Eléments, au 4 novembre 2020	33
Figure 26: Différences de hauteurs d'eau observées entre M.CENTRALE et M.ACTUALISE	36
Figure 27: Changements de classes de hauteurs observés entre M.CENTRALE et M.ACTUALISE.....	36
Figure 28: Différences de vitesses d'écoulement observées entre M.CENTRALE et M.ACTUALISE	38
Figure 29: Changements de classes de vitesses observés entre M.CENTRALE et M.ACTUALISE.....	38
Figure 30: De-zoom de la Figure 27 - Changements de classes de hauteurs d'eau observés entre M.CENTRALE et M.ACTUALISE.....	39
Figure 31: De-zoom de la Figure 29 - Changements de classes de vitesses d'écoulement observés entre M.CENTRALE et M.ACTUALISE.....	39

Figure 32: Coupe paysagère BB' de l'îlot 1 avec ancrage, réalisée par Eléments	42
Figure 33: Plan de masse, état projeté de l'îlot 1, réalisé par Eléments	43
Figure 34: Résultats des efforts appliqués à l'îlot 1 et des ancrages à prévoir - Ciel&Terre.....	44
Figure 35: Situation du site à l'étude.....	46
Figure 36: Photo prise lors de la crue de 2008 - Vue du bassin C depuis l'amont	47
Figure 37: Photo prise lors de la crue de 2008 – Vue des bassins A et B depuis l'amont.....	47
Figure 38: Localisation des mesures préventives.....	49
Figure 39: Exemple de dromes.....	50
Figure 40: Exemple de dromes retenant des débris	50
Figure 41: Vue 3D du projet avec localisation des dromes	50
Figure 42: Direction et intensité des vitesses au pic de crue – Résultats modèle avec centrale.....	51
Figure 43: Vue aérienne du projet et localisation du peigne "anti embâcles"	52
Figure 44: Exemple de pieux métalliques dans un champ	52
Figure 45: Exemple de peignes en lit mineur	52
Figure 46: Maillage scénario 1 - Topographie avec peigne.....	53
Figure 47: Maillage scénario 2 – Topographie avec peigne	53
Figure 48: Différences de hauteurs d'eau observées entre le scénario 1 et le modèle avec centrale .	54
Figure 49: Différences de hauteurs d'eau observées entre le scénario 2 et le modèle avec centrale .	54
Figure 50: Différences de vitesses observées entre le scénario 1 et le modèle avec centrale.....	55
Figure 51: Différences de vitesses observées entre le scénario 2 et le modèle avec centrale.....	55
Figure 52: Synthèses des solutions pour répondre à la problématique d'embâcles	58
Figure 53 : Extrait du rapport de Ciel&Terre concernant le dimensionnement des ancrages.....	61
Figure 54: Extrait du rapport de Ciel&Terre concernant les paramètres d'entrées	61
Figure 55: Plan de masse du projet réalisé par Eléments	62
Figure 56: Plan de face d'un poste de transformation, réalisé par Eléments.....	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Tailles des mailles retenues.....	15
Tableau 2: Coefficients de frottement retenus à l'issue du calage	17
Tableau 3: Synthèse des caractéristiques principales des modèles.....	22
Tableau 4: Vitesses maximales extraites dans la gravière, du modèle avec centrale.....	41
Tableau 5: Vitesse maximale (m/s) observée par tranche de direction de 20° (0°=Nord ; 90°=Est) à retenir pour le dimensionnement des ancrages	59

1. INTRODUCTION

La société Eléments porte un projet innovant et d'ampleur consistant à implanter une centrale photovoltaïque flottante sur la commune de Chevenon dans la Nièvre. Le site choisi est situé en rive gauche de la Loire. Il s'agit d'une gravière actuellement composée de 3 bassins, dont 2 ne sont plus en exploitation, exploitée par la société EQIOM.

Le site se trouvant dans le champ d'application du PPRi de la Loire sur le secteur entre Nevers et Saint-Léger-des-Vignes, la prise en compte du risque inondation est impérative dans la réflexion et le dimensionnement du projet. En concertation avec les services de l'Etat, le Service Loire Sécurité Risque de la Direction Départementale des Territoires de la Nièvre (DDT 58), les impacts du projet en termes de risques doivent donc être étudiés et discutés.

Notre bureau d'études a été missionné par la société Eléments pour travailler sur les aspects hydrauliques, tant pour répondre aux exigences de la DDT 58 que pour ajuster le dimensionnement des ancrages de la centrale et protéger son intégrité lors des crues.

2. CONTEXTE

2.1. PRESENTATION DU SITE

2.1.1. Localisation

Localisé en rive gauche, dans le lit majeur de la Loire, le site à l'étude est situé sur la commune de Chevenon, environ 5km en amont de Nevers et 5km en aval de la ville d'Imphy. Sa localisation est présentée en Figure 2 en page suivante.

La quasi-totalité des terrains alentours est occupée par l'agriculture, pour grande partie de maïs. On trouve également quelques fermes isolées. Les zones boisées sont situées en bord de Loire, formant une ripisylve fournie sur quelques mètres de large allant jusqu'à 150 mètres de large par endroit. La Loire se trouve environ 4 à 5 mètres en contrebas du site à l'étude, en régime normal. Composée de 3 bassins, la gravière se situe à environ 120 mètres de la Loire pour les 2 bassins les plus proches et 600 mètres pour le bassin le plus éloigné.

2.1.2. Exploitation de la gravière

Ces bassins sont le résultat de plusieurs années d'exploitation par la société EQIOM. Les deux bassins proches de la Loire ne sont plus en exploitation (A et B dans la Figure 2). Seul le bassin éloigné (C dans la Figure 2) est actuellement exploité, avec une convention d'exploitation s'achevant en 2023.

Une nouvelle concession a été signée autorisant la société EQIOM à étendre la gravière pendant trente années supplémentaires. L'exploitation tendra à prolonger en amont le bassin actuellement en exploitation sur plusieurs centaines de mètres en parallèle de la Loire, en dehors de l'espace de mobilité fonctionnelle de la Loire. Une étude réalisée en 2014 puis complétée en 2017 par la société SETEC HYDRATEC permet de présenter ce projet porté par EQIOM¹. Une présentation du phasage du projet d'exploitation, extraite du document, est disponible dans la figure ci-contre.

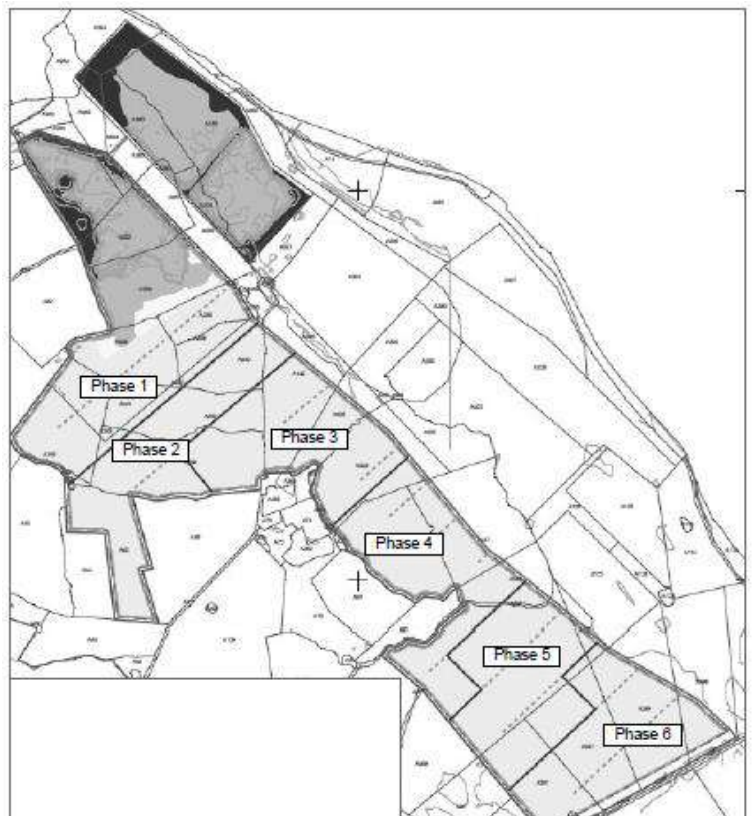
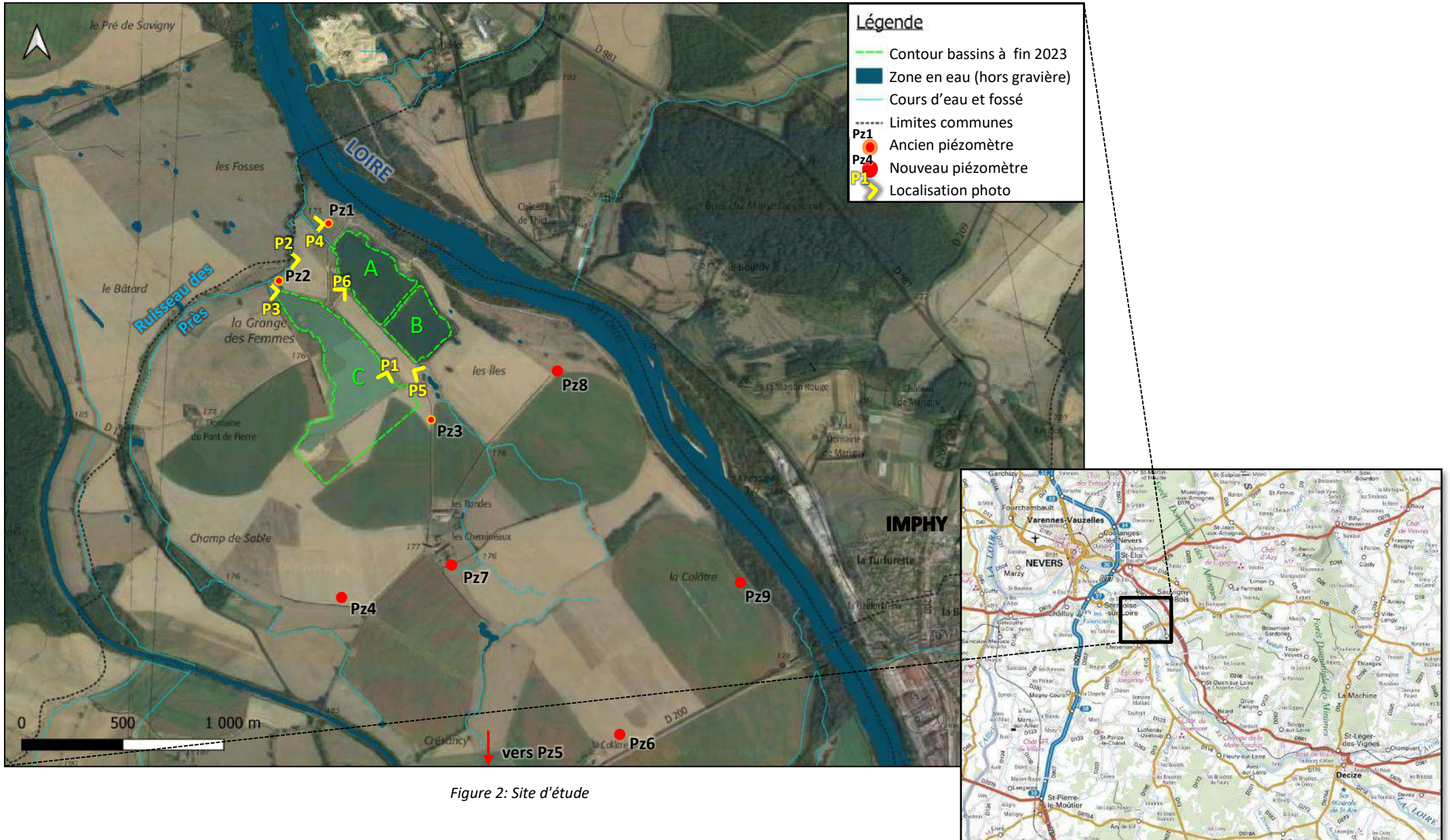


Figure 1: Phasage quinquennal du projet d'exploitation sur 30 ans, après 2023 - EQIOM 2017

¹ Demande d'autorisation pour un projet d'extension de la carrière sur la commune de Chevenon (58) - Rapport d'étude hydraulique et hydrogéologique - Mars 2017



2.1.3. Hydrographie

2.1.3.1. Influence de la nappe d'accompagnement de la Loire

La proximité avec la Loire, et donc de sa nappe d'accompagnement, permet aux bassins de la gravière leur mise en eau. Un réseau de plusieurs piézomètres posés sur et autour du site permet de mesurer le niveau de la nappe. Leur localisation est présentée en Figure 2.

Les piézomètres anciens ont été implantés en 2009, les autres dans le courant de l'année 2013. Hormis l'absence de quelques levés, on dispose d'une mesure par mois depuis la pose des piézomètres. Ainsi, l'évolution du niveau de la nappe peut être suivi. Le graphique suivant montre l'évolution du niveau de la nappe relevé aux piézomètres 1, 2 et 3 (les plus proches des bassins) entre 2015 et 2018.

Au niveau des piézomètres 1, 2 et 3, les valeurs extrêmes relevées sont de 172,3 mNGF pour le minimum et 176,1 mNGF pour le maximum. La valeur moyenne se situe à 173,8 mNGF.

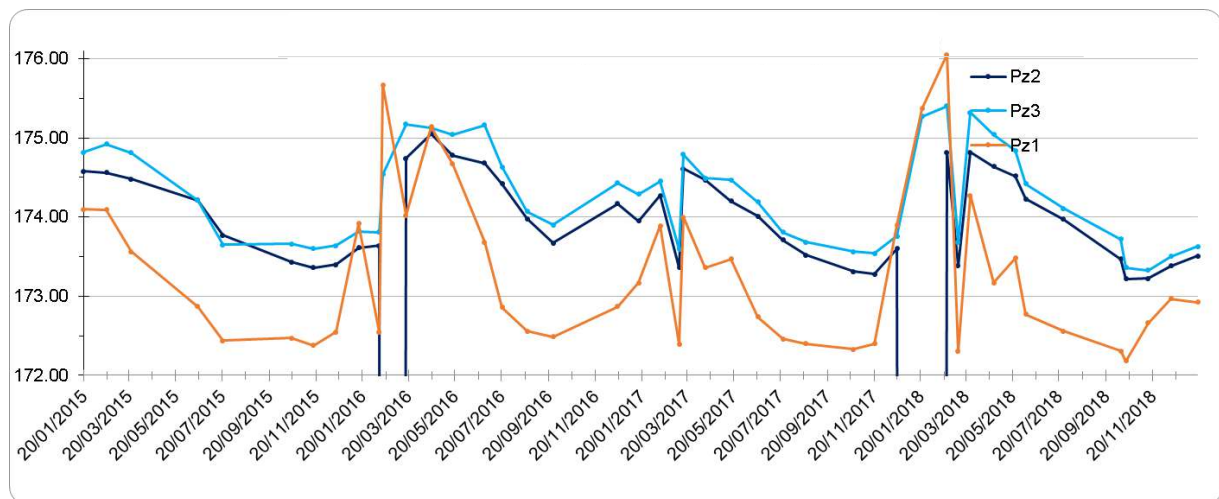


Figure 3: Variation de la cote piézométriques (m NGF) – EQIOM

Il y a une forte dépendance entre le niveau de la Loire et celui des bassins de la gravière, en communication via la nappe : il a été observé lors des épisodes de crues de la Loire, une montée du niveau de l'eau simultanément dans les bassins, par la nappe.

Un relevé topographique datant de 2017 permet de préciser la bathymétrie des bassins. Le niveau du fond est relativement homogène et se situe à une cote de 167 mNGF en moyenne. On estime que la hauteur d'eau dans la gravière varie entre 5,3 mètres et 9,1 mètres pour une moyenne à 6,8 mètres.

2.1.3.1. Réseaux hydrographiques communicants

La gravière est également connectée au fleuve par l'intermédiaire du Ruisseau des Prés (Figure 5). Ce ruisseau s'écoule en parallèle de la Loire dans un premier temps, à distance de la gravière. Puis le ruisseau s'écoule perpendiculairement à la Loire pour venir se jeter dans celle-ci, juste en aval de la gravière. Au passage, des trop-pleins des bassins (Figure 6 et Figure 7) se rejettent dans le ruisseau.

En cas d'épisode de crue, ces trop-pleins assurent une double fonction :

- ▲ A la crue, le niveau d'eau dans Loire s'élève et lorsqu'il dépasse celui du Ruisseau des Prés, on observe un écoulement inverse dans le ruisseau : l'eau remonte depuis la Loire et s'écoule en direction des bassins, participant ainsi au remplissage progressif de la gravière (en parallèle du remplissage par la nappe comme vu précédemment).

- ▲ A la décrue, lorsque le niveau de la Loire redescend en dessous de celui des bassins, l'écoulement dans le Ruisseau des Prés reprend sa direction initiale : les bassins se vident dans le ruisseau via les trop-pleins et ensuite l'eau poursuit jusqu'à la Loire.

Dans le lit majeur en rive gauche, on observe également quelques points bas qui forment des petites mares plus ou moins remplies d'eau selon le niveau de la nappe. Également, un ancien petit ruisseau assec forme un point bas, qui en cas de crue et débordement de la Loire peut devenir un axe d'écoulement préférentiel. Cet axe est situé en amont des bassins, depuis la ferme située au hameau « Les Rondes » et se jette dans la gravière, par l'angle sud du bassin B (Figure 8).

Enfin, les bassins sont connectés entre eux par des petits canaux qui permettent un équilibre des niveaux entre les bassins en cas de crue. En temps normal, ces canaux sont à sec (Figure 9).



Figure 4: P1 - Bassin C en exploitation



Figure 5: P2 - Ruisseau des Prés



Figure 6: P3 - Exutoire trop-plein bassin C



Figure 7: P4 - Exutoire trop-plein bassin A



Figure 8: P5 - Point bas en amont de l'angle sud du bassin B



Figure 9: P6 - Canal de connexion entre les bassins A et C

2.2. ASPECT REGLEMENTAIRE

Le PPRi de la Loire sur ce secteur a été approuvé au 17 janvier 2020. Les règles applicables en zones rouges A1, A2, A3 et A4 stipulent que sont autorisées :

« En dehors de l'espace de mobilité fonctionnel de la Loire, les installations de production d'électricité d'origine photovoltaïque et leurs équipements électriques (transformateurs et poste de livraison) disposées sur les plans d'eau anciennement exploités en tant que carrière, sous réserve qu'il soit démontré par une étude technique préalable que l'installation résistera à la crue de type PHEC. Cette étude devra démontrer notamment :

- 1 - que la présence de l'installation n'aggrave pas le risque inondation ;
- 2 - que l'installation n'a pas de conséquence négative sur les zones de grand écoulement des crues, à savoir les zones de vitesse élevée ;
- 3 - que l'installation résistera à une inondation de type PHEC (de par la hauteur de submersion et de par la vitesse d'écoulement de la crue) ;
- 4 - que l'installation sera dimensionnée au niveau des ancrages pour éviter tout arrachement d'une partie des composants en cas de crue.

Les équipements électriques annexes ne devront pas excéder une surface au sol de plus de 100 m² au total par installation. »

Pour rappel, les zones A1, A2, A3 et A4, telles que définies dans le PPRi, sur la zone d'étude sont présentées dans la carte ci-dessous (les couleurs du zonage ont été modifiées pour plus de lisibilité).

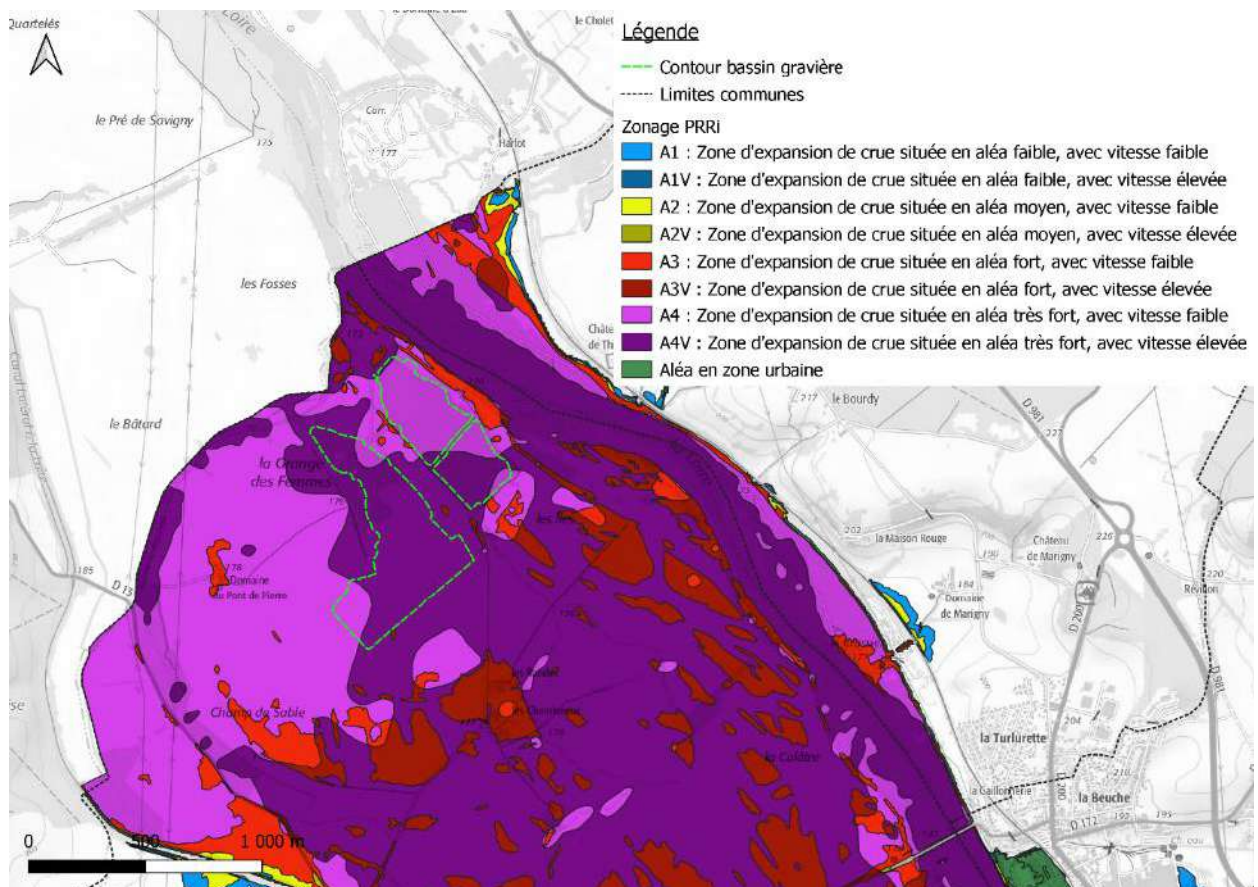


Figure 10: Zonage centré sur la zone d'étude, issu du PPRi de la Loire approuvé au 17 janvier 2020

Ainsi, l'intégralité du site se trouve concernée par les règles énoncées en page précédente. La nécessité d'une étude axée sur les questions d'hydraulique est donc bien réelle d'un point de vue réglementaire. Parmi les objectifs de la présente étude, il s'agit notamment de répondre aux 4 points soulevés par les services de l'Etat.

2.3. DEMARCHE

Après avoir pris connaissance du site et de son environnement, l'objectif premier est de vérifier que le projet de centrale photovoltaïque n'aggrave pas le risque inondation. Pour ce faire, il s'agit d'obtenir une cartographie de l'état d'inondation avec la présence de la centrale. Pour réaliser une telle carte, il a été décidé avec les services de l'Etat, de se baser sur un modèle hydraulique 2D du secteur étudié, construit par le bureau d'études ANTEA en 2016 et dont les vitesses d'écoulements ont été utilisées pour l'élaboration du PPRi. Le but est d'intégrer la centrale à ce modèle et de comparer les résultats avec centrale à ceux sans centrale (correspondant à l'état actuel). L'analyse de ces cartes doit permettre de répondre aux points 1 et 2 du règlement du PPRi.

Une fois la comparaison effectuée, il s'agit d'utiliser le modèle hydraulique avec centrale pour étudier les forces hydrauliques qui s'appliquent sur celle-ci et de les donner au bureau d'études en charge du dimensionnement des ancrages. Le but est de dimensionner les ancrages pour que la structure résiste à la crue de type PHEC et que l'intégrité de la centrale soit conservée pendant un tel événement. Les longueurs des lignes d'ancrage devront également être ajustées pour que la structure ne soit pas submergée. Enfin, les points sensibles de la centrale devront être placés hors d'eau. Cette étape doit permettre de répondre aux points 3 et 4 du règlement du PPRi.

Enfin, la prise en compte de flottants et de charriage de sédiments ou de tout corps mobilisable lors d'une crue doit être faite. Si de tels éléments venaient à s'approcher de la structure en crue, la protection de la centrale contre des dégradations doit être assurée au maximum. Cet aspect fait l'objet de la dernière étape de la présente étude pour répondre au besoin du bureau Eléments en charge de la centrale mais également aux exigences de la DDT 58 quant à la résistance de l'installation à la crue de type PHEC.

Rappels sur les limites d'un modèle :

Il convient de rappeler qu'un modèle est une représentation limitée de la réalité. Les résultats sont notamment conditionnés par la quantité et la précision des données d'entrée (topographie du lit mineur, MNT, hydrologie, informations de calage etc.). Il convient donc de ne pas s'attacher à des valeurs trop précises qui n'auraient pas de sens (en-dessous du centimètre par exemple).

3. PRESENTATION DU MODELE HYDRAULIQUE ANTEA

Sur le secteur concerné, la crue de référence du PPRi Loire correspond à la mise à jour des Plus Hautes Eaux Connues (PHEC) entre Gannay-sur-Loire et Imphy. Seules les vitesses d'écoulement, non disponibles dans la mise à jour des PHEC, ont été récupérées du scénario Q200 de l'étude ANTEA, afin de les croiser avec les hauteurs d'eau et donc d'obtenir une qualification de l'aléa inondation. A cette fin, le scénario Q200 a été choisi car celui-ci se rapproche le plus des Plus Hautes Eaux Connues sans toutefois les dépasser.

Un document, intitulé « Fleuve Loire à l'amont de Nevers dans le département de la Nièvre – Etude hydrologique, construction du modèle hydraulique et calage » et établi en juillet 2016, détaille la méthodologie utilisée par ANTEA pour la construction du modèle hydraulique. Les principaux éléments sont synthétisés ci-dessous. Pour plus de détails, se référer au document.

3.1. GENERALITES

Le secteur d'étude couvre le lit majeur de la Loire et de l'Aron, principal affluent. Les autres affluents remarquables sont l'Acolin, la Colâtre et l'Ixeure. Le linéaire approximatif de Loire étudié est de 46 km. Le linéaire approximatif de l'Aron étudié est de 14 km. 18 communes sont concernées par cette étude, dont les deux dernières en aval sont Chevenon en rive gauche et Sauvigny-sous-Bois en rive droite.

Le rapport de 2016 présente le bilan des phases 1, 2 et 3 de l'étude, à savoir le recueil et l'appropriation des données existantes, l'étude hydrologique, la construction du modèle hydraulique et le calage. Dans un premier temps, il s'agissait de :

- ▲ Décrire le contexte hydraulique du secteur d'étude,
- ▲ Recenser les crues historiques de la Loire et de ses principaux affluents,
- ▲ Réaliser une étude hydrologique visant à obtenir les hydrogrammes des crues caractéristiques de la Loire et de l'Aron : périodes de retour 2, 5, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 170, 200, 500 et 1000 ans.

Dans un deuxième temps, la construction du modèle hydraulique et son calage sont présentés.

3.2. LOGICIEL UTILISE

La modélisation hydraulique 2D (lit mineur et lit majeur) a été réalisée à l'aide du logiciel TELEMAC 2D conformément au cahier des charges de la DDT58.

TELEMAC 2D résout les équations de Barre de Saint-Venant en utilisant la méthode des éléments finis ou volumes finis et un maillage de calcul à éléments triangulaires variables. Il peut effectuer des simulations en régime transitoire et permanent. Ce logiciel est utilisé pour simuler des écoulements à surface libre dans les deux dimensions de l'espace horizontal. En chaque point du maillage, le programme calcule la profondeur de l'eau et les deux composantes horizontales de la vitesse.

3.3. EMPRISE DU MODELE HYDRAULIQUE

L'emprise du modèle hydraulique a été déterminée en tenant compte et en allant au-delà (marge de sécurité) des zones inondables connues (issues du PPRI avant révision) ainsi que des données topographiques disponibles. Elle est présentée en Figure 11.

Le linéaire de Loire modélisée s'étend depuis le lieu-dit « les Levêques » à Saint-Martin-des-Lais, jusqu'au lieu-dit « le Pré de Savigny » à Sermoise-sur-Loire soit un linéaire de cours d'eau de l'ordre de 56 km. Les 15 derniers kilomètres de l'affluent l'Aron sont également modélisés.

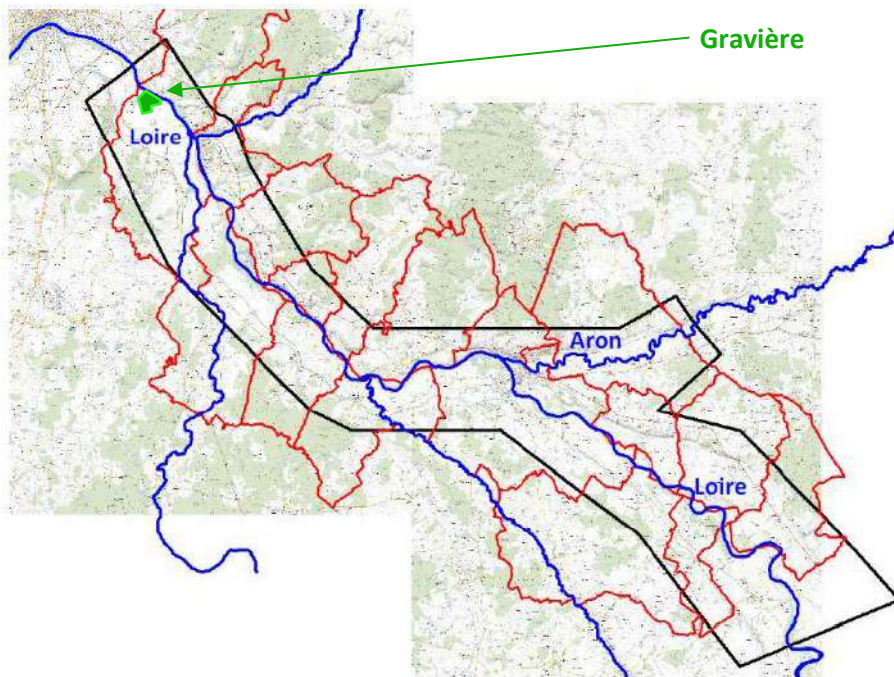


Figure 11: Emprise du modèle ANTEA en noir - Limites des communes de la zone d'étude en rouge

3.4. MAILLAGE

Les mailles ont été adaptées selon les lits mineurs mais également selon l'occupation du sol en lit majeur. Aussi, des lignes structurantes ont été intégrées au maillage afin de représenter au mieux les aménagements pouvant conditionner les écoulements. Le long de ces lignes, les tailles des mailles ont été imposées. De fait, les tailles des mailles utilisées sont :

Tableau 1: Tailles des mailles retenues

Occupation du sol	Taille de maille (m)
Lit mineur de la Loire	20
Lit mineur de l'Aron et la Vieille Loire	10
Lit majeur : Zones urbaines	10
Lit majeur : Zones d'urbanisation modérée	50
Lit majeur : Zones non urbanisées (champs, bois, etc.)	200
Lignes : Dignes et remblais	5 à 10
Lignes : Autres (voiries, merlons, ruptures de pente, etc.)	50

La topographie utilisée est issue de plusieurs sources :

- ▲ Des données du MNT LIDAR du terrain naturel et du bâti disponible sur le secteur d'étude,
- ▲ Du plan de géomètre réalisé dans le cadre de la déviation de la RD981 à Imphy,
- ▲ De la BD Alti 25m de l'IGN pour la partie non couverte par le MNT sur le lit majeur de l'Aron,
- ▲ Des profils en travers du modèle 1D Gilly-Nevers et du modèle EGRIAN pour les lits mineurs (interpolation entre les profils pour compléter le tracé).

Le maillage ainsi construit est présenté dans la figure suivante, avec la densité de maille visible et les côtes de fond en chaque point, représentées en couleurs. La figure est centrée sur l'aval du modèle, vers la gravière de Chevenon (contours des bassins représentés en pointillés).

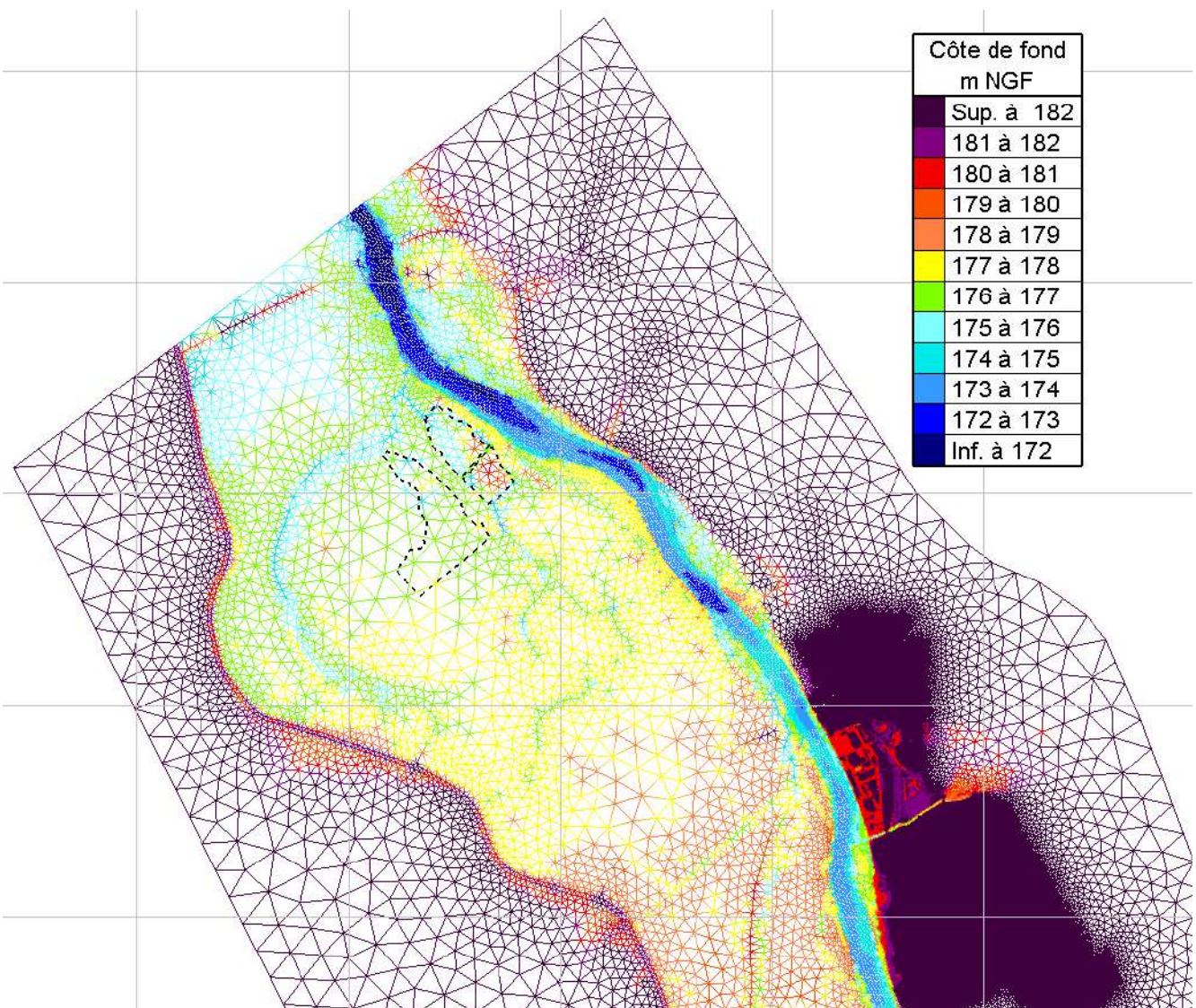


Figure 12: Maillage du modèle ANTEA avec les côtes de fond, centré sur l'aval

3.5. CONDITIONS AUX LIMITES

3.5.1. Condition amont

Les hydrogrammes de la Loire sont injectés en amont du modèle au droit du lieu-dit « Les Levêques » sur la commune de Saint-Martin-des-Lais. Les hydrogrammes de l'Aron sont injectés en amont du modèle en aval immédiat du pont de la RD169 sur la commune de Verneuil.

Une étude hydrologique détaillée dans le document a permis de déterminer ces hydrogrammes.

3.5.2. Condition aval

La condition limite aval est fixée au droit du bourg de Saint-Eloi.

Une courbe de tarage a été construite sur la base des niveaux de crues atteints à cet endroit, crues dont les débits de pointes ont pu être estimés.

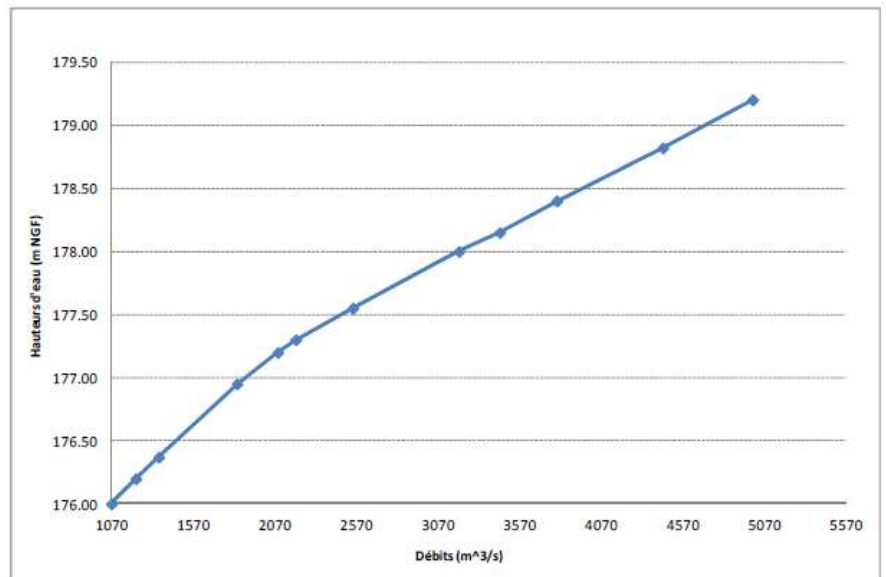


Figure 13: Courbe de tarage aval

3.6. COEFFICIENT DE RUGOSITE

Un calage a été effectué pour adapter les paramètres hydrauliques du modèle et ainsi reproduire le plus fidèlement possible les conditions d'écoulement réelles connues pour des crues historiques. Ce calage a été réalisé à l'aide de 4 crues de la Loire qui sont assez bien documentées (laises de crues, jaugeages, etc.).

A l'issue du calage, les coefficients de rugosité retenus sont :

Tableau 2: Coefficients de frottement retenus à l'issue du calage

Zone	Coefficient de Strickler K
Lit mineur Loire	20 à 40
Lit mineur Vieille Loire	30
Lit mineur Aron	20
Zones boisées	10
Prairies/cultures	20
Zones urbaines	15

3.7. UTILISATION POUR LE PROJET D'ÉLEMENTS

3.7.1. Scénario retenu

Dans le cadre du projet d'Éléments, une des préconisations de la DDT58 est que la centrale photovoltaïque doit résister à la PHEC. La plus forte crue connue correspond à la combinaison des crues historiques du 19^e siècle (1846, 1856 et 1866). Ces trois crues étant plus forte qu'une crue centennale, elles ont été retenues comme crue de référence (pour rappel, dans la réglementation des PPRi, la crue de référence doit être la crue centennale ou la PHEC si celle-ci est supérieure. C'est le cas ici). En cohérence avec la méthodologie retenue pour déterminer les vitesses d'écoulement du PPRi Loire, et à la demande de la DDT58, le scénario retenu pour la suite de l'étude est celui de la crue Q200 ans. L'hydrogramme correspondant est présenté dans la figure suivante.

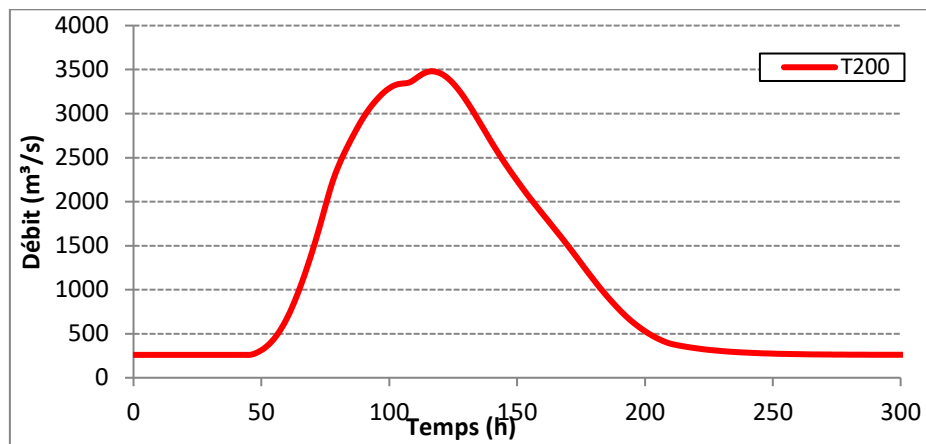


Figure 14: Hydrogramme injecté en amont du modèle de la Loire - Période de retour de 200 ans

Dans l'étude réalisée par ANTEA, le scénario de crue 200 ans est accompagné d'une rupture de digue. En effet, sur le linéaire modélisé, plusieurs digues sont présentes en bord de Loire. Afin de partir sur les mêmes hypothèses de modélisation, cet élément est conservé dans le cadre de la présente étude. La brèche modélisée est située sur la digue de Luthenay Uxeloup, sur le premier tronçon de la digue (à hauteur du lieudit Farchat). La largeur de brèche est de 150 m et descend jusqu'au TN de la zone protégée. Le temps d'ouverture est de 2h. Cette brèche est située bien en amont du site à l'étude, à environ 13 km (Figure 15).

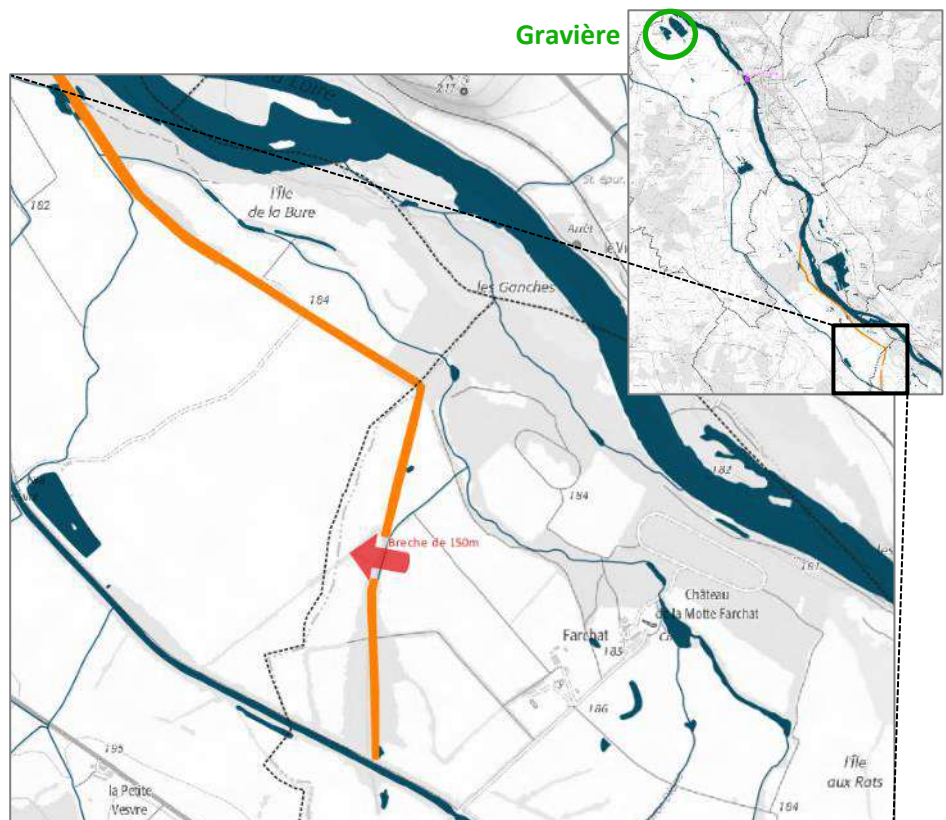


Figure 15: Localisation de la brèche modélisée

3.7.2. Lacunes du modèle

3.7.2.1. *Densité du maillage*

Comme vu précédemment, le modèle construit par ANTEA concerne un linéaire important de la Loire et de son lit majeur. Afin d'éviter des problématiques d'instabilité du modèle et des temps de calculs disproportionnés, la densité du maillage a été ajustée au mieux. Sur les zones ne présentant pas d'intérêt majeurs (absence d'enjeux notamment) il est normal que la densité du maillage ne soit pas élevée.

Ainsi, la zone concernant le projet de centrale correspondait auparavant à une zone sans enjeu, d'où le maillage proposé par ANTEA qui est à juste titre assez lâche : les mailles sont d'environ 70 mètres (de 30 mètres à 180 mètres pour les plus grandes, voir en Figure 16). Le modèle est donc correct mais il ne permet pas de représenter finement le terrain, notamment en vue d'y intégrer la centrale photovoltaïque et d'étudier ses impacts. Il est important de souligner cet élément constituant une première limite du modèle en l'état : il serait opportun de densifier le maillage au droit du site.

3.7.2.2. *Topographie*

Sur la zone de la gravière, les données topographiques disponibles et intégrées au modèle sont issues du LIDAR. Cependant, la technologie LIDAR ne permet pas de réaliser des levés bathymétriques suffisamment fiables pour être exploités. En effet, le LIDAR peut mesurer l'altitude du fond d'une surface en eau seulement lorsqu'il y a un faible tirant d'eau et que la turbidité de l'eau est faible. Dans le cas contraire, le LIDAR fournit l'altimétrie de la surface de l'eau.

Ainsi, le fond de la gravière n'a pas été correctement pris en compte dans le modèle réalisé par ANTEA. Dans la Figure 16, un extrait du maillage au niveau de la gravière permet de visualiser la topographie interpolée en chaque point. Alors que le fond de la gravière se situe à la cote de 167 mNGF environ, on observe que dans l'emprise des bassins la topographie varie entre 176 mNGF et 180 mNGF. Soit largement au-dessus. Afin de représenter au mieux la gravière et son influence sur les écoulements, il serait nécessaire d'actualiser localement la topographie.

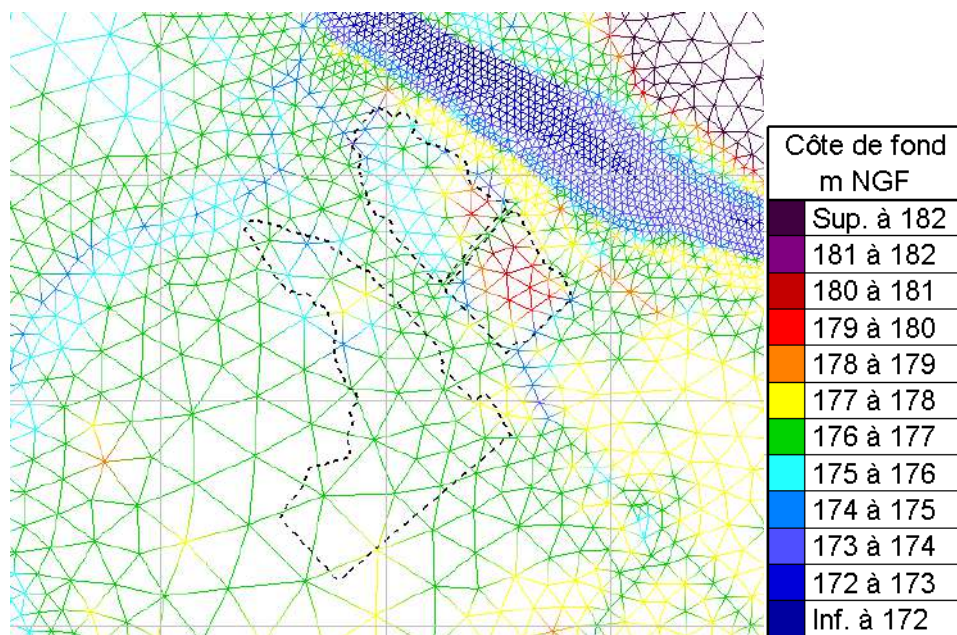


Figure 16: Maillage avec topographie au niveau de la gravière dans le modèle ANTEA

3.7.2.3. Coefficient de frottement

Comme pour la topographie, la gravière n'a pas été prise en compte localement en termes de rugosité. Le même coefficient de frottement a été appliqué dans tout le lit majeur sur ce secteur, qualifié en prairies et cultures (soit $K=20$) comme le montre la figure suivante.

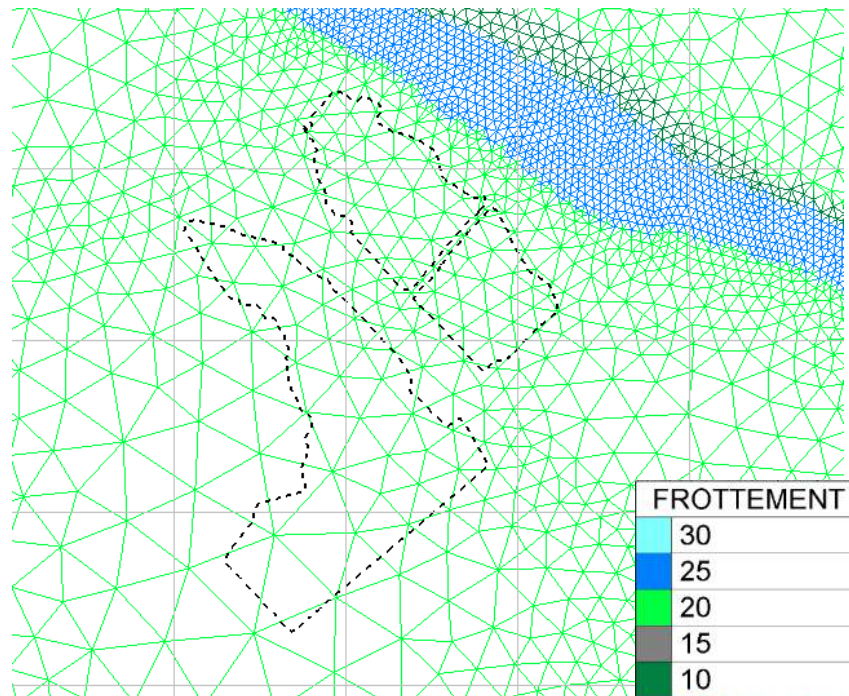


Figure 17: Maillage avec coefficient de frottement au niveau de la gravière dans le modèle ANTEA

3.7.3. Synthèse de l'analyse du modèle d'ANTEA

La DDT 58 souhaite que le modèle réalisé par ANTEA serve de base pour la réflexion sur les impacts de la centrale. Ce modèle apparaît comme une base solide sur laquelle s'appuyer dans le cadre de la présente étude : la zone traitée et les hypothèses de calculs sont pertinentes. **Cependant il possède certaines lacunes qui peuvent fausser une étude comparative de l'état actuel avec l'état futur après implantation de la centrale** : il est indispensable d'effectuer quelques ajustements du modèle, qui tendront à préciser la zone à l'étude et donc à fournir des résultats plus fins.

Dans ce contexte, malgré son exigence initiale d'utiliser le modèle ANTEA comme base, sans aucune modification, les services de l'Etat ont approuvé la démarche proposée qui consiste à modifier légèrement, et localement, le modèle pour y intégrer plus précisément la gravière. La méthode proposée consiste à modifier les points suivants :

- ▲ Densifier le maillage au droit du site à l'étude ;
- ▲ Actualiser la topographie du site ;
- ▲ Préciser les coefficients du frottement au niveau des bassins.

Le modèle ainsi actualisé et ses résultats formeront un scénario de base, de référence, qui pourra être comparé ensuite au scénario avec centrale.

Dans la suite de l'étude, les modifications effectuées sont détaillées et les résultats du modèle actualisé sont comparés à ceux du modèle ANTEA afin de quantifier et qualifier les impacts de ces modifications.

4. ACTUALISATION DU MODELE ANTEA

4.1. MODIFICATIONS

4.1.1. Densité du maillage

Dans les modèles hydrauliques, plus le maillage est dense, plus les temps de calculs sont allongés. C'est pourquoi, pour ne pas alourdir ces temps, le maillage est densifié uniquement sur le site de la gravière. De plus, l'étude portant sur cette zone, il n'est pas pertinent de densifier le maillage ailleurs.

Pour avoir une finesse des résultats sans trop allonger les temps de calculs, et en vue d'ajouter la centrale, une structure composée d'îlots de plusieurs dizaines de mètres, la densité du maillage sur le site à l'étude a été fixée avec des mailles de **10 mètres**. Cela permet de mieux représenter les variations du terrain sur et autour du site. Une illustration du maillage ainsi repris est présentée en Figure 18.

4.1.2. Topographie

Au niveau du site de la gravière, un levé terrestre a été réalisé en 2019. Il fait l'objet d'un plan topographique réalisé par GEOPLANS en date du 16/10/2019. Cette topographie intègre un levé du fond des bassins de la gravière à cette date. C'est cette topographie qui a été interpolée sur le maillage pour préciser la zone. De plus, en vue de l'extension de la gravière d'ici fin 2023 (fin de la tranche d'exploitation actuelle) la topographie a également été modifiée sur les futures zones d'excavation (sud du bassin en exploitation). Une côte de fond similaire au fond actuel de la gravière y a été interpolée (car le fond des bassins a une altitude assez constante), autour de 167 mNGF.

Le maillage interpolé avec la topographie modifiée est présenté dans la figure suivante.

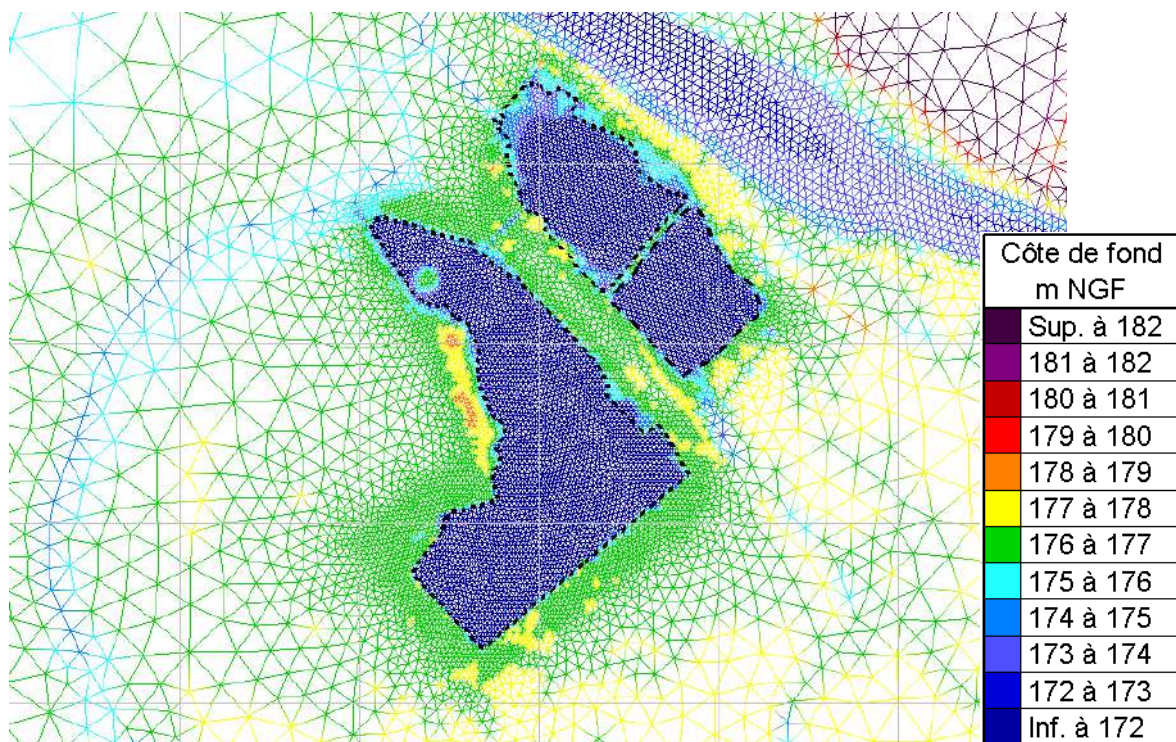


Figure 18: Maillage densifié et topographie ajustée dans le modèle actualisé

4.1.3. Coefficient de frottement

Afin de prendre en compte le fait que le site de la gravière soit des surfaces en eau, les coefficients de frottements ont été localement (à l'intérieur de l'emprise des bassins) fixés à 25 dans le maillage (correspondant au coefficient usuellement utilisé pour le lit mineur d'un cours d'eau « rugueux »).

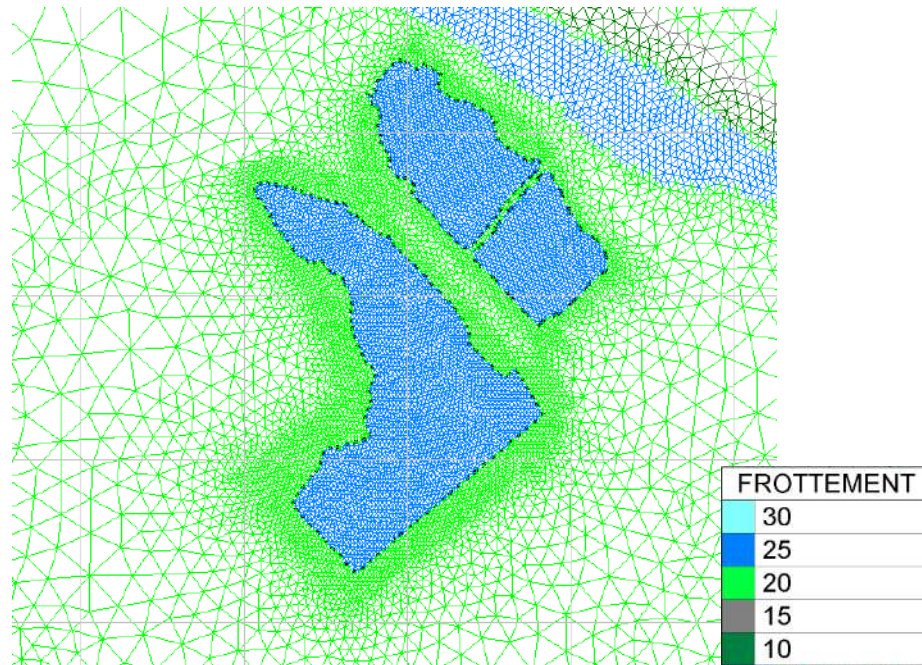


Figure 19: Maillage densifié avec coefficient de frottement dans le modèle actualisé

4.2. SYNTHÈSE DES MODÈLES UTILISÉS

La reprise du modèle ANTEA ne concerne que trois points : la densité du maillage, la topographie et les coefficients de frottements aux points du maillage situés dans la zone de la gravière. Le tableau suivant permet de synthétiser ces éléments ainsi que les hypothèses retenues pour la modélisation. Dans la suite de l'étude, un comparatif du modèle ANTEA et celui du modèle actualisé est faite, afin d'étudier l'impact de ces modifications et d'acter le choix du modèle qui servira ensuite de base pour l'étude de l'influence de la centrale photovoltaïque.

Pour alléger le texte, le terme « M.ANTEA » sera utilisé pour désigner le modèle ANTEA. Le terme « M.ACTUALISE » sera utilisé pour désigner le modèle actualisé.

Tableau 3: Synthèse des caractéristiques principales des modèles

Modèle TELEMAC 2D	Modèle ANTEA	Modèle actualisé
Scénario	Q200 ans avec brèche	
Emprise modèle	56 km de la Loire (jusqu'à Saint-Eloi) et 15km de l'Aron	
Maillage	Mailles de 30m et 70m dans la gravière	Mailles de 10m dans la gravière
Topographie	LIDAR => pas de bassin creusé dans le modèle	LIDAR + topo terrestre avec bathymétrie sur zone gravière
Rugosité	20 dans la zone de la gravière	25 dans la zone de la gravière
Condition aval	Courbe de tarage au droit de St-Eloi	

5. COMPARAISON DES RESULTATS ENTRE LE MODELE ANTEA ET LE MODELE ACTUALISE

5.1. VISUALISATION DES RESULTATS

5.1.1. Documents graphiques

Les résultats de chaque modèle ont fait l'objet de cartographies indépendantes. Les résultats qui importent dans le cadre de cette étude sont les hauteurs d'eau maximales et les vitesses d'écoulements maximales. Ainsi, quatre cartographies ont tout d'abord été réalisées :

- ▲ Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour M.ANTEA
- ▲ Cartographie des vitesses d'écoulements maximales pour M.ANTEA
- ▲ Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour M.ACTUALISE
- ▲ Cartographie des vitesses d'écoulements maximales pour M.ACTUALISE

Ces cartes sont présentées en annexe dans l'atlas cartographique.





5.1.2. Représentation des résultats

Concernant les hauteurs d'eau, les classes de hauteur utilisées dans l'établissement du PPRi ont été reprises avec le code couleur correspondant. Il s'agit de classes de hauteur par tranche de 50 cm :

	Moins de 0,5 m
	De 0,5 m à 1,0 m
	De 1,0 m à 1,5 m
	De 1,5 m à 2,0 m
	De 2,0 m à 2,5 m
	Plus de 2,5 m

Les cartes de hauteurs d'eau ont été réalisées à partir de l'extraction des résultats du maillage : la valeur de la surface libre maximale atteinte en chaque point du maillage a été extrapolée à l'ensemble de la zone d'étude. Ensuite, la côte du TN en tout point y été enlevée afin d'obtenir les hauteurs d'eau maximales sur toute la zone étude.

Concernant les vitesses d'écoulement, les classes de vitesse utilisées dans l'établissement du PPRi ont été reprises avec le code couleur correspondant, à savoir :

	Moins de 0,2 m/s
	De 0,2 m/s à 0,5 m/s
	De 0,5 m/s à 1,0 m/s
	Plus de 1,0 m/s

Les cartes des vitesses d'écoulement ont été réalisées à partir de l'extraction des résultats du maillage : la valeur de la vitesse maximale atteinte en chaque point du maillage a été extrapolée à l'ensemble de la zone d'étude afin d'obtenir une cartographie complète.

5.2. ANALYSE ET COMPARAISON DES RESULTATS

Pour étudier les différences entre le modèle ANTEA et le modèle actualisé, les écarts de hauteurs d'eau et de vitesses d'écoulement ont été étudiés séparément. Cela permet d'étudier plus en détail l'impact des modifications effectuées.

Remarque : Aussi, les hauteurs d'eau maximales observées n'apparaissent pas nécessairement au moment où les vitesses d'écoulements sont les plus fortes (et inversement). C'est pourquoi les deux paramètres doivent être analysés séparément, comme c'est le cas lors de la qualification du risque inondation dans les PPRi : les hauteurs d'eau maximales observées sont cartographiées puis les vitesses maximales d'écoulement. Enfin, une superposition de ces deux paramètres permet de qualifier le risque inondation, mais qui en réalité ne correspond pas forcément à un état réellement observable.

Pour analyser finement les différences entre les deux modèles, un traitement des résultats issus des deux modèles a été réalisé pour aboutir à de nouvelles cartographies :

- ▲ Différences de hauteurs d'eau en valeurs brutes entre les modèles
- ▲ Changements de classes de hauteurs d'eau entre les modèles
- ▲ Différences de vitesses d'écoulement en valeurs brutes entre les modèles
- ▲ Changements de classes de vitesses d'écoulement entre les modèles

Ces cartes sont présentées dans les pages suivantes et reprises en annexe.

Le détail de ces cartes est présenté dans les paragraphes suivants.

5.2.1. Différences en termes de hauteurs d'eau

5.2.1.1. *Documents graphiques*

Pour étudier les différences en termes de hauteur d'eau entre les deux modèles, deux cartographies ont été réalisées :

- ▲ **Une cartographie des différences de hauteurs en valeurs brutes (Figure 20)** : les hauteurs obtenues dans M.ACTUALISE ont été soustraites à celles obtenues dans M.ANTEA. Le signe permet de savoir si M.ACTUALISE induit une hausse de la hauteur (signe positif) ou une baisse de la hauteur (signe négatif). La valeur indiquée quantifie l'écart entre les deux modèles.

Ainsi, si la valeur - 0,1 m est indiquée, cela signifie que le modèle M.ACTUALISE donne une valeur de la hauteur d'eau de 0,1 m inférieure à celle donnée par M.ANTEA.

Cette carte permet donc de savoir en tout point la différence réelle de la hauteur d'eau observée.

- ▲ **Une cartographie des changements de classes de hauteurs d'eau entre les modèles (Figure 21)** : ici en chaque point (et pour chacun des deux modèles), seule la classe de hauteurs, telle que définie dans le PPRi, a été conservée. Ensuite, on a comparé entre M.ACTUALISE et M.ANTEA si la classe de hauteurs changeait.

La carte représente neufs types de changement :

- Une baisse d'une classe : M.ACTUALISE se place dans la classe du dessous par rapport à celle de M.ANTEA ;
- Une baisse de deux classes : M.ACTUALISE se place deux classes en dessous par rapport à celle de M.ANTEA ;
- Une baisse de trois classes : M.ACTUALISE se place trois classes en dessous par rapport à celle de M.ANTEA ;
- Une baisse de quatre classes : M.ACTUALISE se place quatre classes en dessous par rapport à celle de M.ANTEA ;
- Une baisse de cinq classes : M.ACTUALISE se place cinq classes en dessous par rapport à celle de M.ANTEA ;
- Une hausse d'une classe : M.ACTUALISE se place dans la classe du dessus par rapport à celle de M.ANTEA ;
- Une hausse de deux classes : M.ACTUALISE se place deux classes en dessus par rapport à celle de M.ANTEA ;
- Une hausse de trois classes : M.ACTUALISE se place trois classes en dessus par rapport à celle de M.ANTEA ;
- Une hausse de quatre classes : M.ACTUALISE se place quatre classes en dessus par rapport à celle de M.ANTEA.

En dehors des zones colorées, la classe de hauteur est identique entre les deux modèles.

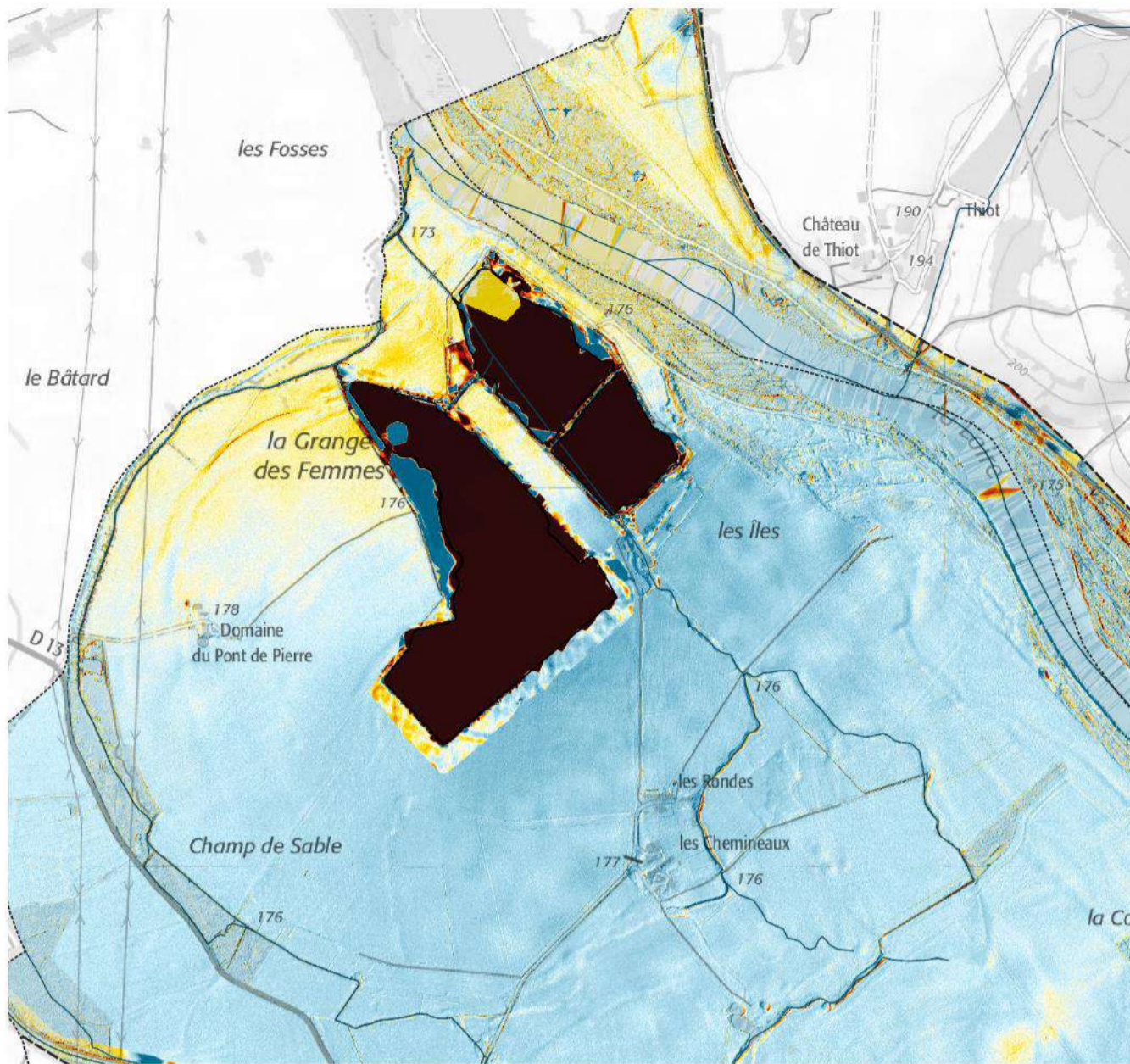
5.2.1.2. *Analyse*

L'analyse de ces cartes permet de faire le constat suivant :

- ▲ Les modifications ont un impact visible pour les hauteurs : sur presque toute la zone d'inondation on observe des changements de hauteurs d'eau (Figure 20). La modification du maillage engendre des modifications minimales dans l'interpolation de la topographie. Il en découle alors que les hauteurs d'eau sont différentes entre les modèles.
- ▲ Ces différences sont à nuancer :
 - En amont de la gravière, on observe presque systématiquement une diminution des hauteurs d'eau, de l'ordre de -1 à -5 cm avec M.ACTUALISE.
 - En aval de la gravière, on observe plutôt une hausse des hauteurs d'eau, de l'ordre de 1 à 5 cm et plus localement allant jusqu'à 10 cm, avec M.ACTUALISE.
 - Très ponctuellement des hausses ou des baisses plus importantes ont lieu mais comme expliqué précédemment, cela est dû à des différences d'interpolation de la topographie, qui est modifiée très localement.
 - Enfin au sein même de la gravière on observe de forts changements, dus à l'actualisation de la topographie et du maillage qui représente plus finement la réalité du terrain. Ainsi les hauteurs observées semblent cohérentes au regard de la géométrie du site (profondeur des bassins, remblais ...).

- ▲ Ces changements de hauteurs, bien que généralisés à l'ensemble de la zone d'inondation n'impliquent que très peu de changements de classes de hauteurs. Comme le montre la Figure 21, les changements de classes sont minimales hors de la gravière :
 - En amont de la gravière, on observe très ponctuellement des baisses d'une classe de hauteurs (en cohérence avec la Figure 20 où on observe sur cette zone des baisses de hauteurs).
 - En aval de la gravière, on observe très ponctuellement des hausses d'une classe de hauteur (en cohérence avec la Figure 20 où on observe sur cette zone des hausses de hauteurs).
- ▲ Les changements notables en termes de classes de hauteurs d'eau ont donc lieu au sein même de la gravière :
 - On observe naturellement une hausse de classes sur la zone exploitée depuis le levé LIDAR et donc creusée avec M.ACTUALISE (en rouge dans la Figure 21).
 - D'autre part, on observe une importante diminution des classes de hauteurs d'eau sur les zones en bordure de bassin actuellement occupées par des remblais, zones où la topographie a également été modifiée (en bleu foncé dans Figure 21).

Dans la gravière, M.ACTUALISE permet d'ajuster les hauteurs d'eau pour correspondre à un état réel. Les implications des modifications opérées dans le modèle sont assez minimales en termes de hauteurs hors du site.



**ETUDE CENTRALE
PHOTOVOLTAIQUE
CHEVENON**

**DIFFERENCES HAUTEURS
VALEURS BRUTES GRAVIERE
- MODELE ACTUALISE et
MODELE ANTEA**
Q200 ans avec brèche

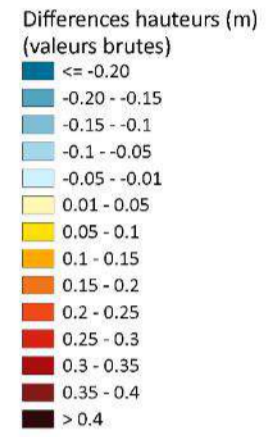
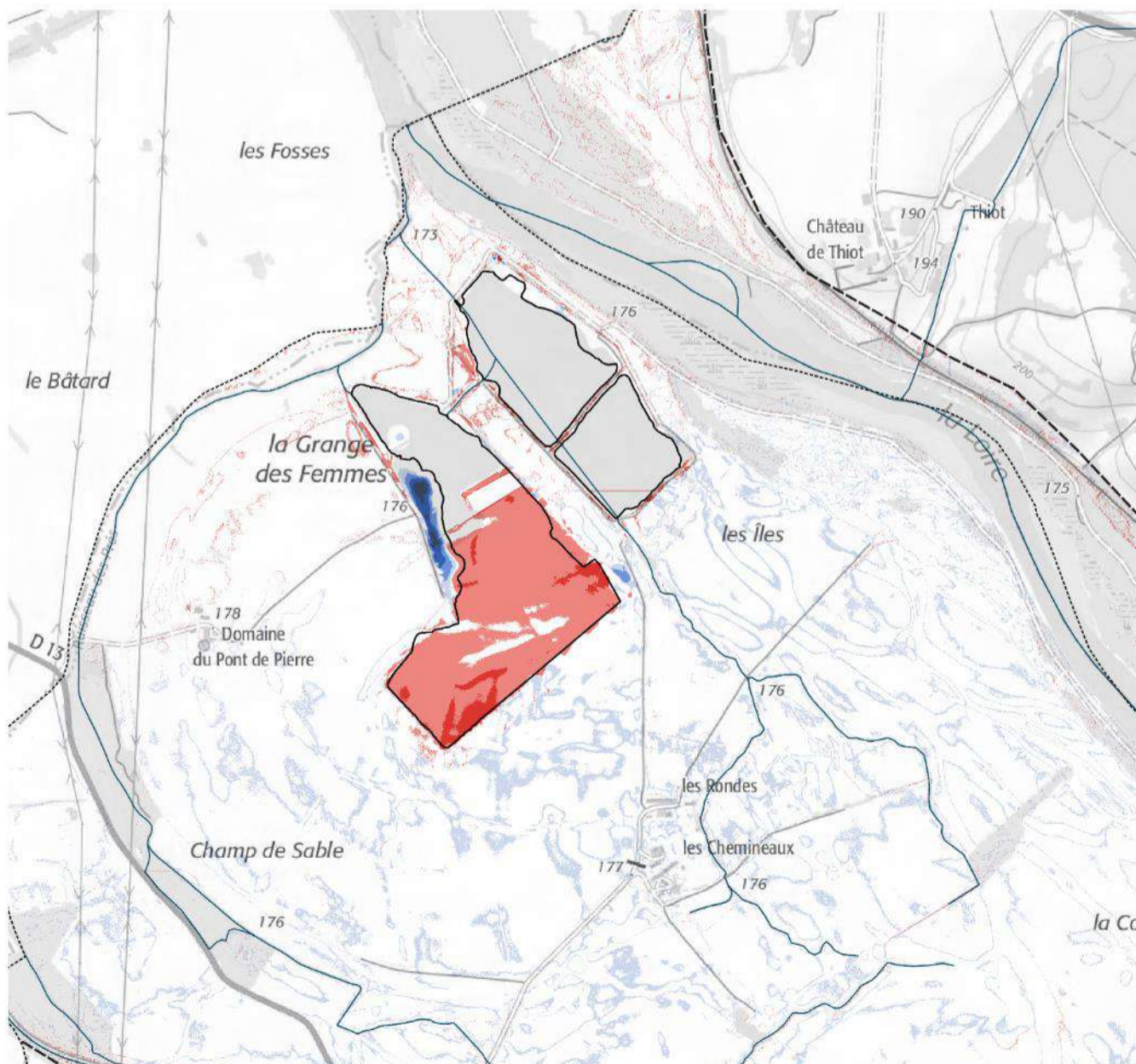


Figure 20: Différences de hauteurs d'eau observées entre M.ACTUALISE et M.ANTEA



**ETUDE CENTRALE
PHOTOVOLTAIQUE
CHEVENON**

**CHANGEMENTS DE CLASSES
DE HAUTEURS GRAVIERE -
MODELE ACTUALISE et
MODELE ANTEA**
Q200 ans avec brèche



Figure 21: Changements de classes de hauteurs observés entre M.ACTUALISE et M.ANTEA

5.2.2. Différences en termes de vitesses d'écoulement

5.2.2.1. *Documents graphiques*

Pour étudier les différences en termes de vitesses d'écoulement entre les deux modèles, deux cartographies ont été réalisées :

- ▲ **Une cartographie des différences de vitesses en valeurs brutes (Figure 22)** : les vitesses obtenues dans M.ACTUALISE ont été soustraites à celle obtenues dans M.ANTEA. Le signe permet de savoir si M.ACTUALISE induit une hausse de la vitesse (signe positif) ou une baisse de la vitesse (signe négatif). La valeur indiquée quantifie l'écart entre les deux modèles.

Ainsi, si la valeur - 0,1 m/s est indiquée, cela signifie que M.ACTUALISE donne une valeur de la vitesse d'écoulement de 0,1 m/s inférieure à celle donnée par M.ANTEA.

Cette carte permet donc de savoir en tout point la différence réelle de la vitesse d'écoulement observée.

- ▲ **Une cartographie des changements de classe de vitesse d'écoulement entre les modèles (Figure 23)** : ici en chaque point (et pour chacun des deux modèles), seule la classe de vitesses, telle que définie dans le PPRi, a été conservée. Ensuite, on a comparé entre M.ACTUALISE et M.ANTEA si la classe de vitesses changeait.

La carte ne représente que quatre types de changement :

- Une baisse d'une classe : M.ACTUALISE se place dans la classe du dessous par rapport à celle de M.ANTEA ;
- Une baisse de deux classes : M.ACTUALISE se place deux classes en dessous par rapport à celle de M.ANTEA ;
- Une hausse d'une classe : M.ACTUALISE se place dans la classe du dessus par rapport à celle de M.ANTEA ;
- Une hausse de deux classes : M.ACTUALISE se place deux classes en dessus par rapport à celle de M.ANTEA.

Aucun autre type de changement n'a été observé : en dehors des zones colorées, la classe de vitesses est identique entre les deux modèles.

5.2.2.2. *Analyse*

L'analyse de ces cartes permet de faire le constat suivant :

- ▲ Les modifications ont également un impact visible pour les vitesses et, comme pour les hauteurs, sur presque la totalité du champ d'inondation (Figure 22). Pour les mêmes raisons (la modification du maillage engendre des modifications minimales dans l'interpolation de la topographie) il en découle alors que les vitesses d'écoulement sont différentes entre les modèles.

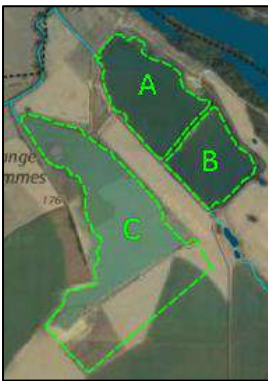
▲ Ces différentes sont à nuancer :

- A distance de la gravière, c'est-à-dire : en amont du hameau « Les Rondes », au niveau de la Loire et à l'Est du Ruisseau des Prés, les changements de vitesses sont minimes. Ils sont compris entre -0.05 m/s et 0.05 m/s.
- En se rapprochant de la gravière, on observe des différences plus marquées. En amont immédiat des bassins, les vitesses sont augmentées jusqu'à 0.2 m/s (en jaune foncé). A l'Est de la gravière on observe plutôt des diminutions des vitesses, allant jusqu'à -0.3 m/s (en bleu claire à azur). Enfin, à l'aval des bassins, on observe une augmentation des vitesses allant de 0.1 m/s à 0.5 m/s localement (en jaune, orange et rouge). Ce changement s'explique par la topographie mieux prise en compte dans M.ACTUALISE qui permet donc de représenter les fortes vitesses à la sortie des bassins.

▲ C'est au sein de la gravière où les différences sont les plus importantes :

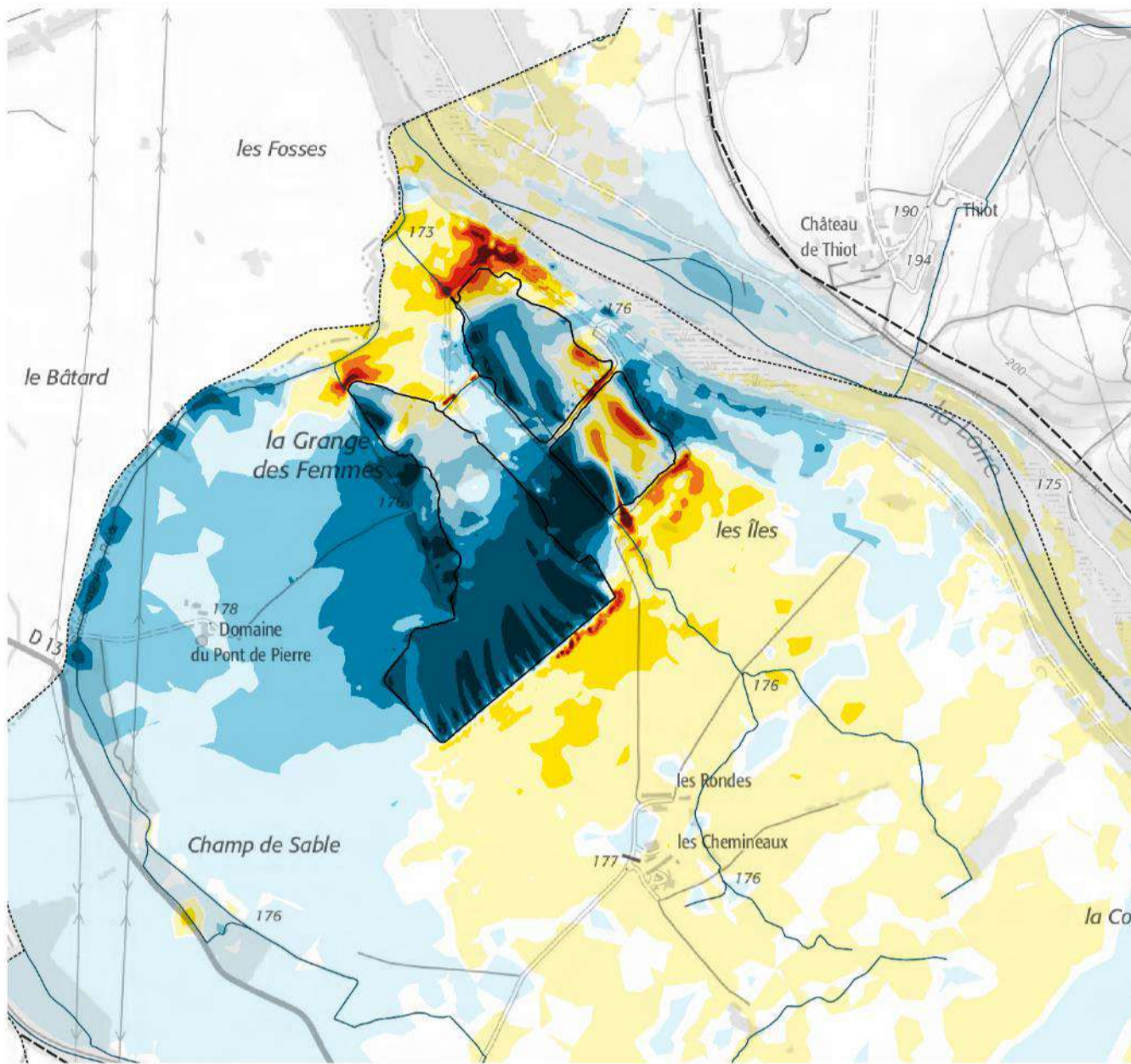
- Les vitesses sont fortement ralenties dans le bassin C qui a été creusé et où le coefficient de frottement a été ajusté. On observe bien les trainées bleu foncé qui représentent un ralentissement des vitesses à l'entrée dans la gravière.
- Dans le bassin B, en revanche on observe une accélération des vitesses dans M.ACTUALISE. Ici encore la topographie intégrée dans M.ANTEA était très élevée, ce qui avait pour incidence de diriger les écoulements sur les côtés. En rétablissant la bonne topographie, on a donc un abaissement des vitesses sur les bords (en bleu foncé) et une augmentation au centre (en jaune, orange et rouge). Le champ des vitesses est plus homogène dans le bassin.
- Enfin, on observe une forte augmentation des vitesses à l'entrée du bassin B, dans l'angle Sud (en rouge). Il s'agit du point bas, en assec, présenté en page 11 et en Figure 8. C'est un axe d'écoulement préférentiel qui a donc tendance à concentrer les écoulements et donc est le lieu de vitesses plus élevées qu'en dehors. Cet élément est ainsi mieux représenté avec M.ACTUALISE.

Pour rappel



- ▲ En termes de changements de classes de vitesses, la carte en Figure 23 montre bien que ces changements sont pratiquement tous situés dans la gravière ou à proximité immédiate. Quelques zones localisées sont concernées par une hausse d'une classe de vitesses (en rouge). Sur le site de la gravière, les changements de classes opérés permettent une meilleure appréciation des vitesses.

Les implications des modifications opérées dans le modèle sont donc minimes en termes de vitesses hors de la gravière.



**ETUDE CENTRALE
PHOTOVOLTAIQUE
CHEVENON**

**DIFFERENCES DE VITESSES
VALEURS BRUTES GRAVIERE
- MODELE ACTUALISE et
MODELE ANTEA**
Q200 ans avec brèche

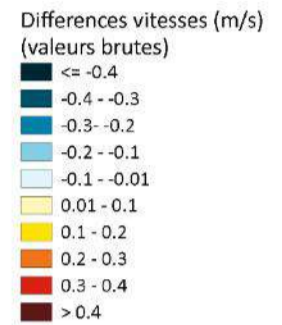
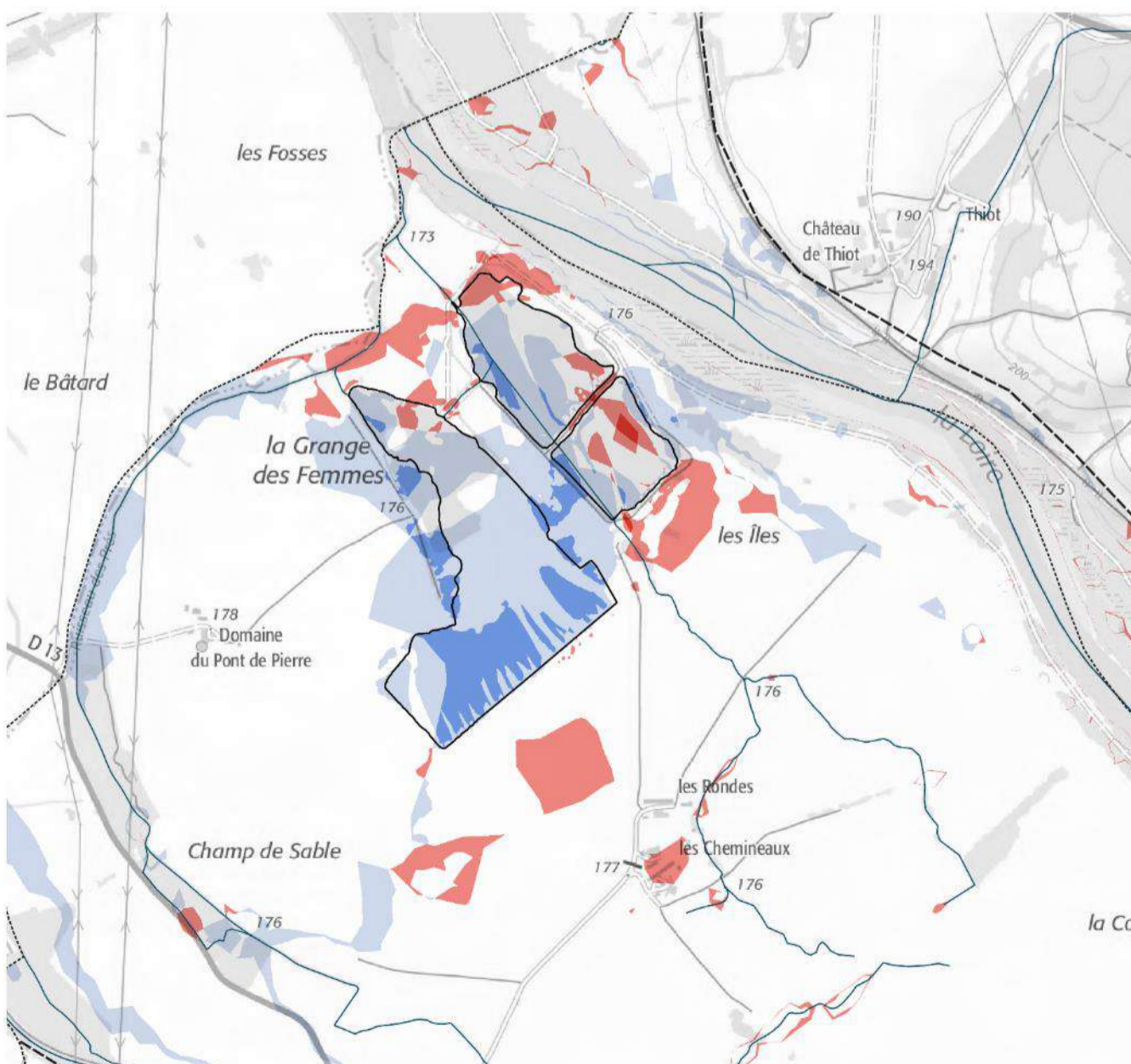


Figure 22: Différences de vitesses d'écoulement observées entre M.ACTUALISE et M.ANTEA



**ETUDE CENTRALE
PHOTOVOLTAIQUE
CHEVENON**

**CHANGEMENTS CLASSES DE
VITESSES GRAVIERE -
MODELE ACTUALISE et
MODELE ANTEA**
Q200 ans avec brèche

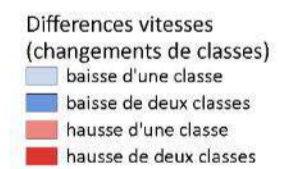


Figure 23: Changements de classes de vitesses observés entre M.ACTUALISE et M.ANTEA

5.3. SYNTHÈSE DE L'ACTUALISATION DU MODÈLE ANTEA

L'analyse a montré, tant sur les hauteurs d'eau que sur les vitesses d'écoulements que l'actualisation du modèle réalisé par ANTEA n'engendrait pas de changements majeurs. Les seuls changements notables ont lieu au sein même de la gravière, ce qui semble logique puisque c'est précisément à cet endroit que les modifications du modèle ont été faites, tendant à préciser la situation actuelle. En dehors de la gravière, les changements sont mineurs. De plus, une grande partie, ces changements sont une diminution de la hauteur d'eau et/ou de la vitesse d'écoulement, ce qui n'implique donc pas une aggravation de la qualification du risque (mais au contraire une diminution).

Les principaux éléments de la comparaison des résultats entre le modèle ANTEA et le modèle actualisé sont donc :

- ▲ Des diminutions locales des vitesses d'écoulements et des hauteurs d'eau ;
- ▲ Pas de changement de classe de hauteurs d'eau en dehors de la gravière ;
- ▲ De faibles changements de classe de vitesses d'écoulement localisés à proximité de la gravière ;
- ▲ De forts changements au sein même de la gravière mais qui permettent une connaissance plus fine des hauteurs et des vitesses.

Fort de ce constat, il paraît opportun de retenir le modèle actualisé comme modèle référence pour la suite de l'étude. Les résultats issus de la modélisation avec implantation de la centrale pourront donc être comparés avec ceux issus du modèle actualisé pour effectuer une analyse pertinente.

6. MODELISATION AVEC CENTRALE PHOTOVOLTAIQUE

6.1. PLAN DU PROJET DE CENTRALE

Dans le cadre de son projet et en concertation avec les différents acteurs impliqués, la société Eléments a réalisé un plan de projet de la centrale photovoltaïque sur le site de la gravière. Il s'agit du plan qui va servir de référence pour l'étude hydraulique et la construction du modèle avec centrale.

Le plan est présenté en Figure 25 en page suivante.

Le projet de centrale est composé des éléments principaux suivants :

- ▲ 5 îlots de flotteurs : 1 îlot sur le bassin A, 1 îlot sur le bassin B et 3 îlots répartis sur le bassin C, avec leurs lignes d'ancrages.
- ▲ Quelques zones aménagées : voiries, clôtures, transformateur, zones de chantier provisoires.
- ▲ Protections « anti-embâcles », développées au paragraphe 7 en page 45.

6.2. INTEGRATION AU MODELE

Le logiciel utilisé pour les modélisations est TELEMAC 2D. Il permet de simuler des écoulements dans un maillage en deux dimensions. Les possibilités pour intégrer une structure flottante telle qu'imaginée par Eléments sont limitées, puisque les écoulements seront plutôt en trois dimensions.

Etant donné la petite taille de certains éléments du projet ne permettant pas d'être pris en compte dans le modèle qui possède des mailles de 10 mètres, seuls les îlots vont être intégrés dans la modélisation. Il s'agit de plus des seuls éléments pouvant engendrer de fortes perturbations des écoulements.

L'intégration de la structure au modèle se traduit donc par une modification du coefficient de frottement au droit des îlots. Par soucis de sécurité, on impose un coefficient de frottement extrême pour simuler une forte rugosité induite par la présence des îlots. On choisit un coefficient de Strickler égale à 1 (Figure 24).

Cette valeur se veut pessimiste, mais elle a l'avantage d'étudier localement les vitesses maximales qui pourraient avoir lieu sur les côtés de la structure et donc auxquelles elle devra résister.

Dans la réalité, le coefficient de frottement est certes réduit aux abords de la structure, en surface, mais en profondeur les écoulements seront moins perturbés et donc la répartition de vitesse devrait être plus homogène à l'échelle du site.

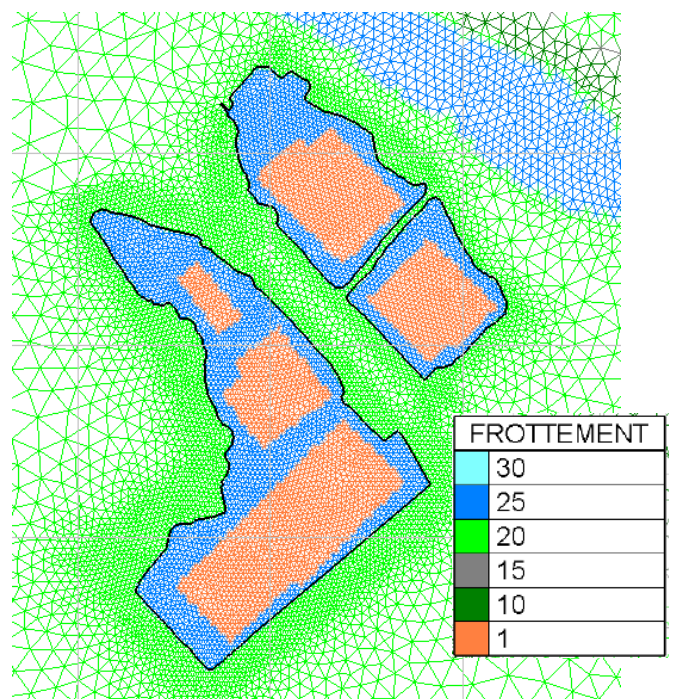


Figure 24: Coefficients de frottement dans le modèle avec centrale

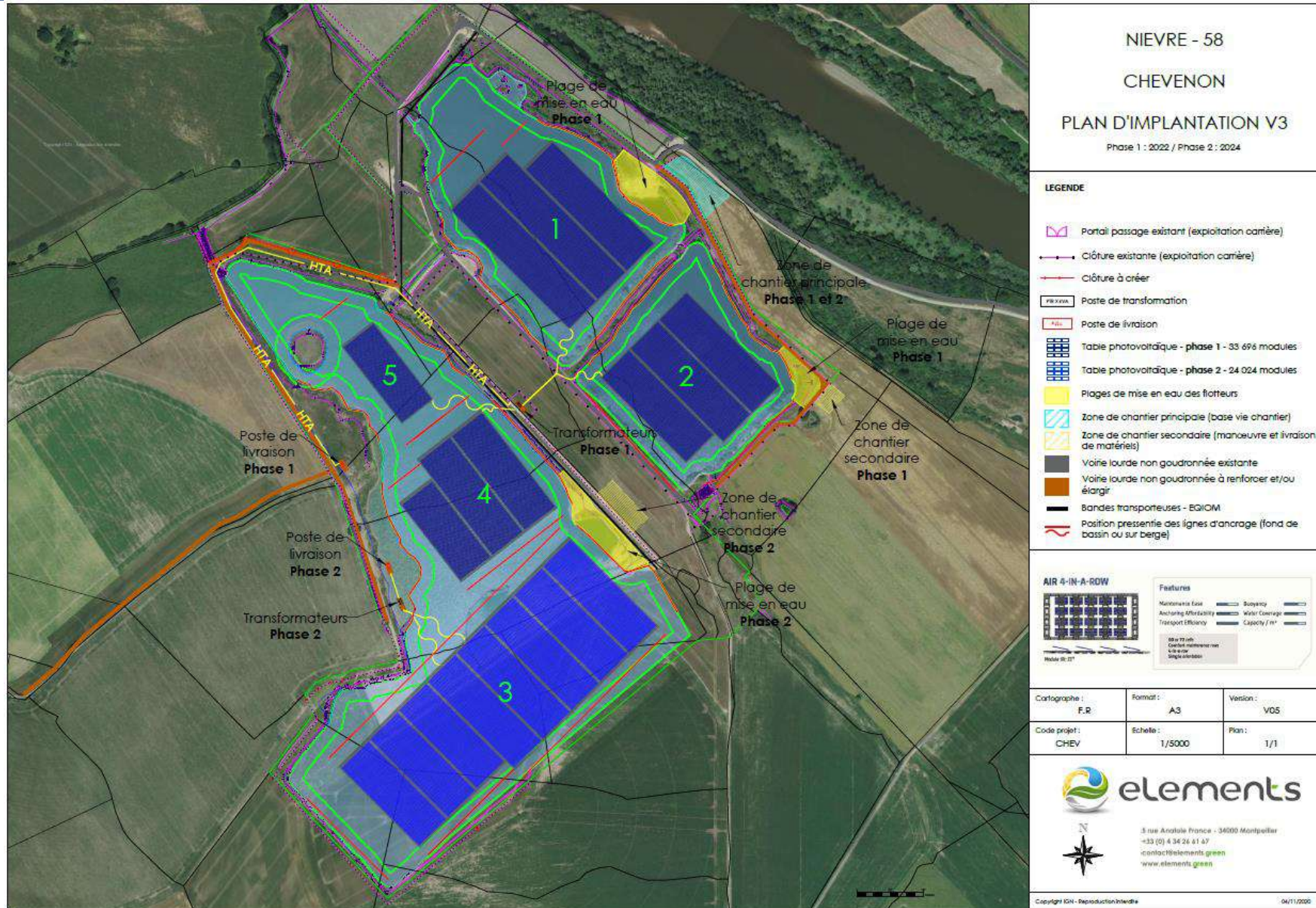


Figure 25: Plan de projet d'implantation de la centrale établi par Eléments, au 4 novembre 2020

6.3. RESULTATS

Pour permettre une comparaison aisée avec les résultats obtenus dans le cadre du modèle actualisé auxquels seront comparés les résultats du modèle avec centrale, les résultats sont présentés sous le même format :

- ▲ Une cartographie des hauteurs d'eau avec les mêmes classes et codes couleurs que dans le cadre du PPRi et présentées en page 23 ;
- ▲ Une cartographie des vitesses d'écoulements avec les mêmes classes et codes couleurs que dans le cadre du PPRi et présentées en page 23.

Ces cartes sont présentées en annexe.

Dans la suite du rapport le terme M.CENTRALE désigne le modèle avec centrale.

6.4. IMPACT DE LA CENTRALE SUR LE RISQUE INONDATION

6.4.1. Analyse et comparaison des résultats modèles sans et avec centrale

Pour étudier les impacts de la centrale sur le risque inondation comme proposé dans la méthodologie décrite en page 13, les résultats du modèle avec centrale sont comparés avec ceux du modèle sans centrale. Le modèle sans centrale correspond au modèle actualisé, qui sert de référence pour caractériser l'état actuel, comme vu précédemment.

Pour étudier les différences entre ces modèles, les écarts de hauteurs d'eau et de vitesses d'écoulement ont été étudiés séparément. Cela permet d'étudier plus en détail l'impact des modifications effectuées.

Pour analyser finement les différences entre les deux modèles, un traitement des résultats issus des deux modèles a été réalisé pour aboutir à de nouvelles cartographies :

- ▲ Différences de hauteurs d'eau en valeurs brutes entre les modèles
- ▲ Changements de classes de hauteurs d'eau entre les modèles
- ▲ Différences de vitesses d'écoulement en valeurs brutes entre les modèles
- ▲ Changements de classes de vitesses d'écoulement entre les modèles

Ces cartes sont disponibles dans les pages suivantes et reprises en annexe.

Le détail de l'analyse de ces cartes est présenté dans les paragraphes suivants.

6.4.1.1. *Différences en termes de hauteurs d'eau*

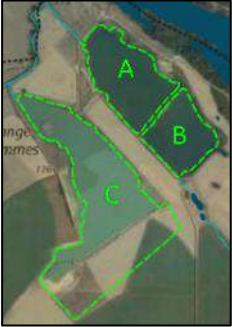
a. Documents graphiques

La méthodologie pour l'élaboration de ces cartes et les légendes associées sont identiques à celles développées dans la comparaison entre le modèle ANTEA et le modèle actualisé. Pour revenir sur ces points, se référer au paragraphe 5.2.1.1 Documents graphiques en page 24.

b. Analyse

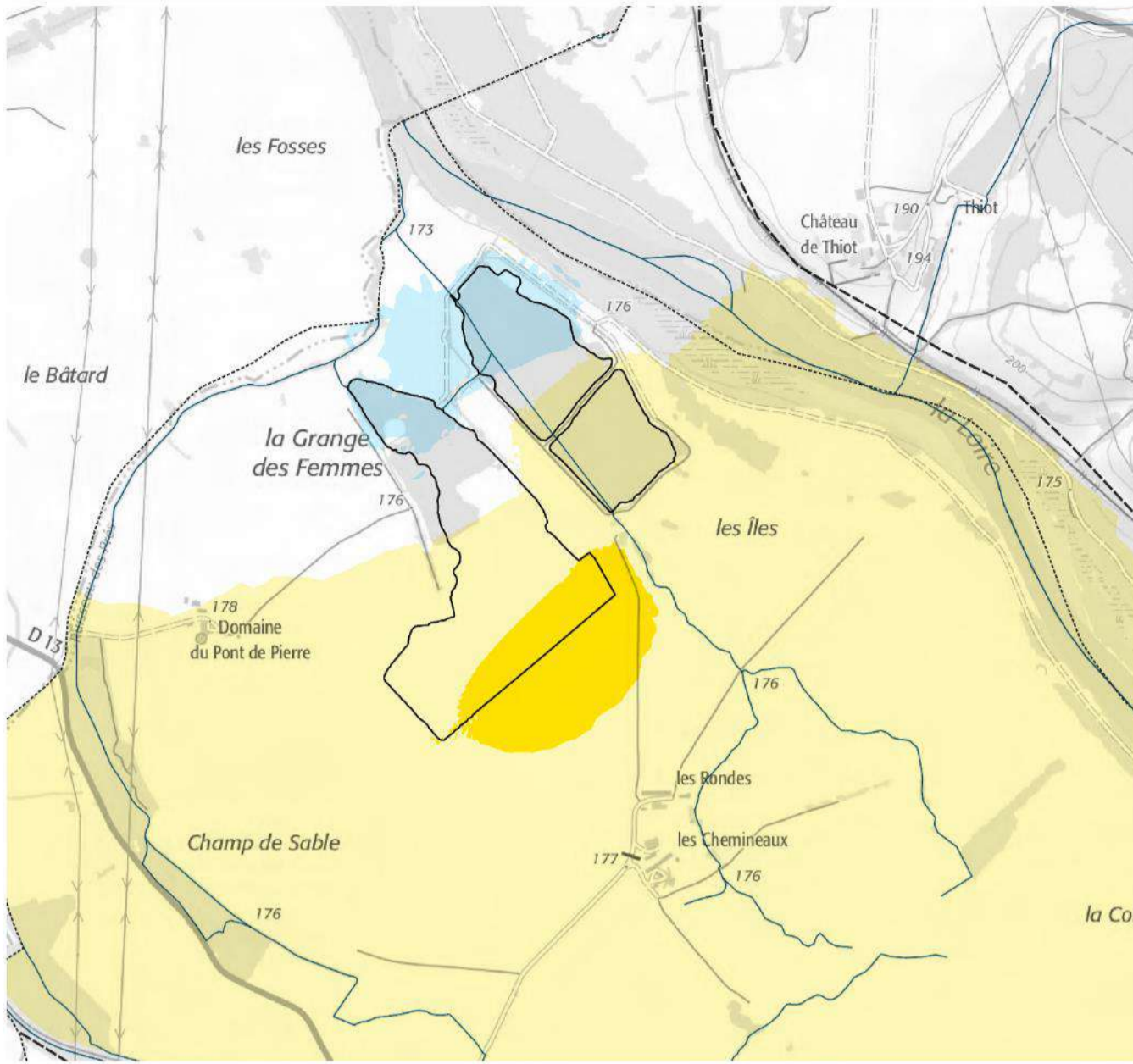
L'analyse de ces cartes permet de faire le constat suivant :

Pour rappel



- ▲ La présence de la centrale a un impact visible pour les hauteurs, jusqu'au droit de Imphy. Cependant, entre cette limite amont et jusqu'au niveau de la moitié des bassins de la gravière, il s'agit d'une hausse des hauteurs d'eau de 1 à 5 cm au maximum (en jaune pâle sur la Figure 26).
- ▲ Localement, en amont du bassin C, on observe toute une zone (en jaune foncé sur la Figure 26) où la différence de hauteurs est plus importante : une hausse d'au maximum 10 cm. Cette hausse est due à un ralentissement de l'écoulement à cet endroit, comme le montre les cartes d'analyse des vitesses dans le paragraphe suivant.
- ▲ Enfin, on observe une légère baisse des hauteurs d'eau, de -1 à -5 cm (en bleu claire sur la Figure 26) qui est localisée sur l'aval des bassins.
- ▲ En dehors de ces zones, il n'y a pas d'impact de la centrale sur les hauteurs d'eau.
- ▲ En termes de classes de hauteurs d'eau, la carte présentée en Figure 27 montre clairement que les différences détaillées ci-dessus sont minimales et n'engendrent que très localement une hausse d'une classe de hauteurs pour l'amont de la gravière ou une baisse à l'aval. Pour mieux se rendre compte de l'impact négligeable de la centrale à distance, la même cartographie que la Figure 27 est disponible en Figure 30 mais avec une échelle plus grande, qui permet de voir tout le lit majeur jusqu'à Imphy.

Les impacts en termes de hauteurs sont donc très minimales.



**ETUDE CENTRALE
PHOTOVOLTAÏQUE
CHEVENON**

**DIFFERENCES HAUTEURS
VALEURS BRUTES GRAVIERE
- MODELE CENTRALE et
MODELE ACTUALISE**

Q200 ans avec brèche

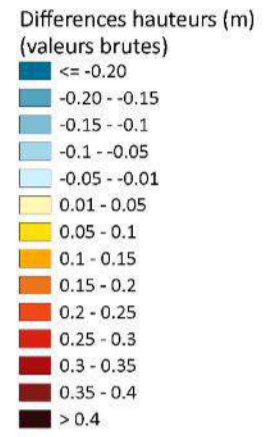
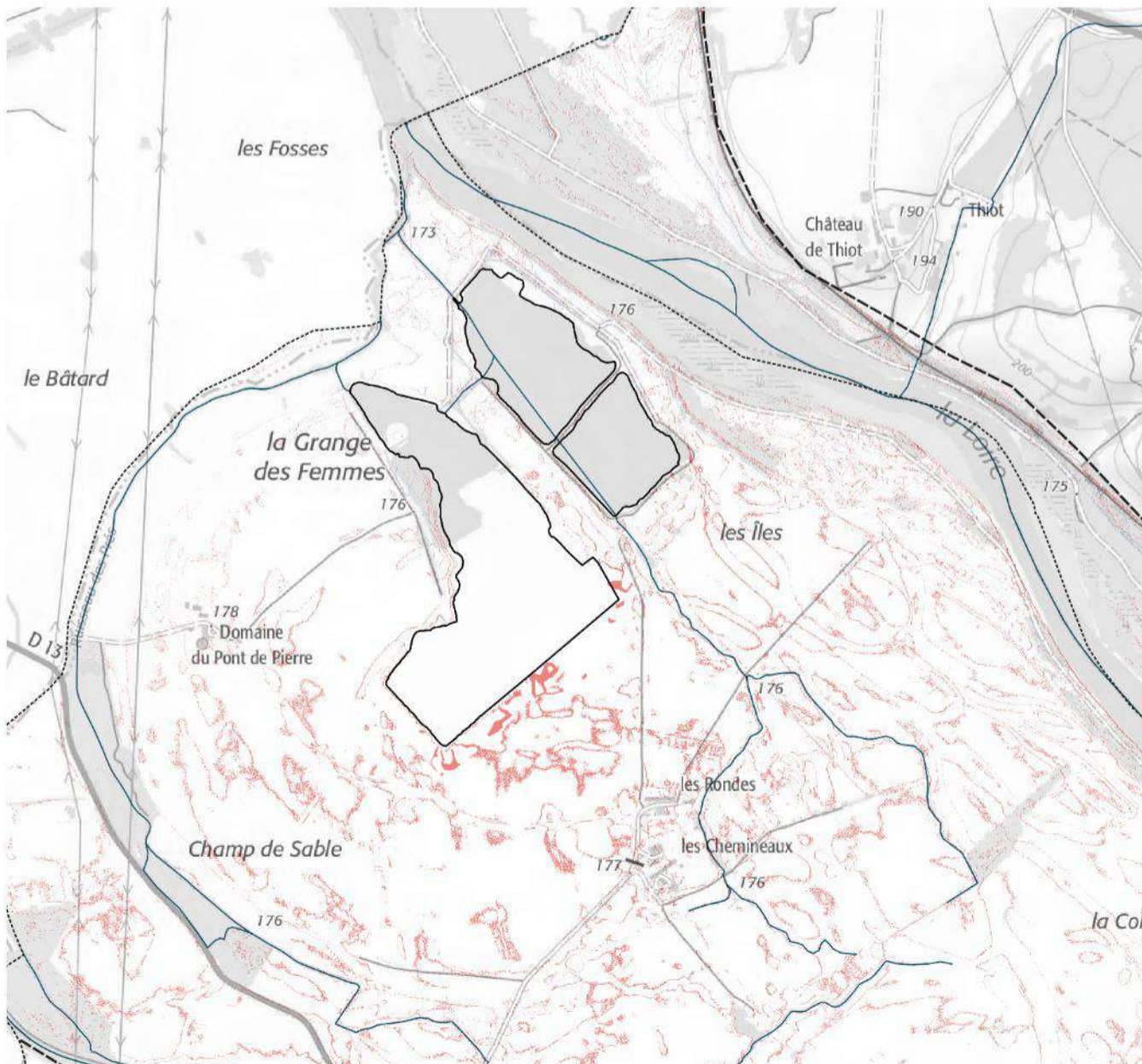


Figure 26: Différences de hauteurs d'eau observées entre M.CENTRALE et M.ACTUALISE



**ETUDE CENTRALE
PHOTOVOLTAÏQUE
CHEVENON**

**CHANGEMENTS DE CLASSES
DE HAUTEURS GRAVIERE -
MODELE CENTRALE et
MODELE ACTUALISE**

Q200 ans avec brèche



Figure 27: Changements de classes de hauteurs observés entre M.CENTRALE et M.ACTUALISE

6.4.1.2. Différences en termes de vitesses d'écoulement

a. Documents graphiques

La méthodologie pour l'élaboration de ces cartes et les légendes associées sont identiques à celles développées dans la comparaison entre le modèle ANTEA et le modèle actualisé. Pour revenir sur ces points, se référer au paragraphe 5.2.2.1 Documents graphiques en page 28.

b. Analyse

L'analyse de ces cartes permet de faire le constat suivant :

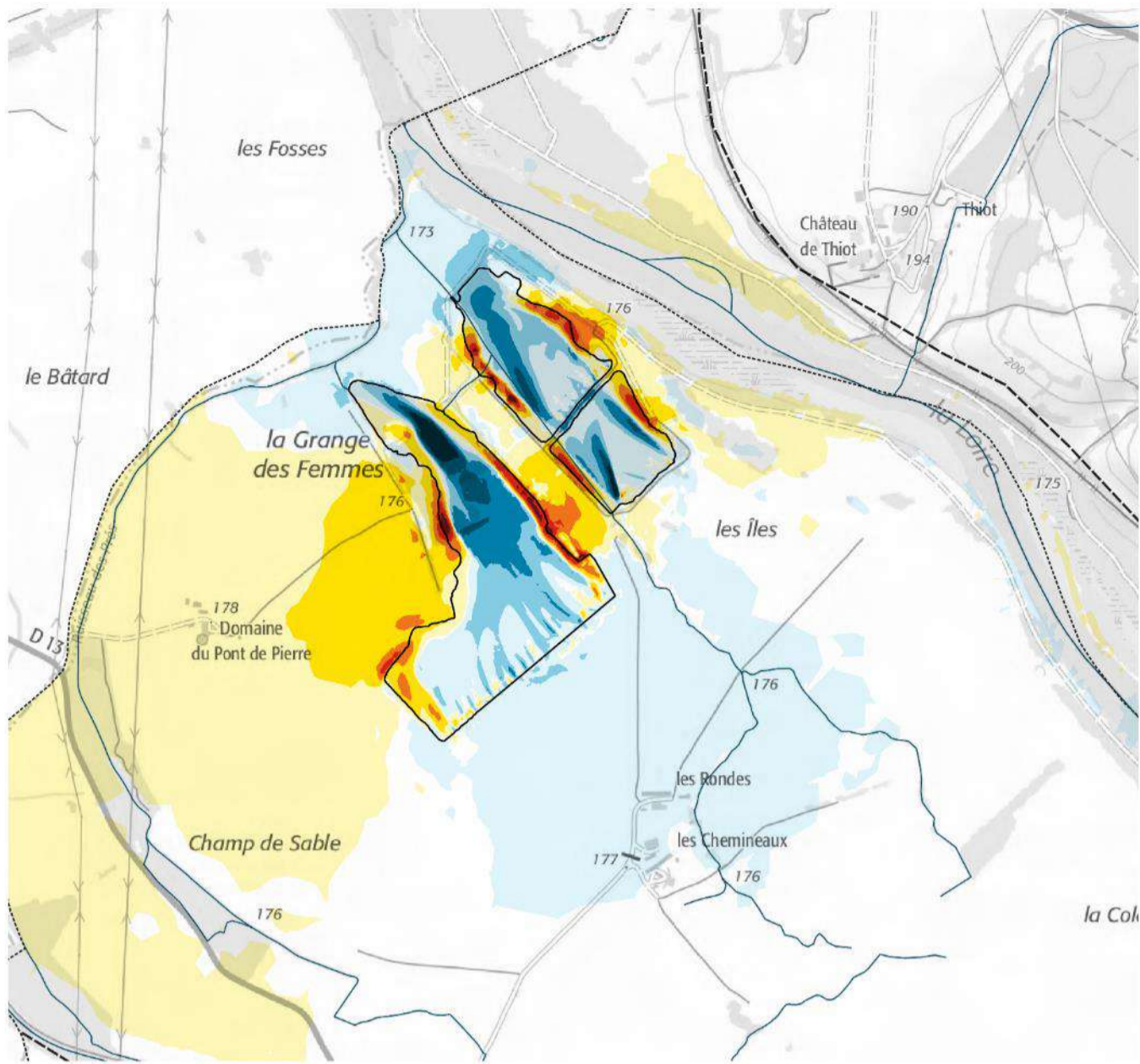
- ▲ La présence de la centrale a un impact visible pour les vitesses jusqu'en amont du hameau « Les Rondes » (Figure 28). Entre cette limite amont et la gravière ainsi qu'au niveau de la Loire et à l'Est du Ruisseau des Prés, les changements de vitesses sont minimales : ils sont compris entre -0.05 m/s et 0.05 m/s.
- ▲ C'est seulement à proximité immédiate et au sein de la gravière que les changements sont plus notables :

Pour rappel



- Aux milieux des bassins, à l'emplacement des îlots, on note un fort ralentissement des vitesses allant jusqu'à -0.5 m/s (en bleu clair puis foncé). Cette observation est logique au regard du coefficient de rugosité qui a été changé dans les îlots : les écoulements sont alors « freinés » au niveau des îlots.
 - En revanche, on note une accélération des écoulements entre les berges et les îlots : les vitesses augmentent de 0.1 à 0.5 m/s (bandes jaunes à oranges puis rouges dans les bassins). Ce phénomène est lié aux écoulements qui, freinés au niveau des îlots, vont alors se concentrer plus facilement sur les bords des îlots en créant ainsi un courant plus fort.
 - Enfin, à l'Est du bassin C, on observe une hausse des vitesses d'écoulement de 0.05 à 0.2 m/s (en jaune en direction de l'Est et du Ruisseau des Prés).
- ▲ En termes de classes de vitesses, la carte présentée en Figure 29 montre clairement que les différences détaillées ci-dessus n'engendrent des modifications notables de classes de vitesses qu'au sein même de la gravière. Essentiellement, on note une baisse d'une classe au niveau des îlots (en bleu) et une hausse d'une classe autour des îlots (en rouge). Pour mieux se rendre compte de l'impact négligeable de la centrale à distance, la même cartographie que la Figure 29 est disponible en Figure 31 mais avec une échelle plus grande, qui permet de voir tout le lit majeur jusqu'à Imphy.

Les impacts en termes de vitesses sont donc très modérés.



**ETUDE CENTRALE
 PHOTOVOLTAÏQUE
 CHEVENON**

**DIFFERENCES DE VITESSES
 VALEURS BRUTES GRAVIERE
 - MODELE CENTRALE et
 MODELE ACTUALISE**

Q200 ans avec brèche

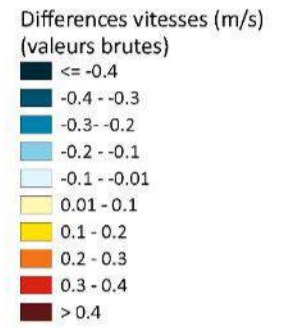
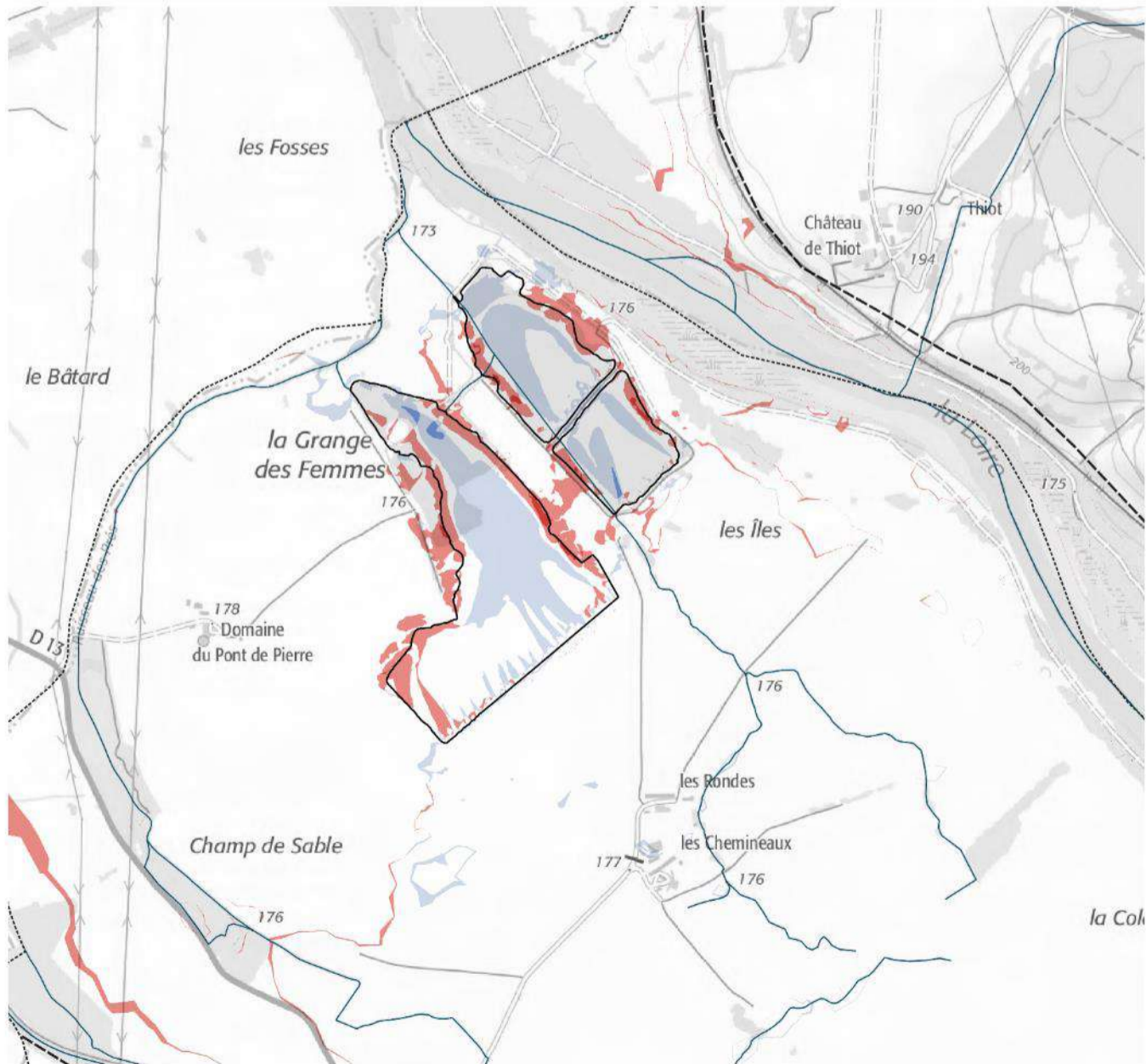


Figure 28: Différences de vitesses d'écoulement observées entre M.CENTRALE et M.ACTUALISE



**ETUDE CENTRALE
 PHOTOVOLTAÏQUE
 CHEVENON**

**CHANGEMENTS CLASSES DE
 VITESSES GRAVIERE -
 MODELE CENTRALE et
 MODELE ACTUALISE**

Q200 ans avec brèche

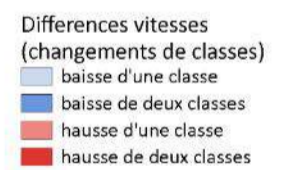
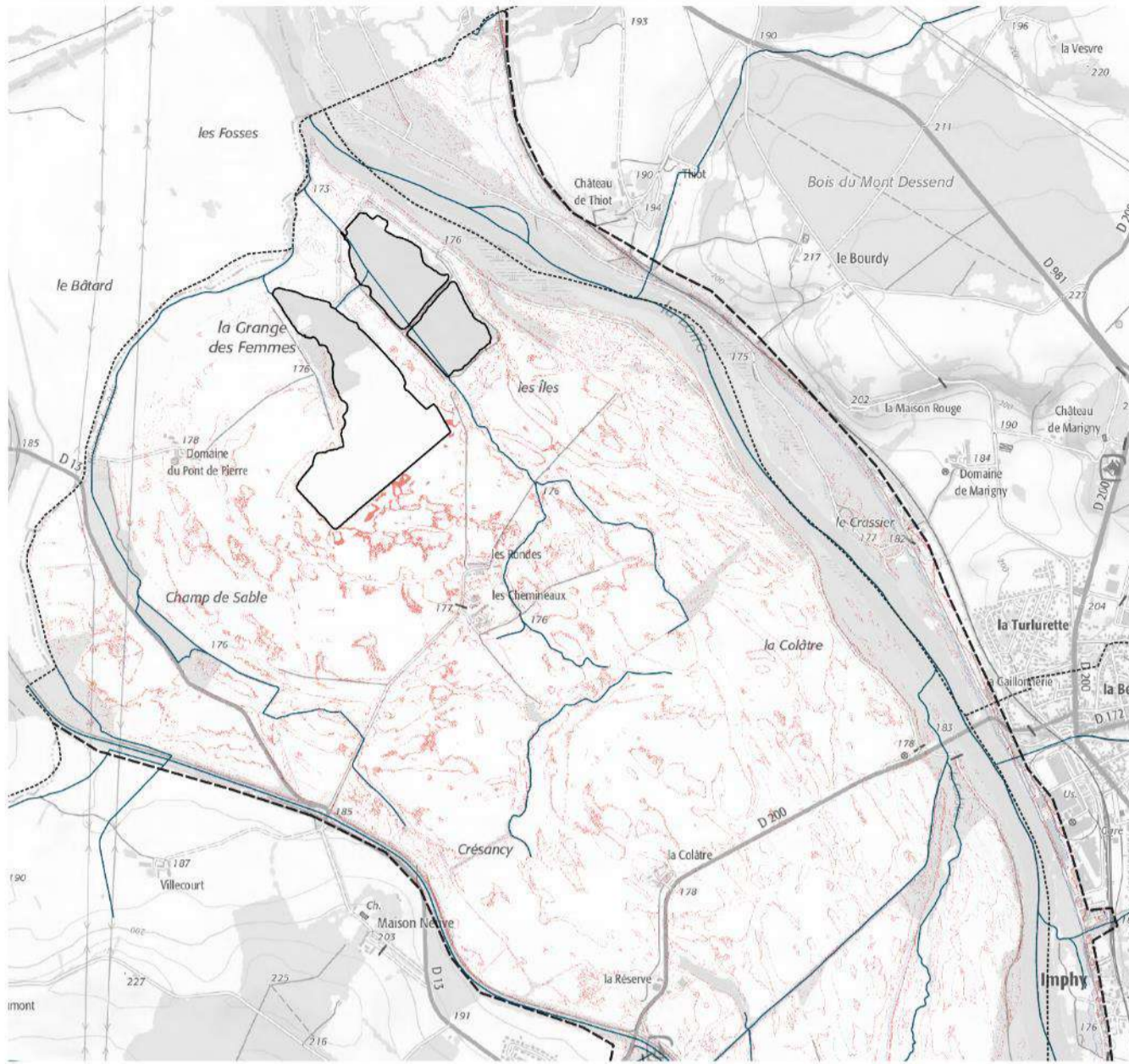


Figure 29: Changements de classes de vitesses observés entre M.CENTRALE et M.ACTUALISE



**ETUDE CENTRALE
PHOTOVOLTAIQUE
CHEVENON**

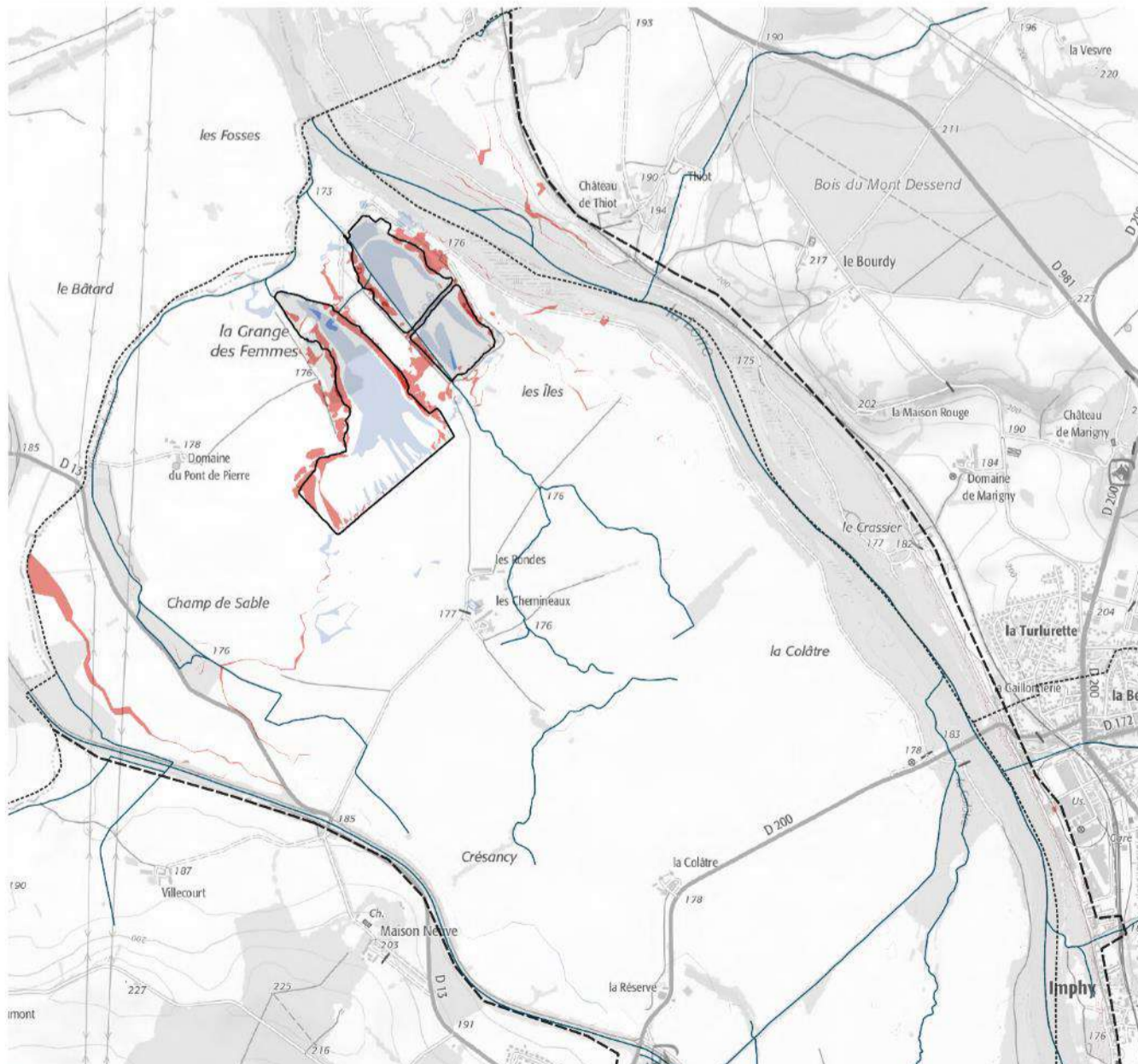
**CHANGEMENTS DE CLASSES
DE HAUTEURS AVAL -
MODELE CENTRALE et
MODELE ACTUALISE**

Q200 ans avec brèche

- Différences hauteurs
(changements de classes)
- baisse d'une classe
 - baisse de deux classes
 - baisse de trois classes
 - baisse de quatre classes
 - baisse de cinq classes
 - hausse d'une classe
 - hausse de deux classes
 - hausse de trois classes
 - hausse de quatre classes



Figure 30: De-zoom de la Figure 27 - Changements de classes de hauteurs d'eau observés entre M.CENTRALE et M.ACTUALISE



**ETUDE CENTRALE
PHOTOVOLTAIQUE
CHEVENON**

**CHANGEMENTS CLASSES DE
VITESSES AVAL - MODELE
CENTRALE et MODELE
ACTUALISE**

Q200 ans avec brèche

- Différences vitesses
(changements de classes)
- baisse d'une classe
 - baisse de deux classes
 - hausse d'une classe
 - hausse de deux classes



Figure 31: De-zoom de la Figure 29 - Changements de classes de vitesses d'écoulement observés entre M.CENTRALE et M.ACTUALISE

6.4.2. Test de sensibilité avec un coefficient de frottement plus modéré

Afin d'étudier l'impact de la valeur du coefficient de frottement (qui a été fixé à 1 dans les îlots dans M.CENTRALE), un second modèle a été réalisé avec un coefficient de frottement de 10 dans les îlots. Cela permet d'étudier, dans un cas qui se veut plus réaliste, les différences de hauteurs d'eau et de vitesses d'écoulement. Ce modèle a été nommé M.CENTRALE-2.

Concernant les hauteurs d'eau, la présence de la centrale ainsi représentée est négligeable : les différences de hauteurs entre M.ACTUALISE et M.CENTRALE-2 sont de l'ordre du millimètre et donc négligeables aux regards de la précision des modèles hydrauliques. Concernant les vitesses d'écoulement, les vitesses obtenues dans M.CENTRALE et M.CENTRALE-2 sont très similaires.

Ce constat permet de faire la conclusion suivante : le choix du coefficient de frottement pour représenter la centrale semble pertinent dans la mesure où les vitesses d'écoulements sont bien modifiées et leur répartition est perturbée par la présence des îlots. En revanche, alors que choisir un coefficient de frottement égal à 1 semblait un cas extrême, le test de sensibilité a montré que la valeur du coefficient de frottement avait un impact modéré : l'important étant ainsi de fixer dans les îlots un coefficient inférieur au reste de gravière pour bien représenter le « freinage » induit par la présence de la centrale. Par soucis de sécurité, on choisit de retenir le scénario M.CENTRALE avec un coefficient de frottement égal à 1 dans la suite de l'analyse.

6.4.3. Synthèse de l'impact de la centrale sur le risque inondation

L'analyse a montré, tant sur les hauteurs d'eau que sur les vitesses d'écoulements que la présence de la centrale n'avait que très peu d'influence en dehors de la gravière : les hauteurs d'eau sont légèrement augmentées en amont mais pas de façon suffisante à changer la classe de hauteurs. Il en est de même pour les vitesses d'écoulements.

Le projet de centrale a donc un impact notable (et toutefois modéré) uniquement sur les dynamiques d'écoulements au sein de la gravière. Cela implique que :

- ▲ **Les deux premières exigences de la DDT 58 semblent être remplies, à savoir :**
 - « 1 - que la présence de l'installation n'aggrave pas le risque inondation ;
 - 2 - que l'installation n'a pas de conséquence négative sur les zones de grand écoulement des crues, à savoir les zones de vitesse élevée. »
- ▲ **Le dimensionnement de la structure (ancrage, longueur de câble) doit être fait en prenant en compte les résultats du modèle avec centrale pour résister à la crue de référence, à savoir M.CENTRALE.**

On peut souligner que ce modèle a été établi en prenant une hypothèse forte sur le coefficient de frottement, seul moyen de représenter la centrale en 2D. En réalité, l'écoulement se faisant en 3D, les écoulements auront donc tendance à être plus homogènes dans la hauteur d'eau des bassins. Ainsi, les perturbations engendrées par la présence de la centrale devraient être moindres à l'échelle du site. **Le choix de retenir M.CENTRALE peut alors paraître très conservateur.**

Cependant, même si les vitesses ne seront pas extrêmes en tous points comme dans M.CENTRALE, localement il pourrait y avoir de telles valeurs atteintes, induites par des perturbations locales difficiles à estimer et à modéliser. Par sécurité, ne pouvant déterminer où pourraient se produire les vitesses extrêmes, on choisit de retenir les vitesses extrêmes en tous points. **C'est pourquoi il semble impératif de conserver le modèle M.CENTRALE comme référence.**

Pour rappel : les hauteurs d'eau utilisées dans le PPRi sont issues des PHEC. Au niveau de la gravière, la valeur est de 179.5 mNGF. Dans le cadre du modèle avec centrale, le niveau d'eau maximale atteint est de 178.9 mNGF. Ainsi, le niveau d'eau obtenu à l'issu du modèle avec centrale ne dépasse pas les PHEC. Cet élément vient appuyer le constat que les impacts de la centrale n'aggravent pas le risque inondation.

6.5. AIDE AU DIMENSIONNEMENT DE LA STRUCTURE

Cette étape doit permettre de fournir au bureau d'études en charge du dimensionnement du système d'ancrage (Ciel&Terre), les données nécessaires pour assurer l'intégrité de la structure en cas de crue. Cela fait partie non seulement des demandes d'Eléments, en charge du projet, mais également de la DDT 58 par le biais de ces deux exigences :

« 3 - que l'installation résistera à une inondation de type PHEC (de par la hauteur de submersion et de par la vitesse d'écoulement de la crue) ;

4 - que l'installation sera dimensionnée au niveau des ancrages pour éviter tout arrachement d'une partie des composants en cas de crue. »

6.5.1. Dimensionnement des ancrages

Afin de s'assurer que la structure ne subisse pas d'arrachement jusqu'à la crue de référence, il est nécessaire de prendre en compte les vitesses d'écoulements auxquelles elle sera soumise. C'est au niveau des ancrages que ces efforts doivent être repris. Pour illustration, un exemple d'implantation d'un îlot est présenté en Figure 32 : la ligne d'ancrage et l'ancrage en bout doivent reprendre les efforts induits par les vitesses sur la centrale, c'est-à-dire sur les lignes de flotteurs portant les panneaux photovoltaïques.

Dans son calcul du dimensionnement des ancrages le bureau d'études Ciel&Terre étudie les efforts en chaque point par tranche de 20°. Ainsi, les vitesses maximales observées, du modèle avec centrale, ont été extraites avec leur direction. Puis, par tranche de 20°, les valeurs maximales observées sur l'ensemble de l'emprise de la gravière ont été retenues.

On se place ainsi dans une situation conservatrice : pour un point d'ancrage donné A1, on le dimensionne en prenant en compte la vitesse maximale ayant lieu dans la gravière parmi tous les points d'ancrage. Cette vitesse n'apparaissant donc pas nécessairement au point d'ancrage A1, on se place dans une situation sécuritaire.

Les valeurs à retenir sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 4: Vitesses maximales extraites dans la gravière, du modèle avec centrale

Vitesse maximale (m/s) observée par tranche de direction de 20° (0°=Nord ; 90°=Est)									
Dir (°)	0 à 20	20 à 40	40 à 60	60 à 80	80 à 100	100 à 120	120 à 140	140 à 160	160 à 180
V (m/s)	0.56	0.46	0.29	0.25	0.19	0.21	0.21	0.19	0.27
Dir (°)	180 à 200	200 à 220	220 à 240	240 à 260	260 à 280	280 à 300	300 à 320	320 à 340	340 à 360
V (m/s)	0.27	0.35	0.31	0.42	0.69	0.73	0.82	0.79	0.70

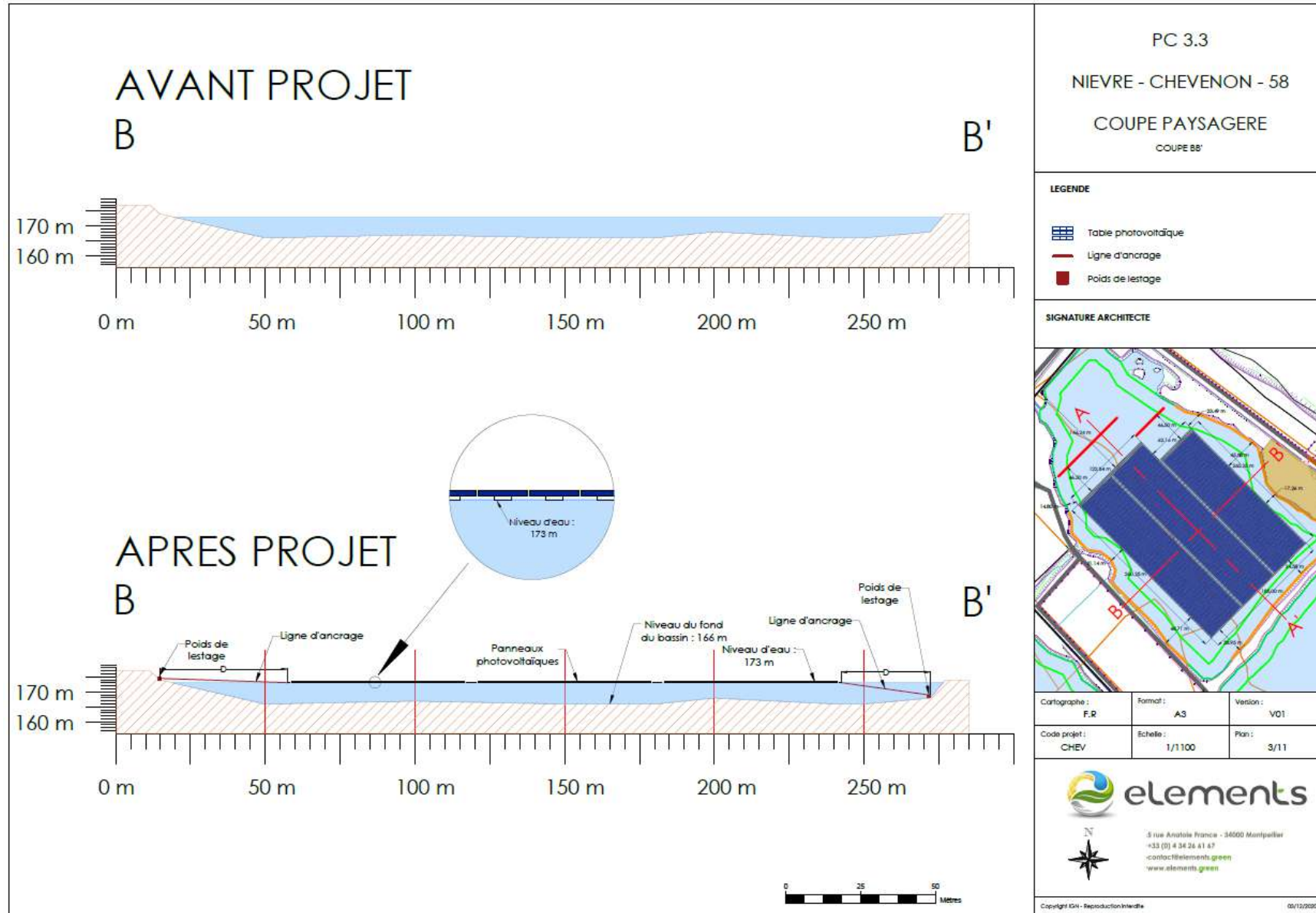


Figure 32: Coupe paysagère BB' de l'îlot 1 avec ancrage, réalisée par Eléments

6.5.2. Longueur des lignes d’ancrage

La longueur des lignes d’ancrage doit permettre à la structure d’être constamment en flottaison sur les bassins. L’amplitude des câbles doit donc être suffisante pour maintenir la structure en cas de situation d’étéage mais également en cas de crue (et donc éviter la submersion).

Pour la situation d’étéage, l’analyse des piézomètres autour du site donne un niveau minimal de la nappe observé sur les mesures disponibles de 172.1 mNGF. Cependant les données ne sont disponibles que sur les 11 dernières années. Par soucis de sécurité, nous recommandons donc de se baser sur une côte minimale du niveau d’eau de la gravière de 171 mNGF.

Il conviendra également en conséquence du niveau d’eau minimal atteint par les bassins de prévoir un recul par rapport aux berges. En effet, en cas de baisse du niveau de l’eau, les berges seront donc à nues sur une partie. Selon le profil des berges et leur pente, il ne faudrait pas que la structure vienne à « s’échouer » sur les berges à nues si la centrale se situe trop proche de celles-ci. Cet élément semble déjà avoir été pris en compte par Eléments, comme le montre la figure suivante : la ligne verte impose un décalage de la zone d’implantation des îlots par rapport aux berges. Ce constat est également visible dans la figure précédente (Figure 32) où l’îlot est maintenu à distance des berges via la ligne d’ancrage.

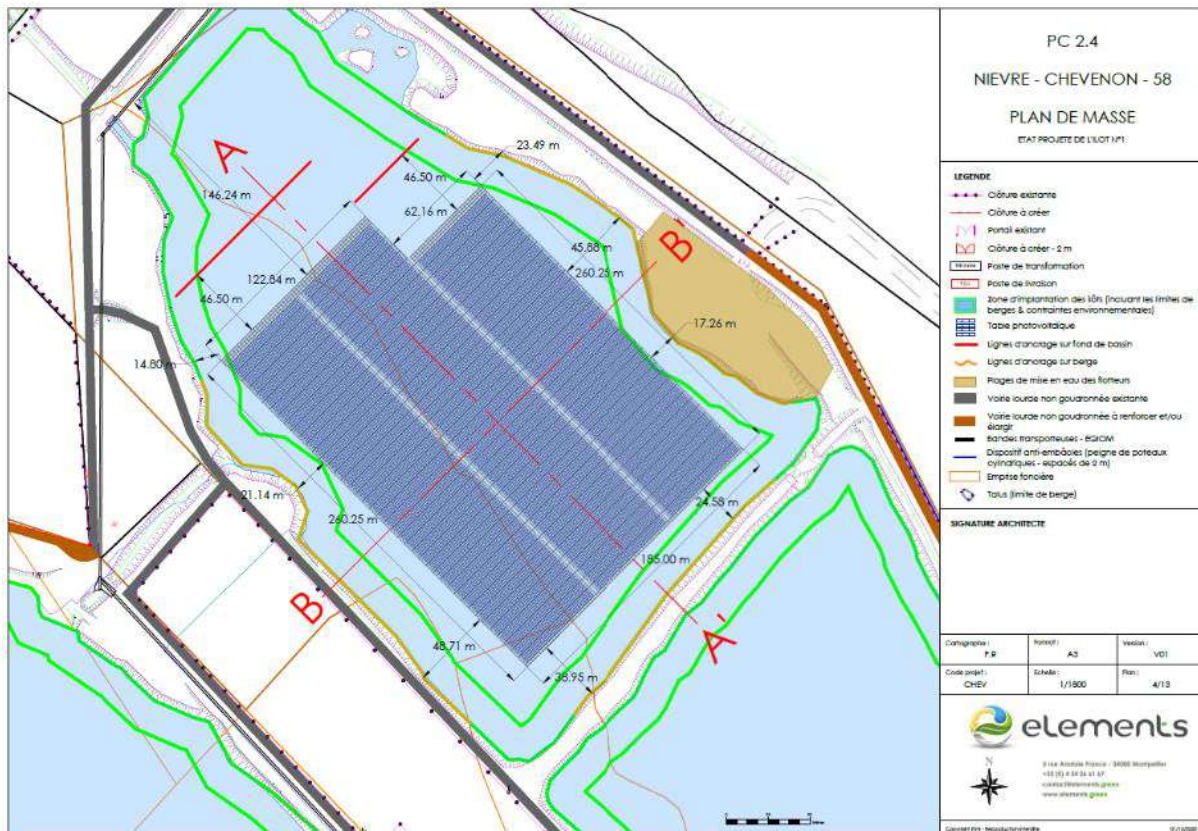


Figure 33: Plan de masse, état projeté de l’îlot 1, réalisé par Eléments

Pour la situation en crue, l’analyse des résultats du modèle avec centrale indique que le niveau d’eau maximale observé pour la crue de référence serait situé à la côte de 178.9 mNGF. Pour les PHEC, cette valeur est située à 179.5 m NGF. Par soucis de sécurité, nous recommandons donc de se baser sur une côte maximale du niveau d’eau de la gravière de 180 mNGF.

Ainsi, nous recommandons de dimensionner la longueur des câbles d’ancrage pour un niveau de la gravière pouvant varier entre les côtes de 171 mNGF et 180 mNGF.

6.5.3. Côte d'implantation des éléments sensibles

Dans le projet porté par Eléments, parmi les éléments composants la centrale, on compte des sites sensibles qui doivent rester hors d'eau en cas de crue (notamment les transformateurs). Par soucis de sécurité, il est recommandé de les implanter à une côte supérieure aux PHEC retenues sur le site, à savoir 179.5 mNGF. Une marge de sécurité d'au moins 50 centimètres devra être prévue. Dans la mesure du possible les éléments sensibles pourront être étanchésés.

Ainsi, les sites sensibles devront être implantés à la côte de 180 mNGF a minima.

6.5.4. Synthèse des éléments dimensionnants

A la suite de l'envoi de ces valeurs, le bureau d'étude Ciel&Terre a réalisé une étude d'ancrage avec les vitesses données dans la Tableau 4. Le dimensionnement des ancrages prend en compte plusieurs éléments : les efforts induits par le vent, par les vagues et par l'eau. Pour plus de détail, se référer au rapport d'ancrage.

Dans sa conclusion, le bureau d'études semble bien prendre en compte les valeurs issues du scénario avec centrale. Pour exemple, le tableau récapitulatif des efforts sur l'îlot 1 est repris dans la figure suivante. De même, les longueurs de câbles ont été ajustées avec les valeurs préconisées.

#1	Arrière	Gauche	Droite	Avant
Efforts combinés	896.83 kN	194.91 kN	242.14 kN	480.89 kN
Différence des efforts combinés par rapport à l'étude sans impact en condition d'utilisation	+3.65 kN	-11.73 kN	+37.03 kN	+40.88 kN
Nombre de spreader bars	83 pcs	32 pcs	36 pcs	48 pcs
Différence du nombre de spreader bars par rapport à l'étude sans impact en condition d'utilisation	+1 pcs	+0 pcs	+4 pcs	+4 pcs
Différence du nombre de points d'ancrages par rapport à l'étude sans impact en condition d'utilisation	+1 pcs	+0 pcs	+4 pcs	+2 pcs

Figure 34: Résultats des efforts appliqués à l'îlot 1 et des ancrages à prévoir - Ciel&Terre

En prenant en compte ces quatre éléments dans le dimensionnement de la structure, l'intégrité de la centrale devrait être assurée jusqu'à la crue de référence et le projet remplit les deux dernières exigences de la DDT 58 citées en page précédente. Il s'agit donc de s'assurer :

- ▲ De dimensionner les ancrages sur les bases des vitesses issues du modèle M.CENTRALE ;
- ▲ De prévoir une longueur suffisante des lignes d'ancrage pour s'adapter au marnage des bassins et assurer la stabilité de la centrale ;
- ▲ De prévoir un décalage par rapport aux berges des bassins ;
- ▲ D'implanter les sites sensibles à une côte suffisante pour être hors d'eau dans le cas de la survenance d'une crue de type PHEC, et les étanchésier.

En se basant sur la conclusion de l'étude de Ciel&Terre, ces éléments semblent bien avoir été pris en compte.